

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

ИНСТИТУТ ОКЕАНОЛОГИИ им. П.П. ШИРШОВА

На правах рукописи

Соловьев Дмитрий Александрович



УДК 550.34

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ЛАБОРАТОРНОЕ
МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО БАРА ПРИ РАЗЛИЧНЫХ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Специальность 25.00.28 – Океанология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2006

Работа выполнена в Институте Океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор, член-корр. РАН С.С. Лаппо

доктор физико-математических наук,
профессор, К.В. Показеев

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В.Н. Зырянов

доктор физико-математических наук
А.Г. Костяной

Ведущая организация: Институт Водных проблем Севера
Карельского НЦ РАН (г. Петрозаводск)

Защита состоится “_____” _____ 2006 г. в _____ час. _____
мин. на заседании Диссертационного совета К002.239.01 при Институте
Океанологии им. П.П. Ширшова РАН по адресу: 117997, Москва,
Нахимовский проспект, 36, ауд. _____ .

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института Океа-
нологии им. П.П. Ширшова РАН.

Автореферат разослан “_____” _____ 2006 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
кандидат географических наук



С.Г. Панфилова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Изучение процессов конвекции, вносящих существенный вклад в тепловой баланс океанов, морей, озер, естественных и искусственных водоемов, вызывает постоянно возрастающий научный и практический интерес. К числу явлений, знание закономерностей которых необходимо для построения общей теории взаимодействия океана и атмосферы, а также прогноза термического и динамического режима озер и водохранилищ, относится плотностное перемешивание вод с образованием фронтального раздела - термического бара (термобара). Термический бар формируется в пресных и солоноватых водоемах ($S \leq 24\%$) средних широт в период освобождения от ледяного покрова, либо его образования. В весенний период, прогрев прибрежной области водоема под действием солнечного излучения идет интенсивнее, чем центральной. В том случае, когда поверхностные воды прибрежной области быстрее достигают температуры максимальной плотности близкой к 4°C , возникает неустойчивость плотностной стратификации, вызывающая конвективное перемешивание. Конвективное движение вод прибрежной и центральной части водоема приводит к формированию узкого вертикального слоя, фронтально разделяющего водоем на две области с разной температурой и скоростью. Аналогичная ситуация также имеет место в период осеннего охлаждения водоема.

Современное состояние исследований термического бара характеризуется ограниченностью данных натуральных измерений; немногочисленностью лабораторных экспериментов, отсутствием математических моделей в достаточной мере адекватных реальным процессам; неполнотой разработок прикладных аспектов. О своевременности постановки комплексных исследований термического бара свидетельствует недостаточная изученность механизмов распространения термоконвективными циркуляциями промышленных и бытовых отходов, масштабы загрязнения водоемов которыми, постоянно увеличиваются. Закономерности конвективных движений в термическом баре, которые обладают высокой транспортирующей способностью, до настоящего времени, с точки зрения взаимосвязи с гидрометеорологическими условиями, практически не исследовались. В связи с этим, изучение гидро - термодинамических процессов в пресных водоемах в период существования в них термического бара, отвечающего за

перераспределение водных масс, а, следовательно, качество воды представляют несомненный научный и практический интерес.

Таким образом, тема диссертации является актуальной как для теоретических исследований, так и практических приложений.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является лабораторное и численное исследование закономерностей термогидродинамических процессов в пресном водоеме во время существования в нем весеннего термического бара, развивающегося под воздействием разнообразных гидрометеорологических условий. Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- Построить математическую модель термического бара, формирующегося и развивающегося при различных гидрометеорологических условиях с учетом силы Кориолиса.
- Провести теоретический и экспериментальный анализ динамики развития термического бара с учетом термического и динамического состояния водоема при различной интенсивности солнечной радиации.
- Определить влияние силы Кориолиса на формирование термического бара в крупномасштабных водоемах.
- Исследовать воздействие ветра различной интенсивности и направленности на термогидродинамические процессы в водоеме, сопровождающие развитие термического бара.
- Выполнить оценки значений конвективной и дрейфовой составляющей скорости течений при развитии термического бара, с учетом действия разнообразных погодных факторов.

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Физико-математическая модель термического бара, формирующегося и развивающегося при различных гидрометеорологических условиях, с учетом силы Кориолиса.
- Вычислительная программа численного расчёта термогидродинамических характеристик термического бара при внешних воздействиях.
- Экспериментальные и расчетные данные по структуре конвективных течений и пространственно-временному распределению температуры, скорости в крупномасштабных водоемах при различных режимах развития термического бара.
- Методика определения степени влияния гидрометеорологических условий на параметры термического бара.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. В процессе работы получены новые экспериментальные данные и теоретические зависимости, характеризующие воздействие на структуру течений и распределение температуры во фронтальной области конвективных циркуляций термического бара, различной скорости ветра, влияние силы Кориолиса и суточного изменения радиационного потока тепла от Солнца.

2. Впервые построена математическая модель термического бара с учётом эффектов вращения и приводных ветровых потоков, что позволило установить параметры конвективного течения вдоль линии термического бара и оценить влияние ветра на поля течений и температуры.

3. Впервые решена численная задача о движении фронта термического бара с ранее не использовавшимися в граничных условиях потоками скрытого и явного тепла.

4. Построен новый вычислительный алгоритм, основанный на неявной разностной схеме, что позволило проводить расчеты для значительно более широкого спектра параметров численной модели термического бара.

ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Достоверность результатов диссертации обеспечена использованием математического и физического моделирования термического бара, сравнением данных математического моделирования и лабораторных экспериментов с натурными данными. Выводы работы не противоречат данным других авторов, в области взаимного перекрытия результатов исследований.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Проведенное исследование расширяет современные представления о термическом балансе природных и искусственных водоемов, а также о способах прогноза конвективных движений в водных средах с учетом свойств вод пресных и солоноватых водоемов ($S \leq 24\%$). Содержащиеся в работе данные численного и лабораторного эксперимента могут быть использованы при разработке методов расчета теплообмена водных объектов и атмосферы. Результаты моделирования динамики развития термического бара, полученные в настоящей работе, рекомендуются для практического применения при оценках распространения загрязнений в водоемах под воздействием термического бара и решении прикладных задач по организации процессов управления качеством воды в озерах и во-

дохранилищах, используемых для питьевого водоснабжения с целью повышения их экологической безопасности.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

Конкретное участие автора заключается в реализации методов решения поставленных в работе задач, обработке, анализе, интерпретации результатов математического и физического моделирования и сравнения их с натурными данными. Автором лично создана экспериментальная установка с измерительным комплексом для лабораторного моделирования термобара и выполнен весь объем экспериментальных работ. Все теоретические результаты, которые представлены в диссертации, получены непосредственно автором.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ

Основные результаты и положения, изложенные в диссертационной работе, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и симпозиумах:

- международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальной науке «Ломоносов 2003», «Ломоносов 2006», Москва, 2003, 2006 г.;
- XII international Conference «Fluxes and structures in fluid», Saint-Petersburg, 2003 г.;
- IV всероссийской научной молодежной школе «Возобновляемые источники энергии», Москва, 2003 г.;
- международном симпозиуме «Состояние и перспективы взаимной интеграции производства с достижениями механики», посвященном памяти академика Х.А.Рахматулина, Узбекистан, Карши, 2003г.;
- IV всероссийской научной конференции «Физические проблемы экологии» Москва, 2004 г.;
- VI международной конференции «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей», Москва, 2004 г.
- XIII international Conference «Fluxes and structures in fluid», Moscow, 2005 г.;
- XII международном симпозиуме «Динамические проблемы механики сплошных сред», Москва, 2006 г.
- материалы диссертационного исследования, доложенные на конференции «Молодые ученые городу Москве», удостоены премии и медали Правительства Москвы 2004 года (указ Мэра Москвы №28-УМ).

ПУБЛИКАЦИИ

Основные результаты диссертации изложены в 8 научных публикациях.

СТРУКТУРА И ОБЪЁМ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка цитируемой литературы из 83 наименований. Работа содержит 128 страниц текста, 41 рисунок и 11 таблиц.

БЛАГОДАРНОСТИ

Тема диссертации была сформулирована профессором, чл.-корр. РАН Сергеем Сергеевичем Лаппо, которому я признателен за постановку задачи, поддержку и постоянное внимание к работе. Выражаю благодарность доктору физико-математических наук А.Г. Зацепину за помощь в процессе выполнения диссертации. Особое слово благодарности за участие в постановке и обсуждении результатов численного эксперимента выражаю старшему научному сотруднику, кандидату физико-математических наук Н. С. Блохиной.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ обоснована актуальность решаемой научной задачи, сформулирована цель исследования, кратко изложено содержание диссертации, перечислены полученные результаты.

В ПЕРВОЙ ГЛАВЕ сделан обзор литературы, посвящённой вопросам образования и развития термического бара. Рассмотрены основные свойства термического бара. Изложено состояние проблемы исследований конвекции в пресных и солоноватых водоемах ($S \leq 24\%$), связанной с переходом температуры поверхностных вод через величину, соответствующую наибольшей плотности. Описаны методы численного и лабораторного моделирования термического бара. На основе обзора литературы формулируется постановка задачи диссертационной работы, обосновываются использованные методы.

Основополагающее изучение термического бара в пресноводных водоемах представлено в классических работах В.А.Форея, А.И. Тихомирова, Г.К.Роджерса, теоретических исследованиях К.Н. Федорова, Н.Н. Филатова. Экспериментальные натурные наблюдения проводились как отече-

ственными (Н.Н. Филатов, М.А.Науменко, В.В. Парфенова, М.Н. Шимарев, А.Ю. Тержевик, П.М.Бояринов, М.П. Петров, С.В.Рянжин и др.), так и зарубежными учеными (Д.В Хуббард., Ж.Д. Спайн, И.Малм, Р.А.Молл, И.К.Хуанг, Е.С.Кармак, Д.Ю.Фармер и др.). Выполнялись немногочисленные лабораторные эксперименты по изучению термического бара (С.С. Зилитинкевич, К.Д. Крейман, Г.Х.Эллиот, И.А. Эллиот и др.). Наибольшее число работ, посвященных описанию термического бара, составляют численные эксперименты с математическими моделями (Г.Т.Ксанди, И.К. Хуанг, И.Р.Беннет, И.Брокс, И.Ликк, Ю.Л. Демин, Н.Н.Филатов, С.С. Зилитинкевич, К.Д.Крейман, А.Ю. Тержевик, А.Е. Орданович, Н.С. Блохина и др.).

На основе анализа этих исследований выделяется круг основных нерешенных задач. В натурных наблюдениях установлена зависимость временного и пространственного распределения изотермы, соответствующей температуре максимальной плотности воды, от глубины водоема, направления ветра, теплового потока солнечной радиации. Значительный объем исследований природного термического бара связан с определением факторов, влияющих на длительность его существования и скорость перемещения фронта. Полученные в наблюдениях данные, далеко не всегда соответствуют аналитическим соотношениям и зависимостям, установленным в рамках различных приближений. Вопрос о скорости перемещения и продолжительности существования термического бара остается открытым. Особенно много неясностей связано с выяснением влияния внешних гидromетеорологических факторов на формирование и развитие термического бара.

Значительная группа задач, которая остается до сих пор также без решения, связана с фронтом термического бара. Обнаруженное в наблюдениях нелинейное изменение температуры в зоне фронта и струйное градиентное течение не подтверждено теоретическим описанием. К характеристикам термического бара, не нашедшим должного теоретического обоснования, относится также факт отсутствия водообмена через фронт, наличие резких, превышающих средние значения, горизонтальных градиентов, плотности, частоты Вэйсяля-Брента. Требуется проверка утверждения о влиянии эффекта Кориолиса на нелинейный характер горизонтальных градиентов указанных величин. Нет ясности в вопросе о том, каким образом изменение водообмена и перераспределение загрязнений на поверхно-

сти водоёма при термическом баре связано с гидрометеорологической ситуацией и масштабами водоёма.

Представленный в первой главе обзор работ свидетельствует о том, что реалистичным путем решения наименее изученных вопросов в проблеме термического бара является комплексное исследование, включающее в себя натурные измерения, математическое моделирование и лабораторный эксперимент. В основу этого исследования должно быть положено создание модели термического бара, предусматривающей последовательный учет широкого спектра гидрометеорологических условий.

Во ВТОРОЙ ГЛАВЕ описана физико-математическая постановка модели термического бара открытая для учета расширенного спектра параметров гидрометеорологического взаимодействия атмосферы и водной среды, включающего в себя воздействие ветра и солнечный нагрев, потоки скрытого и явного тепла, а также вращение Земли.

Движение жидкости рассматривается в водоеме прямоугольной вытянутой формы с заданным соотношением вертикального горизонтального размера и наклонным дном в декартовой системе координат Ox_1, Ox_2, Ox_3 . Ось Ox_1 направлена вдоль термического бара, ось Ox_3 - вертикально вверх (рис.1).

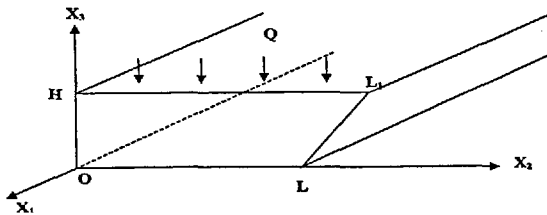


Рис.1. Схема водоёма. H - глубина водоёма, L - ширина по дну, L_1 - ширина по поверхности, Q - поток тепла на верхнюю границу водоёма.

Для описания термогидродинамических процессов в вязкой несжимаемой жидкости используется система уравнений Навье - Стокса во вращающейся с угловой скоростью Ω системе координат, в приближении Буссинеска, уравнение теплопроводности и уравнение состояния, которое описывает квадратичную зависимость плотности воды от температуры вблизи температуры наибольшей плотности. Предполагается, что крупномасштабные конвективные структуры формируются в турбулентной среде.

Все неизвестные величины в уравнениях представляются в виде суммы двух слагаемых, одно из которых описывает крупномасштабное и среднее движение, а другое - мелкомасштабную составляющую турбулентного потока. Замыкание уравнений для конвективных упорядоченных структур осуществляется с использованием коэффициентов турбулентной вязкости ν_T и температуропроводности λ_T . Описание мелкомасштабной турбулентности осуществляется с использованием гипотезы Буссинеска. Коэффициент турбулентного обмена выражался по известному соотношению Колмогорова: $\nu_T = C\varepsilon^{1/3}H^{4/3}$, где H - характерный линейный размер крупномасштабных образований, C - эмпирическая константа, ε - средняя скорость диссипации турбулентной энергии, для вычисления которой использовалось уравнение баланса турбулентной энергии:

$$\varepsilon = \frac{1}{V} \int \left(\bar{r}_{ij} \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \gamma (\bar{T} - 4^0 C) \overline{T'U'_x} \right) dV, \text{ где } U_i \text{ - составляющие скорости, } T \text{ -}$$

температура, V - объем, штрихом обозначены пульсации скорости и температуры, $\bar{r}_{ij} = -\overline{U'_i U'_j}$, $\gamma = 0,000085$ град⁻². При осуществлении процедуры замыкания гидротермодинамической системы уравнений использовались следующие приближения: - коэффициенты турбулентного обмена постоянны во всей исследуемой области и много больше соответствующих молекулярных значений; - турбулентное число Прандтля равно единице ($\lambda_T = \nu_T$); - движение жидкости вдоль оси x_1 однородно и потому, выражается через функцию тока ψ : $U_2 = \frac{\partial \psi}{\partial x_3}$, $U_3 = -\frac{\partial \psi}{\partial x_2}$ После осреднения и замы-

кания трехмерной системы уравнений получается следующая система уравнений на плоскости x_2, x_3 ($i, j = 2, 3$), которая приведена к безразмерному виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1}{\partial t} + \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial U_1}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial U_1}{\partial x_3} - 2 \frac{\partial \psi}{\partial x_3} \Omega \sin \alpha &= \mu \left(\frac{\partial^2 U_1}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 U_1}{\partial x_3^2} \right) \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_3} \right) + 2 \frac{\partial U_1}{\partial x_3} \Omega \sin \beta &= \mu \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_3^2} \right) - 2(T - T_4) \frac{\partial T}{\partial x_2} \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \left(\frac{\partial \psi}{\partial x_3} \frac{\partial T}{\partial x_2} - \frac{\partial \psi}{\partial x_2} \frac{\partial T}{\partial x_3} \right) &= \mu \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial x_3^2} \right), \quad \Delta \psi = \varphi \end{aligned}$$

Здесь безразмерные величины: ψ - функция тока, φ - вихрь скорости, T_4 - температура максимальной плотности пресной воды, α - географическая широта, $\mu = \frac{V_T}{H\sqrt{gH}}$ - коэффициент турбулентной вязкости, x - расстояние, $T = \sqrt{\frac{1}{\gamma}}$ - температура, $V = \sqrt{gH}$ - скорость, t - время.

В граничных условиях (см. ниже) были учтены не только радиационный балансый поток тепла, поступающий от Солнца Q_R , но и потоки скрытого (за счет испарения) Q_L и явного тепла Q_T между водоемом и атмосферой. Ветер различной интенсивности задается с учетом трения при взаимодействии воздушных масс с водной поверхностью.

Верхняя граница:

$$-c_0\rho\lambda\frac{\partial T}{\partial x_3} = Q, \quad \rho v\frac{\partial U_2}{\partial x_3} = \tau_{w2}, \quad \rho v\frac{\partial U_1}{\partial x_3} = \tau_{w1}, \quad U_3 = 0, \quad \text{где}$$

$\tau_w = C_D\rho_a(V)^2$ - напряжение ветра на поверхности воды, C_D - коэффициент трения, ρ_a - плотность воздуха, $V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$ - скорость ветра над поверхностью воды, V_1 и V_2 - скорость ветра вдоль оси x_1 и x_2 соответственно, $Q = Q_R + Q_T + Q_L$ - суммарный поток тепла, Q_R - поток тепла от Солнца, Q_T - поток явного тепла, Q_L - поток скрытого тепла.

Дно:

$$\frac{\partial T}{\partial x_3} = 0, \quad U_1 = 0, \quad U_2 = 0, \quad U_3 = 0$$

Левая граница:

Условия симметрии для всех переменных:

$$\frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \quad U_1 = 0, \quad U_2 = 0, \quad U_3 = 0$$

Правая граница:

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0, \quad U_{1n} = 0, \quad U_{2n} = 0, \quad U_{3n} = 0$$

В ТРЕТЬЕЙ ГЛАВЕ приводятся результаты численных расчётов с использованием предложенной математической модели термики и динамики развития весеннего термического бара в крупномасштабных водоемах с включением силы Кориолиса и учетом погодных условий. Расчеты прово-

дидлись для водоемов общей протяженностью $3 \cdot 10^3$ м и $18 \cdot 10^3$ м, с глубинами 50 м и 150 м, с потоками солнечной радиации от 0 до 210 Вт/м^2 , температурой воздуха от 2 до 10°C , и влажностью 60%. Число расчетных точек по глубине водоема - 17, по длине - 97, безразмерный шаг по глубине 0,0625, по длине 0,625, по времени - 0,5.

Пространственное распределение изотерм и линий тока в данных расчета с силой Кориолиса отличаются конфигурацией линий (рис.2). Отмечается уменьшение скорости циркуляции жидкости и снижение расхода опускающихся и поднимающихся в циркуляционных ячейках водных масс при задании силы Кориолиса. Влияние силы Кориолиса, выражается в отклонении на 10° вправо векторов скорости движения жидкости.

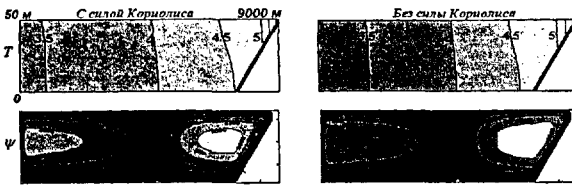


Рис.2. Распределение температуры T и функции тока ψ через 29 сут. в вертикальном сечении водоема.

Модельный термический бар перемещается со скоростью 160 м/сутки с учетом эффекта Кориолиса и 155 м/сутки в отсутствии сил Кориолиса, а время его жизни соответственно 56 суток и 57,3 суток. В природных водоемах время жизни термического бара занимает от одного до трех месяцев в зависимости от размеров водоема и погодных условий [Филатов Н.Н., 2002]. Средняя скорость его движения в Ладожском озере по оценкам [Тихомиров, 1959] и [Науменко М.А., Каретников С.Г., 1998] составляла 80 - 500 м/сутки.

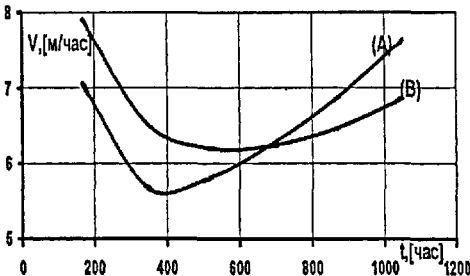


Рис.3. Зависимость скорости перемещения изотермы 4°C по поверхности водоема от времени прогрева водоема. А) в отсутствии силы Кориолиса; В) при наличии силы Кориолиса.

Действие сил Кориолиса способствует снижению средней скорости циркуляции жидкости в обеих циркуляционных ячейках (рис.3). На на-

чальном этапе прогрева водоема сила Кориолиса приводит к ускорению смещения термического бара к центру водоема, а на конечном этапе движения термического бара – замедлению его продвижения. Это связано с тем, что на ячейку большего размера воздействие силы Кориолиса значительнее, что приводит к уменьшению скорости циркуляции жидкости в этой ячейке. Сила Кориолиса продлевает существование термического бара. Можно заключить, что время жизни, скорость распространения моделируемого термобара и скорость движения жидкости в водоеме по порядку величины, совпадают с данными натуральных наблюдений для Ладожского озера [Бояринов П. М., Петров М.П., 1987].

Динамика термического бара при задании суточного изменения радиационного потока тепла от Солнца рассмотрена на модели водоема длиной 3000 м и глубиной 50м. В области моделируемого водоема отмечалась осцилляция скорости течений и температуры водных масс, в зависимости от времени суток. При этом интенсивность конвективного движения водных масс в ночное время снижалась примерно в 2 раза, а продолжительность существования термического бара увеличивалась, соответственно поступающему потоку тепла.

В численных расчетах для модели термобара с ветром величина скорости ветра V , который действует на водную поверхность водоема, изменялась в пределах от 2 м/с до 16 м/с. Ветер действовал как в положительных, так и отрицательных направлениях вдоль осей x_2 и x_1 в течение 12 часов. Наличие ветра над водной поверхностью существенно изменяет картину течений. Когда ветер направлен против движения термического бара, с ростом скорости ветра увеличивается размер глубинной ячейки, а в случае ветра по направлению распространения термического бара увеличивается размер прибрежной ячейки. Противоположная картина имеет место для ветра направленного поперек термического бара. При интенсивном ветре до 16 м/с верхняя часть фронта термического бара испытывает смещение до 500 м в сторону действия ветра, по сравнению с ее положением в безветренную погоду. На основе анализа данных расчетов показано, что воздействие ветра на поверхность водоема в зависимости от его величины и направления может не только подавлять развитие термического бара, но и существенно изменять картину течений воды, способствуя его усилению.

Для характеристики режимов устойчивости термического бара к ветровому воздействию, построена зависимость чисел Ричардсона от Архи-

меда, которые устанавливают соотношение сил инерции, конвекции и трения (рис.4). Увеличение скорости ветра приводит к подавлению термической конвекции и сопровождается увеличением скорости циркуляции жидкости, вызванной ветровым воздействием.

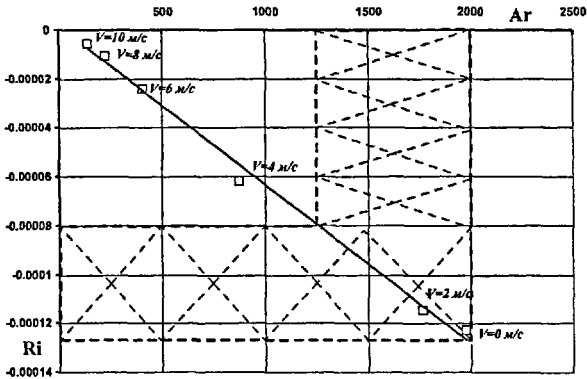


Рис. 4. График зависимости средних значений числа Архимеда Ar от числа Ричардсона Ri при различных скоростях ветра $V = 0, 2, 4, 6, 8, 10$ м/с. Заштрихована область устойчивого существования термического бара.

В заключительной части главы приведены результаты численного расчета в модели термического бара с учетом не только радиационного балансового потока тепла, но и потоков скрытого и явного тепла между водоемом и атмосферой. Оценки величин этих потоков при различных значениях скорости ветра и перепаде температуры вода - воздух показали, что их величины при определенной гидрометеорологической ситуации могут давать вклад соизмеримый с радиационным потоком тепла от Солнца. Когда воздух теплее воды, явный поток тепла направлен в водоем, а скрытый в атмосферу. Суммарное их значение приводит к изменению скорости распространения термического бара (до 25%) пропорционально дополнительно поступившему в толщу воды количеству тепла.

В ЧЕТВЁРТОЙ ГЛАВЕ приводятся результаты лабораторных экспериментов с имитацией воздействия на термический бар гидрометеорологических факторов, а также их сравнение с данными численного расчета математической модели и натурными наблюдениями.

Для экспериментального моделирования термического бара создана лабораторная установка. Она представляет собой прямоугольный бассейн из стекла длиной 1,5 м и шириной 0,4 м с наклонным в продольном направлении дном (рис.5.).

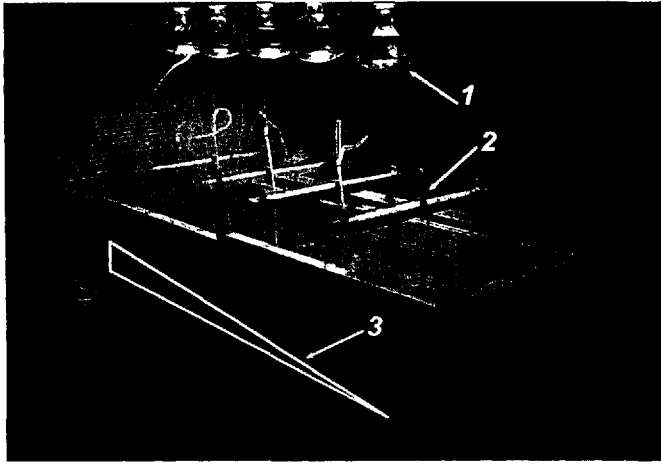


Рис. 5. Лабораторная установка для исследования термического бара. 1 - электролампы ИКЗ-250; 2 - измерительные зонды; 3 - схематически показано положение наклонного дна бассейна.

Температура воды измерялась с помощью зондов, с закрепленными датчиками и регистрировалась платой АЦП ЛА70М4, передающей массив значений в ПЭВМ. Абсолютная погрешность измерения температуры составляла $\pm 0.15^\circ\text{C}$. Проводилась видеосъемка циркуляционных движений в термическом баре с определением скорости по трекам перемещений частиц. В качестве трассеров использовались кристаллы марганцево-кислого калия. В отличие от ранее выполненных работ на данной установке можно также моделировать ветровую циркуляцию водных масс, что позволяет существенно увеличить соответствие с гидрометеорологическими условиями в природных водоемах.



Рис. 6. Распределение температуры и схема течений в лабораторной модели.

В опытах установлено, что в теплой и холодной областях бассейна развивались замкнутые циркуляционные ячейки с горизонтальными осями,

ориентированными вдоль линии бара (рис.6). В начальной фазе развития гидрофронта (в интервале до 25-30 мин), система ячеек развивалась независимо друг от друга. Между ними расположен фронт термического бара (рис 7).

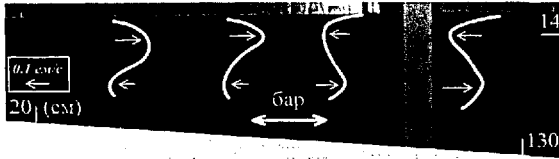


Рис. 7. Профили горизонтальной скорости в лабораторном эксперименте.

Анализ результатов измерений скорости движения трассеров показал, что в заключительной фазе развития гидрофронта (в интервале до 30-60 мин), горизонтальный перенос водных масс через гидрофронт отсутствовал, о чем свидетельствовало наличие практически не искривленных течениями вертикальных следов трассеров. Ширина переходной зоны между циркуляционными ячейками составляла 4 — 8 см. По мере увеличения тепловой области фронтальный раздел, сдвигаясь в глубокую часть бассейна, принимал наклонное положение и искривлялся. Таким образом, в результате выполненных опытов были выявлены две фазы в процессе смещения термического бара в клине пресной воды: первая — «быстрая» и вторая — «медленная». Так как, поток тепла через свободную поверхность воды в лабораторной установке не менялся в пределах одного опыта, этот результат свидетельствует о увеличении роли горизонтальной адвекции тепла по мере смещения линии термического бара. Валиковая конвекция в окрестности бара приводит к захвату и смещению теплой и холодной вод, лежащих по разные стороны фронта, то есть служит дополнительным фактором теплового воздействия на зону бара и, тем самым, оказывает влияние на скорость ее продвижения вперед. Данное воздействие, определяется, главным образом, соотношением объема водных масс, охваченных теплой и холодной циркуляционной ячейкой. Из-за большего (на протяжении практически всего эксперимента) объема, занимаемого в наклонной области бассейна глубинной холодной циркуляционной ячейкой, это влияние выражается в замедлении скорости смещения бара. Смена двух фаз характеризуется искривлением в вертикальной плоскости фронтального раздела между циркуляционными ячейками, наползанием языка теплой воды на нижний холодный слой и усилением S-образности эпюра скорости течения

в области около бара. Данный факт, в выполненных ранее натурных наблюдениях не отмечался.

Полученные в лабораторных экспериментах результаты динамики изменения термической структуры водной

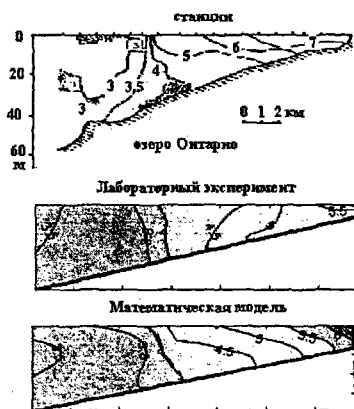


Рис. 8. Вертикальное распределение температуры в озере Онтарио [Rodgers, 1965] и моделях.

среды и течений были сопоставлены с данными численного расчета лабораторной модели термического бара (Рис 8.). Сравнение проводилось путем масштабирования размеров природных водоемов и лабораторного бассейна и при соблюдении подобия по числам Ричардсона и Тейлора.

По результатам сравнительного анализа сделан вывод о том, что нелинейный характер пространственно-временного изменения средней скорости смещения термического бара в моделях подтверждается спутниковыми ИК наблюдениями за природным термическим баром.

В заключительном параграфе главы представлены результаты лабораторных экспериментов по изучению влияния ветрового воздействия на термический бар. Установлено, что при небольших скоростях ветра (меньших 2 м/с) формируется глубинное противотечение, которое приводит к подавлению плотностной неустойчивости и охвату водоема единой циркуляционной ячейкой, вращающейся по направлению действия ветра с незначительным наклоном термического бара в наветренную сторону. С ростом скорости ветра усиливается перемешивание вод с выравниванием температуры по всему объему, приводящее к распаду термического бара. Обнаружены режимы ускоренного и замедленного движения фронта термического бара под воздействием ветра различного направления.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана математическая модель и создан вычислительный алгоритм на основе неявной численной схемы, позволяющий изучать влияние гидрометеорологических факторов (температуры, влажности, потоков

тепла; ветра) на термогидродинамические процессы в водоемах, связанные с термическим баром.

2. Проведено исследование динамики развития термического бара и влияния на этот процесс силы Кориолиса. Показано, что действие силы Кориолиса приводит к снижению средней скорости циркуляции водных масс на 20% и возрастанию длительности существования термического бара с масштабом временного прироста 1% на 5 км протяженности водоема.

3. Проведено численное моделирование термического бара с учетом суточного хода радиационного потока тепла от Солнца. Показано, что суточное изменение радиационного потока тепла приводит к осцилляции скорости течений и температуры водных масс и увеличению продолжительности существования термического бара в водоеме.

4. При наличии термического бара выполнено моделирование влияния ветра различной интенсивности и направления на термогидродинамические процессы в водоеме. Установлен интервал 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.

5. На основе предложенной методики для определения степени влияния различных гидрометеорологических условий на параметры термического бара, базирующейся на оценке чисел подобия Архимеда и Ричардсона, проведен анализ устойчивости термического бара к ветровому воздействию. Построена диаграмма устойчивости термического бара и определены критические значения этих чисел.

6. Исследовано влияние явного и скрытого потоков тепла солнечного излучения на динамику термического бара. Показано, что воздействие указанных потоков на скорость термического бара, при определенных погодных условиях, может быть сравнимо с действием радиационной составляющей теплового потока.

7. Создана установка, включающая в себя измерительный и программный комплекс, позволяющая исследовать термику и динамику термического бара в лабораторных условиях. Выявлены две фазы в процессе смещения термического бара в клине пресной воды: «быстрая» и «медленная», связанные с увеличением горизонтальной адвекции тепла между теплой и холодной циркуляционной ячейкой. Этот факт, в выполненных ранее натуральных наблюдениях, не отмечался.

8. Впервые исследована динамика развития термического бара в лабораторном бассейне при ветровой циркуляции водных масс. Обнаружено ускоренное перемещение термического бара (до 15%) под действием слабоинтенсивного (до 1,5 м/с) ветра, направленного к глубоководной части бассейна и замедленное движение фронта при ветре в направлении мелководья. Этот результат указывает на зависимость адвекции тепла термобарическими циркуляциями от направления и интенсивности ветра.

9. Из сравнительного анализа полученных результатов математического и лабораторного моделирования и натуральных наблюдений за термикой и динамикой термического бара при меняющихся гидрометеорологических условиях в период весеннего прогрева следует, что между ними имеется качественное соответствие, позволяющие разрабатывать прикладные аспекты их использования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ
ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Соловьев Д.А., Блохина Н.С. Математическое моделирование весеннего термобара с учетом действия силы Кориолиса // Тезисы докладов международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых по фундаментальной науке "Ломоносов 2003", секция физика, М: изд-во физического факультета МГУ, 2003. С.37-38.

2. Соловьев Д.А., Блохина Н.С. Математическое моделирование весеннего термобара в глубоком водоеме // Возобновляемые источники энергии. Материалы IV Всероссийской научной молодежной школы, М: изд-во географического факультета МГУ, 2003. С.104-107.

3. Blokhina N.S., Ordanovich A.E., Pokazeev K.V., Soloviev D.A. Spring thermal bar evolution in a large lakes // Fluxes and structures in fluid. Abstracts International Conference, Saint-Petersburg, 2003. P. 25-26.

4. Нигматулин Р.И., Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Динамика развития весеннего термобара в водоеме большого размера // Состояние и перспективы взаимной интеграции производства с достижениями механики. Сборник научных трудов, посвященный памяти академика Х.А. Рахматулина. Узбекистан: Карши, 2003. С.7-16.

5. Блохина Н.С., Орданович А.Е., Соловьев Д.А. Оценка влияния силы Кориолиса на динамику развития весеннего термического бара // Физиче-

ские проблемы экологии (экологическая физика), том 12, М: изд-во «Макс Пресс», 2004. С. 5-11.

6. Блохина Н.С., Соловьев Д.А., Орданович А.Е. Развитие термического бара в условиях действия силы Кориолиса и ветра (математическая модель) //Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей. Труды VI международной конференции ИВП РАН, М., 2004. С. 123-127.

7. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Оценка устойчивости термического бара к ветровому воздействию //Международная конференция «Потоки и структуры в жидкости», Москва , 2005. С. 81-83.

8. Блохина Н.С., Соловьев Д.А. Влияние ветра на динамику развития термобара в период весеннего прогрева водоема, // Вестник Моск. Ун-та. Серия 3. Физика. Астрономия, №3, 2006. С. 62-66.

Подписано к печати 23.10.06
Тираж 110 Заказ 162

Отпечатано в отделе оперативной печати
физического факультета МГУ

