С.С. Зенченко ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛЕНКИ ВОДЫ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ТЕПЛОМАССООБМЕНА НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА «ВОДА – ВОЗДУХ»

Объект и цель научной работы. Объект работы – поверхностная пленка воды на границе раздела «вода – воздух». Цель – изучение в контролируемых условиях динамики аномального образования при вариации тепломассообмена.

Материалы и методы. Применены тепловизионные средства контроля микромасштабных изменений, а также контактные средства измерения температуры и влажности. Обеспечена изменчивость соотношения температуры воды и воздуха, а также испарения с поверхности.

Основные результаты. Получены данные о величине и размерах поля температуры, их временной изменчивости, связи с конвективными проявлениями и нарушением устойчивости, а также о синхронности вариаций состояния приводного слоя воздуха. Выявлены закономерности поведения границы раздела.

Заключение. Получены количественные оценки состояния и определены условия их проявления, необходимые для учета климатических и экологических изменений при формировании облика экологически чистых гражданских судов. Обозначенная модель обеспечивает прогнозирование практических параметров среды.

Ключевые слова: поверхностная пленка воды, граница раздела «вода – воздух», тепломассообмен, тепловизионная аппаратура, пространственно-временная изменчивость, температура воды, температура воздуха, микромасштабные изменения, конвекция.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

Для цитирования: Зенченко С.С. Исследование динамики поверхностной пленки воды при различных условиях тепломассообмена на границе раздела «вода – воздух». Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 2(384): 112–120.

УДК 536.24(204)

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-112-120

S. Zenchenko

Krylov State Research Centre, St. Petersburg, Russia

DYNAMIC STUDIES OF SURFACE WATER FILM IN DIFFERENT HEAT & MASS EXCHANGE CONDITIONS AT WATER-AIR BOUNDARY

Object and purpose of research. This paper studies surface water film at water-air boundary. The purpose is to investigate, in controllable conditions, the dynamics of an abnormal formation in case of heat & mass exchange variation.

Materials and methods. Micro-scale changes were monitored by infrared imagery, as well as by contact instrumentation for temperature and humidity measurements. The study was performed for varying ratio of water and air temperature, as well as for various ratios between water temperature and evaporation rate.

Main results. The data were obtained on magnitude and size of temperature field, their variation in time, their correlation with convective phenomena and stability violations, as well as on synchronous variations of boundary air layer condition. The study also yielded behavior laws for the air-water boundary.

Conclusion. The study yielded quantitative estimates of air-water boundary state, as well as the conditions in which they take place. These data are necessary to take into account climatic and environmental changes in development of green ships. This model ensures predictions of practical parameters for the medium.

Key words: surface water film, air-water boundary, heat and mass exchange, heat imagery equipment, space-time variability, water temperature, air temperature, micro-scale changes, convection.

Author declares lack of the possible conflicts of interests.

For citations: Zenchenko S. Dynamic studies of surface water film in different heat & mass exchange conditions at water-air boundary. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 2(384): 112–120 (in Russian).

UDC 536.24(204)

Состояние вопроса

State of the art

45 лет назад в ФГУП «Крыловский государственный научный центр» было образовано гидрофизическое направление. С этого момента одним из звеньев данного направления стало изучение поля температуры свободной поверхности как индикатора проявления гидродинамических возмущений на глубинных горизонтах при эксплуатации морского транспорта и как информативной области для решения задач ВМФ. Кроме того, с этим полем в перспективе были связаны проблемы экологического аспекта, а также вопросы метрологического обеспечения измерений и применения дистанционных средств контроля поля. К началу изучения свойств упомянутого физического параметра существовали отечественные опытные образцы ИК-аппаратуры (радиометры), которые и стали базовым инструментом измерений. Основанием для этого явились первые исследования в области формирования температурного режима на границе раздела «вода – воздух» [1–3]. Было введено определение, в соответствии с которым на границе раздела образовывался аномальный по температуре слой воды, названный поверхностной пленкой воды (ППВ). По данным указанных источников, максимальный отрицательный перепад температуры ППВ составлял до 1 °C, а перепад предполагаемых толщин – несколько миллиметров. На основании этих фактов были разработаны методики и устройства для измерения перепада температуры в ППВ в полунатурных и натурных условиях [4-6] применительно к использованию ИК радиометрической аппаратуры. С ее помощью (рис. 1) контролировалось тепловое излучение, которое формируется в тонком эффективном излучающем слое, составляющем десятки микрон, в зависимости от используемого ИКдиапазона, и поэтому непосредственно находящемся в пределах исследуемой ППВ.

Позже этот опыт был опробован и тщательно отработан в условиях полунатурного стенда (открытого опытового бассейна), а затем использован в натурных условиях различных регионов Черного, Баренцева морей и Атлантического океана. СледуDOI: 10.24937/2542-2324-2018-2-384-112-120

ющим этапом изучения свойств границы раздела двух сред должно было стать развитие исследований в обоснование микромасштабных процессов, сопровождавших изменчивость в тонких приповерхностных слоях. Несомненно, что данная проблема оказалась актуальной и для организаций, связанных с океанологическими измерениями, гидрометеорологией, экологией, изучающих климат над океаном и т.п. По этой причине, несколько опередив остальных, вышли классические работы [7, 8] по конвекции ППВ, на продолжительное время закрывшие проблему. Ввиду сильной изменчивости в реальных условиях составляющих тепломассообмена (турбулентный обмен с атмосферой, длинноволновое излучение и испарение с поверхности), связанных, в свою очередь, с волнением, ветровой нагрузкой, влиянием излучения небосвода с различной облачностью и солнечным нагревом поверхности, целесообразность изучения этих процессов в строго контролируемых условиях не вызывала сомнения. При этом нестационарное случайное воздействие выше названных факторов в модельных условиях заменяется по возможности варьированием конечного температурного состояния двух субстанций - воды и воздуха.



Рис. 1. Формирование поверхностной пленки воды на границе раздела «вода – воздух»

Fig. 1. Generation of surface water film at water-air boundary

По результатам предшествующих исследований холодная аномальная область является неустойчивой и удерживается на поверхности с помощью сил поверхностного натяжения. При достижении своих критических параметров происходит разрушение ППВ и аномальный температурный слой исчезает.

Цель работы и концепция исследований

Purpose of work and concept of study

Упомянутые ранее работы были проведены с использованием контактных датчиков, обеспечивающих многоточечные измерения. При этом моделировались условия, типичные для образования холодной ППВ, поскольку морская среда в основном отдает тепло в процессе тепломассообмена. В ряду таких условий, прежде всего, отметим соотношение температур воздуха (T_a) и воды (T_B), отсчитываемых на условно достаточном расстоянии от границы раздела и определяемых по терминологии гидрофизики как уровни квазиизотермического распределения температуры. Условию образования холодной ППВ отвечает соотношение $T_a < T_B$. Однако в данных исследованиях почти не уделено внимания соотношению $T_a > T_B$: условия $T_a > T_B$ реально наблюдаются в регионах Черного и Баренцева морей, поэтому это направление исследований оказалось нереализованным. Следующей нерешенной проблемой явилось влияние микромасштабных изменений на картину поля температуры в существенно больших масштабах. Вполне очевидно, что уровень или глубина проникновения в физику микромасштабных процессов оказались зависимыми от технических возможностей.

Например, развитие и применение современной ИК-тепловизионной техники в смежных отраслях (медицина, биология и т.п.) позволяют существенно расширить возможности изучения процессов в области микромасштабных проявлений, получая трехмерные картины. На основании вышеизложенного в настоящей работе представлены результаты тепловизионных исследований для всех упомянутых ранее соотношений температуры воды и воздуха в диапазоне ИК-спектра 8-12 мкм, обеспечивающего контроль микромасштабных изменений в пределах эффективного излучающего слоя, равного 20 мкм. С учетом всей сложности тонкого эксперимента тщательное внимание уделялось методике, позволяющей искусственным образом влиять на баланс сил тяжести и поверхностного натяжения. Последнее обеспечивалось путем создания горизонтальных течений на поверхности за счет волнения, нагрева или

охлаждения либо барботирования поверхности изнутри жидкости возмущением механического локального воздействия, создающего вертикальные движения жидкости, переходящие в горизонтальные поверхностные течения. Это, в свою очередь, предполагало использование дозированного, ограниченного по масштабам, времени и интенсивности регулируемого воздействия на ППВ, чтобы иметь возможность наблюдать отклик этой системы на возмущение. Одновременно масштабы горизонтальных и вертикальных возмущений должны обеспечивать ограниченное по времени воздействие, максимальную повторяемость экспериментов и не нарушать всей вертикальной структуры на границе раздела «вода – воздух» и в масштабе объема всей водной среды условий эксперимента. Кроме того, контролируемые и постоянные во времени внешние условия позволяли при исследовании от эксперимента к эксперименту добиться контролируемого воздействия на процесс испарения с поверхности, например, с помощью ее ветрового обдува. При этом можно считать оправданным выбор диапазона скоростей ветра 0,3-0,5 м/с, обеспечивающего создание гравитационно-капиллярных волн, свойства которых связаны с силами поверхностного натяжения. Также с целью исследования особенностей искусственного влияния на баланс сил поверхностного натяжения и сил тяжести с помощью механического волнопродуктора генерировалось поверхностное волнение в гравитационно-капиллярном диапазоне волн с амплитудой 2-3 мм и длиной волны 10-12 мм.

Воплощение намеченной концепции исследований осуществлялось в бассейне с размерами 150×370×400 мм (рис. 2, см. вклейку). Сам бассейн был теплоизолирован со всех боковых сторон и дна пенопластом, чтобы исключить дополнительные потери тепла через конструкции бассейна. В бассейне устанавливались клинообразный механический волнопродуктор и волногаситель. Над поверхностью размещался вентилятор. На дно бассейна устанавливался акустический излучатель, обеспечивающий особый режим возмущения поверхности путем ее барботирования. При мощности излучателя 20 Вт и диаметре мембраны излучателя 6 см расчет по известной формуле (1) дает предполагаемый подъем воды на 1 мм вследствие звукового давления в зоне максимума лепестка диаграммы направленности излучателя:

$$h = 2P/(S\rho gc), \tag{1}$$

где *h* – высота подъема жидкости в зоне основного лепестка диаграммы направленности; *P* – мощность

излучения; *S* – площадь излучателя; ρ – плотность воды; *g* – ускорение свободного падения; *с* – скорость света.

Такой тарированный подъем нижних подповерхностных слоев на 1 мм к поверхности обеспечивал изменение температуры в аномальном слое, которое фиксировалось по тепловизору, а знак и уровень контраста позволяли делать выводы о состоянии ППВ.

Еще одно важное обстоятельство принято во внимание, связанное с тем, что в формировании свойств границы раздела задействованы две субстанции вода и воздух. Определяющим откликом на искусственные изменения внешних условий является испарение с поверхности. Поэтому напрашивалась необходимость контроля состояния приводного слоя воздуха, как неотъемлемой и составной части системы «вода – воздух». Существующие исследования изменений температуры в приводном слое атмосферы (воздуха) установили [9], что наиболее информативным являются приводные слои, удаленные от поверхности на 2-3 мм. Кроме того, температура приводного слоя воздуха является вторичным параметром, реагирующим на изменение влажности воздуха, под действием естественных и искусственных манипуляций состояния поверхностного слоя. С целью контроля состояния влажности использован термогигрометр (рис. 2), обеспечивающий на удалении от поверхности 2-3 мм контроль изменения относительной влажности, а также дополнительно температуры воздуха и температуры точки росы. Одновременно с помощью другого гигрометра контролировалась влажность воздуха на удалении от поверхности по показаниям сухого и влажного термометров, а температура основной массы воды измерялась на удалении от поверхности. На основании совместных данных определялся уровень дефицита влажности в приводном слое воздуха в различных условиях соотношений состояний температуры воды и воздуха.

Основные характеристики используемой аппаратуры

Main parameters of test equipment

ИК-тепловизор: спектральный диапазон – 8– 12 мкм; температурная калибровка – от –20 до 80 °С; детектор охлаждаемый по замкнутому циклу Стирлинга; матрица – 640×512 пикселей; максимальная частота кадров – 115 Гц; чувствительность – 0,03 °С. Измеритель влажности – термогигрометр точечный многоканальный: относительная влажность воздуха – 10–100 %, чувствительность – 0,1 %; температура воздуха – от –60 до +60 °C, чувствительность – 0,1 °C; точка росы – от –60 до +60 °C, чувствительность – 0,1 °C; рабочий диапазон температур – от –20 до +50 °C.

Гигрометр психометрический ВИТ-1: относительная влажность воздуха –10–100 %; показания сухого и смоченного термометров – 20–40 °C; точность определения температуры – 0,1 °C.

Основные результаты исследований

Main results of studies

При моделировании холодной ППВ создавалось соотношение $T_a < T_B$ ($T_a = 28^\circ$; $T_B = 31,3-34,6^\circ$ C). Пространственное изменение температуры регистрировалось с помощью тепловизора с частотой кадра 100 Гц. На рис. 3–6 (см. вклейку) приведены тепловизионные фрагменты изменений температуры поверхности воды в указанных условиях. Анализ этих данных позволил определить следующую динамику микромасштабных изменений поля температуры.

В начальный период значительного различия состояний воды и воздуха наблюдались холодные и теплые области, каждая из которых окружена по периметру полосами жидкости более низкого значения температуры, чем температура в центрах каждой области. Одновременно в масштабах всей площади бассейна на поверхности существовал один ярко выраженный вихрь (рис. 3, см. вклейку), в котором заметно круговое движение тепловых потоков по часовой стрелке. Одновременно вся картина имела общее круговое вращение по часовой стрелке. Максимальная скорость перемещения составляла 10 мм/с. По мере проходящего теплообмена и выравнивая температур двух сред скорость вращения уменьшалась до 3 мм/с. Тепловые области видоизменялись со временем, причем более теплые области быстрее увеличивались в размерах, сжимая более холодные. Первоначальное количество теплых зон примерно в 2 раза превосходило число холодных областей (например, 25 к 10). Линейные поперечные размеры теплых зон изменялись в интервале 20-100 мм, а размеры холодных не превышали 50 мм. Характерной особенностью динамики наблюдаемой картины поля является вырождение крупного вихря и зарождение более мелких вихрей. Вначале крупный вихрь преобразовался в 7 новых, меньших по диаметру, вращающихся вихрей (рис. 3) с более холодной температурой в их спиралеобразных центрах. Наблюдаются изолинии, соединяющие окантовочные полосы с вращающимися центрами. Теплые области расширяются не безгранично, постепенно превращаются в более холодные с уменьшением своих размеров. Соотношение теплых и холодных областей постепенно выравнивается. Наблюдаются фрагменты схлопывания с образованием волн (тумана или радиационного тумана), после которого происходит инверсия по размерам и знаку теплых областей. Скорость таких волн составляет 50 мм/с. С увеличением времени жизни врашение всей картины и в центрах замедляется, происходит преобразования центров в еще более мелкие центры, уменьшается общее количество зон и их преобразование в крупные зоны с ярко выраженными фронтами и изрезанными линиями между зонами. Это можно считать завершающей стадией некоторого временного этапа, занимающего примерно 5 минут. Данный этап связан с дальнейшим выравниванием разности температуры воды и воздуха. По истечении этого периода картина повторяется с образованием теплых и холодных зон, вихревых центров и т.п. На новом этапе скорость всех процессов выражена менее ярко, чем на первом. Технические возможности эксперимента позволяли наблюдать 3 цикла повторения процессов на поверхности в течение 20 минут регистрации.

Полученный объем информации позволил выявить некоторые физические процессы в ППВ. В рассматриваемом случае на поверхности находятся области воды, которая холоднее, чем в нижележащих слоях. Эти области, будучи более тяжелыми, удерживаются на поверхности за счет поверхностного натяжения. На поверхности существуют течения жидкости, обусловленные движением внутрь воды, но силы поверхностного натяжения мобилизуют эти течения в пределах каждой области, течение жидкости происходит от центра каждой области к краям. Тонкие полосы, обхватывающие области по периметру, в горизонтальной плоскости достигают не более 1-3 мм и представляют собой каналы, по которым осуществляется отток холодной воды от центра к периферии и вглубь жидкости. Контрольные сечения, нанесенные на термограммы, позволяют зафиксировать повышенную флуктуацию сигнала на границах зон. Они свидетельствуют о существовании таких оттоков жидкости. Одновременно эти каналы являются транспортными артериями для оттока жидкости в вихревые крупные центры, из которых идет более

интенсивный отток вглубь основной жидкости. По мере достижения критической по весу массы происходит инверсия, как зон, так и вихревых областей. По всей видимости, вихревые центры играют роль эпицентров, определяющих результирующие силы на всей площади поверхности бассейна с учетом взаимодействия внутри каждой области, между областями и с учетом областей между вихрями. Поэтому места расположения главного вихря и последующих вихрей имеют свои координаты, определяемые условно эпюрой суммарного распределения всех сил на поверхности. Вместе с изменением количества областей меняются координаты места положения вихрей. По мере исчезновения главного вихря местом образования новых вихрей становятся места наибольшего сосредоточения, скопления и пересечения нескольких смежных областей, где в процессе оттока образовались очередные по весу массы жидкости. Появление волн и схлопывания связано с резким опрокидыванием и потерей устойчивости зон и вихрей, а также образованием новых более легких областей на их месте. Постепенное увеличение размеров теплых зон является следствием конвекции, в результате действия которой холодные массы погружаются по краям зон и более теплые массы поднимаются в центре. По мере подъема этих масс происходит испарение и обмен теплом с воздухом, поэтому температура внутри теплой зоны начинает понижаться с ростом объема (по толщине и площади) и, следовательно, веса охлажденной воды. Ввиду такого увеличения веса можно ожидать потерю устойчивости этого слоя на поверхности и стекание внутрь жидкости.

Наблюдаемую цикличность повторения всей картины изменений на водной поверхности можно связать с образованием в конце каждого цикла некоторого оптимально устойчивого состояния температуры в пределах большой площади поверхности. Оно заканчивалось наличием всего 2-3 больших областей с равномерным распределением температуры в каждой области. При этом области разделены ярко выраженными фронтами, постепенно перестраивающимися в тонкие менее выраженные линии. В дальнейшем эти зоны охлаждаются менее интенсивно, поскольку выравнивается баланс сил между водой и воздухом. Повторение всей динамики и картины на поверхности происходит с меньшими значениями температуры и меньшей энергией перемещений, а также с увеличением временных затрат на эти процессы. Продолжительное удержание на поверхности аномальных областей и их эволюция подтверждает важность роли поверхностного натяжения и существование первоначально термокапиллярной конвекции. Она мобилизует и концентрирует течения жидкости в пределах каждой области, вихрей до накопления критической массы и подготавливает поверхность к последующему изменению своего состояния. После этого наблюдается инверсия и исчезновение областей вследствие наступления термогравитационной конвекции.

Проведенные оценки числа Марангони (2) для термокапиллярной конвекции для горизонтального размера ячейки, за который принята линия стока в 1 мм, и при значении разности температур 0,6 °С, дали расчетное значение $M_a = 155$. Это согласуется с оценками других авторов, указывающих диапазон изменения 120–150.

$$M_{\rm a} = \Delta \sigma r / (\rho \nu \kappa), \tag{2}$$

где $\Delta \sigma$ – изменение коэффициента поверхностного натяжения вдоль поверхности жидкости; *r* – радиус ячейки, возникающей на поверхности; ρ – плотность; ν – кинематический коэффициент вязкости; κ – коэффициент температуропроводности.

Одновременно оценки значений числа Рэлея (3) при наступлении неустойчивости ППВ и ее разрушении для слоя толщиной 20 мкм с перепадом температуры в 1 °С и при молекулярном значении коэффициента температуропроводности соответствовали значению, равному 60. Это согласуется с данными [7, 8] контактных измерений температуры на участках с линейным профилем температуры по глубине и его разрушением вследствие вынужденной конвекции.

$$Ra = \Delta T (\rho_0 \alpha) g V / (k \rho_1 \nu), \qquad (3)$$

где ρ_0 – начальная плотность воды (при температуре T_1); ρ_1 – конечная ее плотность (при температуре T_2); α – изобарический коэффициент теплового расширения; g – ускорение свободного падения тела; v – кинематический коэффициент вязкости; κ – коэффициент температуропроводности; $\Delta T = (T_2 - T_1)$ – разность температур; V – выделенный единичный объем жидкости. Критические значения числа Рэлея, при которых, по данным измерений, наблюдалось исчезновение областей, составляли $R_{\rm акр} = 64; 69; 88.$

В случае другого состояния границы раздела, при $T_a > T_B$ ($T_a = 24-25$ °C; $T_B = 19-20$ °C), распределение температуры (рис. 4*a*, см. вклейку) по всей площади бассейна оказалось почти равномерным (максимальная разница температур по всей площади находилась в диапазоне ±0,1 °C). В пределах осреднения всей контролируемой площади поверхности отмечаются две постоянные области с одинаковым плавным максимальным превышением температуры до 0,1 °C, которые на всем пространственном и временном протяжении сохраняют свои свойства без изменения при отсутствии каких-либо дополнительных внешних факторов. В этом случае, на первый взгляд, мы имеем дело с классическим распределением температуры (рис. 1), когда нижние слои воды - холодные, а вследствие более высокой температуры воздуха происходит плавное увеличение температуры в приповерхностных слоях. Это должно соответствовать образованию так называемой теплой ППВ. Данное предположение нельзя ни подтвердить, ни опровергнуть после экспериментов с акустическим барботированием поверхности, обдува поверхности и контроля влажности в приводном слое воздуха.

На рис. 4б (см. вклейку) показан пример изменений, вносимых акустическим воздействием на поверхность при $T_a < T_B$. Наличие аномального, более холодного, по сравнению с основной массой, слоя воды у поверхности приводит к появлению положительного сигнала ИК-тепловизора. Максимальные величины сигнала не превышали 1 °C. Возможности точного контроля значения температуры в 20 мкм слое до и после барботирования и сопоставление этих значений с величиной T_B на удалении от поверхности показали, что толщины ППВ составляли не менее 3 мм.

Аналогичного рода измерения при $T_a > T_B$ в большинстве случаев не выявили влияния барботирования, поскольку изменений температуры не наблюдалось. В отдельных случаях небольшие контрасты не превышали 0,1 °С и сигналы соответствовали более низкой температуре на глубине 1 мм по сравнению с температурой воды на удалении от поверхности.

Эти эксперименты позволили предположить наличие двух состояний при $T_a > T_B$: в первом случае – отсутствие изменений температуры с глубинных горизонтов до самой поверхности (изотермическое распределение температуры); во втором – наличие у поверхности более холодного слоя воды, чем основная масса воды (в этом случае наблюдается несоответствие предполагаемому классическому распределению температуры, поскольку нет оснований для существования теплой ППВ).

Проведенные эксперименты с применением акустического поля позволили дополнительно установить закономерности восстановления первоначального состояния после прекращения действия возмущений. Так, для устойчивого состояния поверхностных слоев время релаксации не превышало 50–60 с. Для холодной ППВ время релаксации оказалось больше как минимум в 2–2,5 раза. В нескольких случаях не удалось зафиксировать процесс восстановления до первоначального уровня. В одном случае время составило около 15 минут.

Ветровой обдув для условий $T_a < T_B$ приводил к резкому образованию области с понижающейся во времени температурой, превышающей площадь обдува. При этом все области, ранее присутствовавшие на поверхности и охваченные ветровым потоком, почти мгновенно исчезли. Время релаксации оказалось практически неограниченным, поскольку не удавалось прийти к состоянию, точно соответствующему моменту до обдува поверхности. Для условий устойчивого состояния поверхности $T_a > T_B$ (рис. 5, см. вклейку) образуются резкие области, четко ограниченные линиями стока в пределах площади обдува. Прекращение обдува приводит к быстрому началу восстановления свойств поверхности. На рис. 56 показаны количественные оценки изменений температуры поверхности при обдуве, где можно наглядно фиксировать время релаксации температурного поля поверхности. По данным многочисленных измерений, диапазон времени релаксации составил 50-80 с.

Анализ контроля влажности для обоих состояний поверхности и ППВ показал, что при $T_a < T_B$ (рис. 6а, см. вклейку) наблюдается наличие резких и кратковременных выбросов влажности, на 20-30 % превышающих средний уровень влажности в приводном слое. Эти выбросы можно отнести к моментам схлопывания и инверсии неустойчивых областей с образованием выбросов пара. Для условий $T_a > T_B$ (рис. 66, см. вклейку) наблюдаются продолжительные, характерные для крупных аномалий, изменения влажности в тех же пределах отклонения от среднего уровня, что и в ранее рассмотренных случаях. Следует отметить, что для обоих сравниваемых случаев при измерениях в условиях одного состояния влажности воздуха над поверхностью воды насыщение в тонком приводном слое влагой различно.

Для $T_a < T_B$, при условии большего в 2 раза дефицита влажности, уровень насыщения (среднее значение) не превышает 30 %. Для противоположного случая, при меньшем дефиците влажности, он достигает 40 %. Это обстоятельство позволяет заключить, что затраты тепла на испарение для холодной пленки больше, но происходит его перераспределение на процессы термокапиллярной горизонтальной изменчивости температуры всей водной поверхности. В моменты инверсии состояния ППВ происходят резкие прорывы и выбросы влаги до уровня, соответствующего значению дефицита системы «вода – воздух». В другом случае наблюдается в основном свободный процесс испарения и обмен теплом по всей площади водной акватории.

Исследование теплового поля поверхности, возбуждаемой волнением, выполнялось для условий $T_{\rm a} > T_{\rm B}$ с применением предварительного акустического возмущения, причем в одних случаях не было выявлено неравномерности температуры на поверхности, а в других произошло небольшое изменение до 0.1 °С. Предполагалось, что в зависимости от амплитуды генерируемой волны будет производиться подъем массы воды с глубины, равной полуамплитуде волны. При создаваемой волне с амплитудой 2-3 мм должно наблюдаться изменение температуры, равное величине перепада температуры в ППВ. В соответствии с данными измерений в некоторых экспериментах изменений зарегистрировано не было. При этом наличие неровности поверхности можно было подтвердить, используя наклонное зондирование поверхности, при котором существенно влияние отраженного от неровностей поверхности теплового излучения окружающей обстановки. Во втором случае сигнал тепловизора промодулирован с частотой волнения (период 10-20 мм), а амплитуда составила всего ±0,1 °C, подтвердив наши предположения и предварительные экспериментальные оценки.

Весь представленный выше комплекс исследований, несмотря на большое число отдельных экспериментов, являлся необходимым и достаточным для того, чтобы определить некоторую феноменологическую модель границы раздела «вода – воздух». Для полной ясности не хватает лишь данных о поведении приводного слоя воздуха при вариациях испарения с поверхности. Возможности термогигрометра, как упоминалось ранее, позволяли кроме влажности измерить одновременно температуру и точку росы. На рис. 7 (см. вклейку) представлены фрагменты изменения этих параметров вследствие ветрового обдува при различных условиях. Они показывают, что при всех условиях влажность воздуха резко падает до состояния той массы воздуха, которая попадает в приводный слой. Температура T_a и влажность воздуха во всех моделируемых условиях были примерно одинаковыми. Сама температура воздуха, вносимого обдувом, была холодней в слое 2-3 мм для $T_a < T_B$, что согласовывалось с показаниями датчика температуры. Рис. 2. Экспериментальная установка и устройства, примененные для исследования:

- 1 бассейн; 2 ИК-тепловизор; 3 излучатель;
- 4 плунжерный волнопродуктор; 5 волногаситель;
- 6 вентилятор; 7 термогигрометр
- **Fig. 2.** Test facility and equipment: 1 test tank; 2 infrared imager; 3 emitter; 4 plunger-based wavemaker; 5 wave absorber;
- 6 fan; 7 thermohygrometer





Рис. 3. Фрагменты эволюции вихревых структур температурного поля одиночного вихря (a) до группы вихрей (б) Fig. 3. Fragments of eddy evolution in the temperature field from a single eddy (a) to a group of eddies (b)



Рис. 4. Картина пространственного изменения поля температуры при условиях $T_a > T_a$ (*a*) и изменения температуры поверхности в результате акустического барботирования при $T_a < T_a$ (*b*)

Fig. 4. Spatial variations in the temperature field at $T_a > T_a$ (a) and surface temperature changes due to acoustic barbotage at $T_a < T_a$ (b)



Рис. 5. Картина поля температуры в пределах площади обдува (*a*) и количественные оценки изменения температуры и времени релаксации (*б*)

Fig. 5. Temperature field within the blowing area (a) and quantitative assessments of fluctuations in temperature and relaxation time (b)



Рис. 6. Изменения влажности (запись 1) в приводном слое воздуха для условий $T_a < T_B(a)$ и $T_a > T_B(b)$ **Fig. 6.** Humidity variations (Record 1) in the boundary air layer at $T_a < T_B(a)$ and $T_a > T_B(b)$



Рис. 7. Контроль изменений влажности (запись 1), температуры воздуха (запись 2) и температуры точки росы (запись 3) при ветровом обдуве поверхности для условий $T_a < T_{_B}(a)$ и $T_a > T_{_B}(b)$

Fig. 7. Monitoring of changes in humidity (Record 1), air temperature (Record 2) and dew point temperature (Record 3) during wind blowing of surface at $T_a < T_s$ (a) and $T_a > T_s$ (b)



Для условий $T_a > T_B$ вдуваемый воздух являлся более теплым, что соответствовало показаниям датчика. Во всех рассматриваемых случаях точка росы была ниже температуры воздуха, поэтому эксперименты сопровождались испарением влаги с поверхности; дополнительно это подтверждено сравнением по дефициту влажности на основании измерений температуры поверхности воды, состояний воздуха по показаниям сухого и влажного термометров.

Таким образом, полученные в результате исследования данные позволяют рассматривать некоторую модель границы раздела «вода – воздух» (рис. 8). При $T_{\rm a} < T_{\rm B}$ имеем распределение температуры от T_a (на удалении), увеличивающееся по мере приближения к поверхности. Со стороны водной поверхности присутствует охлажденный слой относительно температуры Т_в на удалении от поверхности. Точка отсчета со стороны воздуха 1 соответствует контролю термогигрометром на расстоянии 2-3 мм от поверхности. Для воды точка 1 – слой 20 мкм, контролируемый тепловизором. При обдуве происходит охлаждение воздуха и переход в точку 1'. Для воды идет разрушение пленки, утолщение приповерхностного слоя с опусканием вглубь масс воды и охлаждение в слое 20 мкм с переходом из точки 1 в точку 1'.

Для условий $T_a > T_B$ предлагаются два варианта. В первом варианте есть охлажденный с малыми перепадами температуры слой. При охлаждении из состояния точки *I* в воздухе происходит изменение до профиля с более высокой температурой *I'*. В воде – дополнительное понижение температуры холодного слоя и переход из точки *I* в точку *I'*. Для второго варианта характерно отсутствие аномального изменения в приповерхностных слоях и полная изотермия до поверхности. При обдуве более теплым воздухом идет повышение температуры на уровне 2-3 мм от поверхности и переход из точки *I* в точку *I'*. Со стороны водной массы наблюдается похолодание поверхности и появление более холодного слоя у поверхности, соответствующее переходу из точки *1* в 20 мкм слое в точку *1*' с более низкой температурой.

Сопоставление размеров линий оттока (1–3 мм) и размеров областей с теплой и холодной температурой (20–100 мм), а также количество таких аномалий (до 25) позволяют условно говорить о возможных масштабах распространения микромасштабных процессов и последствий их проявления. Порядок отношений – не менее 10³.

Заключение

Conclusion

В результате экспериментальных исследований определены характеристики и особенности динамики ППВ в различных условиях, а также экспериментально установлено последовательное проявление термокапиллярной и термогравитационной конвекции при формировании холодной ППВ. Найдены условия усиленного проявления поля температуры и слабых изменений температуры, имеющие важное практическое применение. Сформулированы положения модели границы раздела «вода – воздух».

Библиографический список

References

- Häusler W. Über die Temperaturprofile beiderseits einer verdunstenden Wasseroberflache. Wiss. Leitschrift Tech. Hochschule. 1955–1956. H. 5. S. 435–450.
- McAlister E.D., McLeish W.A. Radiometric system for airborne measurement of the total heat from the sea // Appl. Opt. 1970; 9(12): 2697–705.
- Saunders P.M. Radiance of sea and sky in the infrared window 800–1200 cm // J. Opt. Soc. America. 1968; 5(58): 645–52.
- 4. Зенченко С.С., Гончаров В.К., Мельников Г.С. Способ определения перепадов температуры в поверхност-

ной пленке воды. Авторское свидетельство $N_{21132670.1984.}$ [S. Zenchenko, V. Goncharov, G. Melnikov. Determination method for temperature fluctuations in the surface water film. Author's Certificate No. 1132670. 1984. (in Russian)].

- 5. Зенченко С.С., Мельников Г.С., Поварков В.И., Самков В.М. Экспериментальные исследования зависимости теплового излучения взволнованной водной поверхности от угла наблюдения // Оптические методы изучения океанов и внутренних водоемов. Тезисы докладов. Таллин. 1980. С. 40–45. [S. Zenchenko, G. Melnikov, V. Povarkov, V. Samkov. Experimental studies of heat emission from wavy water surface at different viewing angles // Optical investigation methods for oceans and inland water reservoirs. Theses of papers. Tallin, 1980. P. 40–45. (in Russian)].
- 6. Зенченко С.С., Иванов Г.Н., Гончаров В.К., Копеецкий В.А., Попов С.И., Алексеев Н.Н., Мельников Г.С. Имитатор температурных контрастов. Авторское свидетельство № 162327. 1981. [S. Zenchenko, G. Ivanov, V. Goncharov, V. Kopeetsky, S. Popov, N. Alexeev, G. Melnikov. Simulator of temperature contrasts. Author's Certificate No. 162327. 1981. (in Russian)].
- 7. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Федоров К.Н. Тонкая структура термического пограничного слоя в воде у поверхности раздела вода-воздух // Известия АН СССР. ФАО. 1977. Т. 13. № 12. С. 1268–1277. [A. Ginzburg, A. Zatsepin, K. Fyodorov. Thin structure of thermal water layer near water-air boundary // Russian Academy

of Sciences. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 1977. Vol. 13. No. 12. P. 1268–1277. (*in Russian*)].

- Гинзбург А.И., Федоров К.Н. Охлаждение воды с поверхности при свободной и вынужденной конвекции // Известия АН СССР. ФАО. 1978. Т. 14. № 1. С. 79–87. [A. Ginzburg, K. Fyodorov. Cooling of water from surface during free and forced convection // Russian Academy of Sciences. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 1978. Vol. 14. No. 1. P. 79–87. (in Russian)].
- Анисимова Е.П. и др. К вопросу о теплообмене в тонком пограничном слое вода-воздух // Известия АН СССР. ФАО. 1983. Т. 19. № 9. С. 981–986. [*Ye. Anisimova et al.* On heat exchange in thin air-water boundary layer // Russian Academy of Sciences. Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics. 1983. Vol. 19. No. 9. P. 981–986. (*in Russian*)].

Сведения об авторе

Зенченко Сергей Сергеевич, к.т.н., начальник сектора ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, г. Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: +7 (812) 415-46-14. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

About the authors

Zenchenko, Sergey S., Cand. Tech. Sc., Head of Sector, KSRC. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-46-14. E-mail: krylov@krylov.spb.ru.

Поступила / Received: 31.01.18 Принята в печать / Accepted: 04.06.18 © Зенченко С.С., 2018