

## **ОТЗЫВ**

### **официального оппонента**

на диссертацию Цыденова Баира Олеговича  
«Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата  
физико-математических наук  
по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Б.О. Цыденова направлена на исследование гидродинамических процессов, связанных с явлением термобара, наблюдающегося в озерах умеренных широт, с использованием методов математического моделирования.

Актуальность выбранной темы не вызывает сомнений, поскольку термобар может способствовать распространению загрязнения от поверхности водоёма в его глубинную часть. Поэтому необходимо понимание механизмов плотностной конвекции, сопровождающих рассматриваемое явление. Важнейшую роль в этом играет математическое моделирование как инструмент получения развернутой пространственно-временной картины явления.

Во введении автор работы сформулировал цель, задачи, научную новизну, практическую значимость диссертационного исследования, а также положения, выносимые на защиту, дал информацию о степени апробации работы, представил краткое содержание работы по главам.

В первой главе приведён обзор теоретических и экспериментальных исследований явления термобара в глубоком озере, представлены сведения натуральных наблюдений, указаны проблемные аспекты, возникающие при численном моделировании термобара, перечислены основные требования для современной модели при исследовании данного явления. На основании анализа рассмотренных литературных источников автором сделан вывод, что для математического моделирования термобара в глубоком озере требуется

особый подход, при котором важно учитывать ряд физических факторов, по существу отражающих специфику явления.

Вторая глава диссертации посвящена физической и математической постановке задачи для моделирования явления термобара в глубоководном озере. Двумерная негидростатическая модель, записанная в приближении Буссинеска, содержит уравнения неразрывности, количества движения, энергии, а также уравнения баланса солёности и концентрации загрязняющих веществ. Для турбулентного замыкания системы используется дифференциальная двухпараметрическая модель.

В третьей главе представлен численный метод решения задачи. Решение уравнения конвекции–диффузии основано на методе конечных объёмов, который обеспечивает выполнение интегральных законов сохранения. Для аппроксимации нестационарных уравнений автор работы применяет разностную схему Кранка – Николсона второго порядка точности. Конвективные слагаемые аппроксимированы схемой второго порядка точности на основе противопотоковой квадратичной интерполяции QUICK Леонарда. Автором предложена оригинальная процедура для согласования поля скорости и давления, для течений с плавучестью, представляющая собой модификацию известного метода SIMPLE Патанкара и Сполдинга. Показано, что авторский алгоритм позволяет сократить общее время вычислений за счёт увеличения шага по времени.

В четвертой главе проводится исследование термобара в канадском озере Камлупс. Сравнивается  $k-\omega$  модель турбулентности с алгебраической моделью Холланда. На основе расчётов автор делает вывод, что  $k-\omega$  модель турбулентности воспроизводит более сложную структуру течений, связанную с формированием локальной приповерхностной циркуляции в термоактивной области, которая влияет на скорость горизонтального перемещения фронта термобара. Моделирование гидродинамических сценариев «зима», «ранняя весна», «середина весны», «поздняя весна» в

озере Камлупс показывает хорошее качественное согласование с описаниями натуральных наблюдений Кармака и др.

Пятая глава посвящена моделированию термобара в озере Байкал. При этом в разработанной комплексной модели учитываются реальные данные рельефа дна, метеорологических условий и характеристик минерализации озера Байкал и реки Селенги. По мере прогрева озера фронт термобара смещается в центр озера. Автор установил, что переменный тепловой поток и ветровое трение существенно влияют на характер эволюции термобара.

Основные результаты диссертации отражены в 23 научных работах, в том числе 3 статьи опубликованы журналах, включенных в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций».

Положения, выносимые на защиту отчетливо сформулированы. Результаты работы апробированы на семинарах и конференциях, достаточно полно отражены в публикациях. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается обоснованностью выбранных математических моделей и численных алгоритмов, сравнением с известными из литературы теоретическими и экспериментальными результатами других авторов.

По содержанию работы имеются замечания.

1. Обзорная часть работы (гл.1) несоразмерно велика по объему (свыше 30 страниц текста). Отражая сложности проблемы и полученные ранее результаты, автору следовало бы ограничить объем вводной части, уделяя больше внимания изложению собственных исследований.

2. Учет криволинейности области за счет подводного склона осуществляется автором с помощью т.н. метода блокировки фиктивных областей путем увеличения коэффициентов вязкости (с.70 диссертации). К каким приграничным эффектам приводит данный прием в полях

температуры, солености, примеси в работе не указывается. На используемых разнесенных сетках блокировка одного скоростного узла будет влиять на два смежных значения в температуре. Можно предположить, что вследствие этого в приграничных узлах возникнет схемный дисбаланс с формированием неинтерпретируемых источников/стоков субстанции. В этой связи было бы целесообразнее воспользоваться классическим методом фиктивных областей (см., например, Марчук, Вабищевич), в котором уравнения модели доопределяются специальными условиями ее продолжения в фиктивных областях.

3. В гл.5 при описании термобара в оз. Байкал автор от сравнительно сложной модели турбулентности (2.10)-(2.11) переходит к более примитивной с аппроксимацией коэффициентов обмена по формуле Обухова (с.112 диссертации). При этом предполагается равенство коэффициентов турбулентности в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это предположение физически противоречиво, т.к. формула Обухова описывает генерацию турбулентности за счет вертикального сдвига скорости и вариаций плотности по глубине. Оба этих фактора отсутствуют в проекции на горизонталь, поэтому предположение  $K_x=K_y$  в данном случае неприемлемо.

Данные замечания не снижают положительную в целом оценку диссертации и их можно рассматривать в качестве пожеланий для совершенствования работы.

### **Заключение**

Диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным автором на высоком научном уровне. В работе представлены научные результаты, позволяющие квалифицировать их как решение научной задачи, имеющей важное народнохозяйственное значение и направленной на исследование сложных термогидродинамических процессов в озёрах умеренных широт.

Считаю, что диссертационная работа Цыденова Баира Олеговича «Численное моделирование эффекта весеннего термобара в глубоком озере» соответствует критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г. Автор диссертации, Цыденов Б. О. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент  
доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник  
ФГБНУ Институт водных и экологических проблем СО РАН  
630090, г. Новосибирск, Морской пр., д. 2, к. 417  
Тел.: (383)3308484  
E-mail: slav@iwep.nsc.ru



В.А. Шлычков

Подпись Шлыčkова В.А. заверяю  
ученый секретарь Института водных  
и экологических проблем СО РАН,  
к.ф.-м.н.



Д.Н.Трошкин



28.04.2014