Отчет о выполнении проекта
№ 15-17-20009

Сведения о фактическом выполнении плана работы на год

1. Осуществлен пересмотр традиционной теории атмосферных конвективных ППС с учетом нелокальной природы конвективной турбулентности, самоорганизации крупномасштабной конвекции и взаимодействия ППС со свободной атмосферой и турбулентного перемешивания.
Разработка новой теории осуществлена под руководством С. Зилитинкевича силами участников проекта, прежде всего д.ф-м.н. О. Дружинина и проф. Ю. Троицкой, и внешних партнеров, включая д.ф-м.н. А. Глазунова и к.ф-м.н. Е. Мортикова – Институт вычислительной математики РАН; проф. Т. Эльперина, Н. Клиорина, И. Рогачевского – Университет им. Бен-Гуриона (Израиль), Dr. Dan Li – Princeton University (USA) и многих других. Проведено численное моделирование, в ходе которого была установлена возможность сосуществования анархической и механической турбулентности (характеризующейся колмогоровским прямым каскадом энергии). Выполненная работа включает создание полуэмпирической теории крупномасштабных самоорганизующихся структур (ячеек или роллов – в зависимости от силы ветра) и интегрального (иногда его называют "балковым" – от английского слова ”bulk”) закона сопротивления для конвективного ППС, связывающего напряжение сдвига на поверхности со средним полем ветра на верхней границе ППС.

2. Главным практическим приложением науки о взаимодействии атмосфера-суша/ /гидросфера является расчет приповерхностных турбулентных потоков энергии, вещества и количества движения по доступным в моделях значениям средних полей температуры, влажности, скорости ветра и т.д. на заданной высоте над поверхностью и на самой поверхности. Значения приповерхностных потоков задают граничные условия для моделей окружающей среды. Чем лучше разрешение в модели, тем выше требования к точности расчета потоков. В высокоразрешающих моделях нового поколения точность определения потоков приобретает первостепенное значение.

При нейтральной стратификации воздуха над не очень шероховатой поверхностью суши расчет потоков прост: вертикальные профили средних полей описываются логарифмическим законом, а параметры шероховатости определяются с помощью методов, хорошо зарекомендовавших себя в инженерной гидродинамике. Однако приповерхностный слой атмосферы обычно существенно стратифицирован, что оказывает сильное влияние на турбулентность и среднее течение. Общепринятым инструментом моделирования приповерхностного слоя служит теории подобия Монина-Обухова (1954). К настоящему времени накопились неоспоримые свидетельства принципиальных ошибок этой теории при неустойчивой и сильно устойчивой стратификациях. Однако альтернатив до сих пор не предложено, и сама теория не подвергалась систематизированной критике. Проведена разработка теоретических моделей и методов расчета турбулентных потоков для использования в оперативных моделях прогноза ППС в условиях мегаполиса и относительно малоизученных нейтральных и долгоживущих устойчивых ППС над водной поверхностью. Проведен анализ и оценка недостатков существующей теории подобия Монина-Обухова. В результате установлено, что в условиях устойчивой стратификации новая теория позволяет решить проблему вырождения турбулентности при сильной статической устойчивости, а в случае неустойчивой стратификации новая теория позволяет осуществить учет специфики анархической турбулентности и наличия самоорганизующихся конвективных структур (ячеек или роллов). Кроме того, новая теория будет использоваться для уточнения методики расчета турбулентных потоков в

условиях устойчивой и неустойчивой стратификации. Необходимость в этом возникает в связи с неточностями расчетов всех статистических моментов в рамках теории подобии Монина-Обухова.

3. Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование (DNS) устойчиво стратифицированного турбулентного погранслоя над водной поверхностью при числах Рейнольдса до 80000 и крутизн волн до 0.2. В качестве течения, моделирующего приводный слой атмосферы, в DNS рассматривалось турбулентное течение Куэтта (Рис. 1). Исследованы как стационарный турбулентный режим, реализующийся при достаточно малых числах Ричардсона, так и режим, реализующийся при сильной стратификации воздуха, когда флуктуации скорости и температуры отличны от нуля лишь вблизи водной поверхности. Для стационарного турбулентного режима проведена параметризация профилей средних полей скорости и температуры, исследована зависимость статистических свойств течения в погранслое от крутизны поверхностных волн. Исследован физический механизм поддержания флуктуаций вблизи водной поверхности при сильной, устойчивой стратификации.

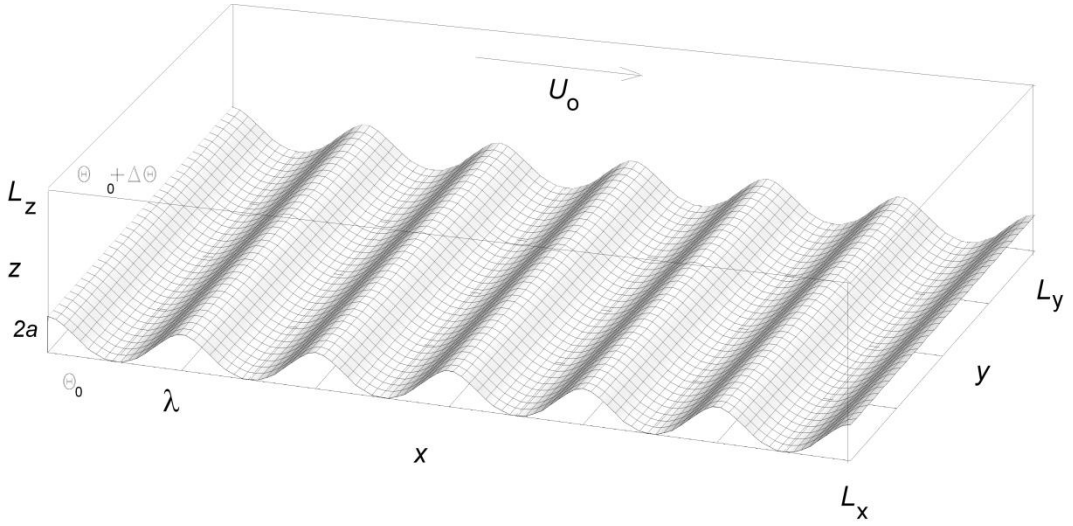


Рис. 1. Схема численного эксперимента.

4. В рамках исследований на настоящем этапе проекта также изучено влияние пены на процессы ветро-волнового взаимодействия. Для этого на Высокоскоростном Ветро-Волновом канале Большого Термостратифицированого бассейна ИПФ РАН проведена серия экспериментов. С целью обеспечения возможности регулярного создания пены на поверхности воды было разработано специальное устройство - пеногенератор. Устройство состоит из двух диффузоров - трубок длиной 350 мм диаметром 10 мм с боковыми отверстиями диаметром 2 мм. Диффузоры были приставлены боковыми поверхностями друг к другу, завернуты в поролон и расположены горизонтально, перпендикулярно каналу, с заглублением верхней части 5 мм от поверхности. Расстояние от начала канала (входа воздушного потока) - 1.2 м. Через один из диффузоров под давлением высоты уровня поступает раствор пенообразующего вещества (основной компонент Лаурилсульфат натрия), через второй диффузор подается сжатый воздух для продавливания раствора пенообразующего вещества через слой поролона и образования на поверхности воды мелкопузырьковой (мелкодисперсной) пены, аналогичной с реальными условиями. Специальные тестовые эксперименты продемонстрировали отсутствие влияния пеногенератора на холостом режиме (с включенным сжатым воздухом) параметры волнения генерируемого ветром.
В экспериментах измерялись профили средней скорости сканирующим методом с помощью трубки Пито, подключенной к высокочувствительным дифференциальным

дифманометрам MKS Baratron. Были выполнены измерения при 5 значениях расхода воздушного потока (частот вращения вентилятора 20-40 Гц) в канале. Одновременно с измерениями скорости выполнялись измерения параметров поверхностного волнения с помощью трехканального струнного волнографа и применения FDM метода для нахождения 3D-спектров волнения (частота, волновое число, угол распространения).
Последовательность проведения экспериментов была следующая: в начале выполнялась серия измерений на чистой воде во всем диапазоне скоростей ветра, после этого проводились измерения с пеной во всем диапазоне скоростей. Во время проведения измерений ветра и волнения пеногенератор работал непрерывно, т.е. пена непрерывно поступала на поверхность. В конце снова проводилась серия контрольных измерений без пены. Перед каждой серией измерений и после нее контролировались параметры воды в бассейне: измерялся коэффициент поверхностного натяжения капельным способом, а также вязкость жидкости с помощью вязкозиметра. Для всех случаев отличия от первоначальных значений этих параметров, измеренных для чистой воды, находились в пределах погрешности измерений. Всего для каждой скорости ветра в канале получено по 3 профиля. Для каждого профиля были найдены значения скорости трения u^*, эквивалентной скорости воздушного потока на 10-м высоте U_{10} и коэффициент аэродинамического сопротивления C_D. Диапазон изменения U_{10} в ходе эксперимента составил от 12 до 38 м/с. По данным временных записей возвышений поверхности вычислены спектры, найдены средние амплитуда и уклон волнения, пиковые частоты и волновые числа.
Для оценки концентрации пены на поверхности жидкости была создана специальная оптическая система, основанная на видеосъемке водной поверхности сверху с теневой подсветкой из под воды с помощью Light box. Был разработан специальный алгоритм анализа цифровых изображений, который продемонстрировал возможность распознавания пены на поверхности воды и автоматического определения ее концентрации, по крайней мере, при малых скоростях ветра.

5. На настоящем этапе проекта было выполнено комплексное исследование характеристик и структуры воздушного потока, процессов турбулентного обмена при ветро-волновом взаимодействии с использованием техники цифровой оптической анемометрии по изображениям частиц Particle Image Velocimetry (PIV). Эксперименты выполнялись в несколько этапов на двух экспериментальных стендах. Были выполнены эксперименты на одном из крупнейших в мире ветро-волновом канале LASIF (Large Air-Sea Interaction Facility) университета Марселя, а также на ВВК БТСБ ИПФ РАН в широком диапазоне скоростей ветра и параметров волнения.
Основная идея заключалась в том, чтобы проверить модернизированную систему PIV-измерений сначала на одном из крупнейших в мире стендов, на котором имеется возможность получения развитого турбулентного пограничного слоя с большой толщиной логарифмического участка (слоя постоянного турбулентного потока или сдвигового напряжения) за счет большого разгона (26 м) и высоты воздушного канала над водой (более 1,5 м). Однако на канале существует ограничение по скорости воздушного потока до 14 м/с, или по эквивалентной скорости ветра на 10-м высоте до 19 м/с. Поэтому после успешной отработки новой системы на LASIF эксперименты планировалось продолжить на ВВК БТСБ, учитывая, что на нем можно создавать воздушные потоки с эквивалентной скоростью ветра до 48 м/с.
В обоих экспериментах использовались твердые частицы полиамида в качестве визуализатора. Но система засевания была существенно модернизирована. За счет установки отдельного объема для заправки частиц и использования набора плавно изогнутых трубчатых сопел, увеличена плотность засева, а также длительность (с 0.3 сек до 0.8 сек), в течение которого он происходит. В экспериментах на LASIF для подсветки использовался аргоновый лазер мощностью до 4 Вт, 488 Нм. В экспериментах на ВВК

БТСБ использовался диодный твердотельный зеленый лазер DTL-413 (527 нм) мощностью 1.5 Вт. Оптическая система формирования ножа была оптимизирована для уменьшения ширины и повышения интенсивности. В обоих случаях использовалась высокоскоростная камера Optronis cr3000x2, компактная и светочувствительная. Вычисление PIV проводилось между последовательными кадрами в один проход с уточнением положения максимума ККФ по трем точкам с помощью Гауссова профиля. Координатная сетка задавалась с учетом положения поверхности. В экспериментах на БТСБ для уточнения положения поверхности воды дополнительно использовались данные со струнного волнографа, расположенного далее по потоку в 17 мм от границы кадра.
Измерения на LASIF проводились при двух скоростях ветра в канале 3 и 5 м/с (7, 10 м/с эквивалентная скорость) в свободном режиме, а также в режиме дополнительной генерации длинной поверхностной волны с помощью волнопродуктора частота 1,6 Гц, амплитуда была фиксирована. Результаты экспериментов были использованы в качестве входных параметров для численных расчетов с помощью квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной поверхностью. В экспериментах на ВВК БТСБ эквивалентная скорость ветра менялась в пределах от 10 до 48 м/с.

6. Осуществлена адаптация модели WAVEWATCH III к условиям внутренних водоемов средних размеров на примере Горьковского водохранилища. Для этого, в первую очередь, в открытом программном коде было изменено значение минимальной высоты значительных волн (H_S), а для задания геометрии водоема были использованы спутниковые топографические данные «GLOBE» в области от 56,6° до 57,5° с.ш. и от 42.9° до 43.5° в.д. с шагом 0,00833° в обоих направлениях. Диапазон частот был изменен в соответствии с наблюдаемым в эксперименте диапазоном от 0,2 Гц до 4 Гц, который при моделировании дробился на 31 частоту; было рассмотрено 31 угловое направление. Далее по данным о скорости и направлении ветра, разнице температур вода-воздух моделировалось волнение в водохранилище при заданном Гауссовом начальном возмущении. Были рассмотрены умеренные ветра (u_{10}=1÷9 м/с) разных направлений, сохраняющие постоянное значение над всей поверхностью Горьковского водохранилища.

Дальнейшая адаптация модели была связана с подстройкой ветровой накачки. Первый этап подстройки показал значительное улучшение прогноза значительной высоты волн H_s, Проведена оценка чувствительности модели к различным параметризациям ветровой накачки, были рассмотрены параметризации WAM3, WAM4, параметризация Толмана и Чаликова. Использованы также адаптированные параметризации WAM3 и параметризация Толмана и Чаликова с применением полученной в результате серии натурных экспериментов параметризацией коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра $C_D(U_{10})$ (Рис.2).

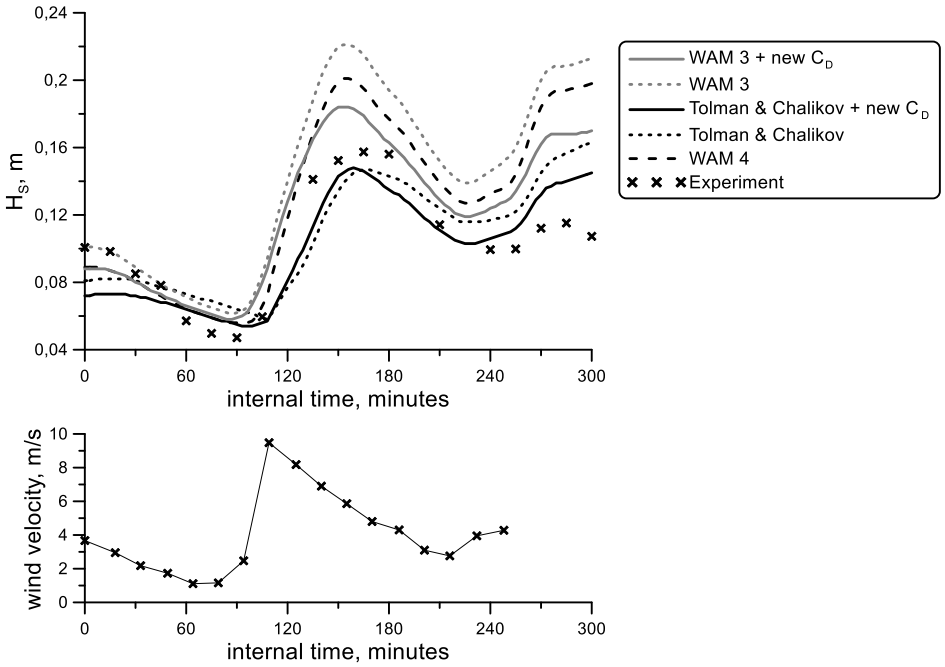


Рис. 2. Сверху: расчетная зависимость H_S от времени. Разными линиями обозначены расчеты при разных параметризациях ветровой накачки. Крестиками обозначены результаты натурного эксперимента. Снизу: измеренная в натурном эксперименте скорость ветра.

7. В рамках модели WAVEWATCH III выполнено моделирование развития поверхностного волнения с использованием различных параметризаций ветрового напряжения для тестового района – акватории Горьковского водохранилища. Для верификации модели были использованы натурные данные, полученные в ходе серии экспериментов на Горьковском водохранилище. Для измерений была использована уникальная плавучая буйковая станция на базе океанографической вехи Фруда, оснащенная линейкой акустических датчиков скорости ветра и антенной струнных волнографов. Система позволяет оценивать параметры приводного турбулентного пограничного слоя и пространственно-временные спектры волнения.

Параметризации ветровой накачки и диссипации в версии модели WAVEWATCH III v.3.14 представлены моделямиWAM 3, Tolman&Chalikov, WAM 4. Для всех встроенных моделей наблюдается систематическое завышение высоты волнения и занижение среднего периода волнения, при этом стандартное отклонение расчетных значений высоты значительных волн H_S дляWAM3составляет 52 %, для Tolman&Chalikov – 40 %, для WAM4 – 46 %. Использование новой параметризации $C_D(U_{10})$, полученной в результате серии натурных экспериментов на Горьковском водохранилище, уменьшает стандартное отклонение H_S для WAM3с 52 % до 39 %, для Tolman&Chalikov - с 40 % до 37 %. Результаты сравнения значительных высот волнения отображены на Рис.3.

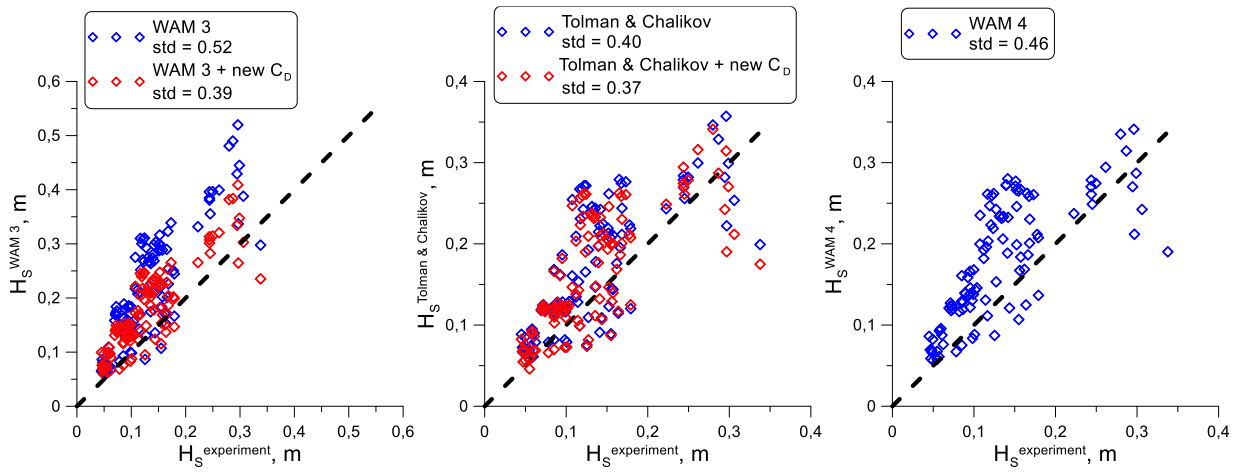


Рис. 3. Расчетные значения H_S в сравнении с данными натурного эксперимента для а) параметризации WAM3 (синим) и WAM3 с новым C_D(красным), б) параметризации Tolman&Chalikov (синим) и Tolman&Chalikov с новым C_D(красным), в) параметризации WAM4 (синим).

8. Были продолжены исследования динамики турбулентного скачка плотности в рамках модернизированной модели турбулентного замыкания. Проведена верификация модели на основе натурных данных, полученных в ходе натурных исследований, проводимых на Горьковском водохранилище.

Проведено исследование особенностей воздействия сдвиговых течений на динамику термоклина в пресноводном бассейне. В рамках модернизированной теории турбулентного замыкания, полученной с помощью кинетического подхода и учитывающей двухстороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергии турбулентных пульсаций, а также анизотропию турбулентности, продолжено исследование формирования и эволюции турбулентного пикноклина вне рамок исследованного ранее автомодельного режима. Исследование проводилось в рамках системы балансных уравнений для средней плотности, кинетической и потенциальной энергии турбулентности с добавлением слагаемых, определяемых сдвигом скорости U*oz*, в уравнение для кинетической энергии турбулентности.

Показано, что в отсутствии заданного сдвига скорости при характерном масштабе турбулентности L, зависящем от стратификации N и энергии турбулентности e, эволюция пикноклина начинается с верхней границы - идет ее заглубление и укручение, а потом начинается движение нижней границы.

Показано, что учет анизотропии приводит к появлению на профилях плотности или температуры резких скачков [Ezhova E.V., Zilitinkevitch S.S., Rybushkina G.V., Soustova I.A., and Troitskay Yu.I., 2016: On the application of a turbulence closure modified model to the description of the density jump evolution in a stably stratified medium. *Izverstiya Atmospheric and Oceanic Physics*, **52**, No. 3, 334-341 (О применении модифицированной модели турбулентного замыкания к описанию эволюции скачка плотности в устойчиво стратифицированной среде Е.В. Ежова, С.С. Зилитинкевич, Г.В. Рыбушкина, И.А. Соустова, Ю.И. Троицкая, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2016, **52**, № 3, с. 334–341).

При заданном сдвиге скорости в устойчиво стратифицированном сдвиговом потоке определен стационарный режим с отношением значений кинетической и потенциальной энергий турбулентности, не зависящим от числа Ричардсона при больших его значениях.

При этом условии генерация турбулентности выполняется при любом значении числа Ричардсона.

Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году

1.Получен балковый закон сопротивления конвективного ППС, связывающий напряжение сдвига на поверхности со средним полем ветра на верхней границе ППС. Разработана теория, описывающая крупномасштабные структуры ППС. Благодаря прямому численному моделированию, выполненному в рамках данного проекта О. Дружининым и Е. Мортиковым, выявлена следующая картина. Флуктуации вертикальной скорости при неустойчивой стратификации осуществляются в основном в виде хаотических восходящих струек, порождаемых силами плавучести. При этом, малые струйки (в отличие от обычных турбулентных вихрей) не разрушаются, а сливаются в более крупные струйки и, следовательно, не передают свою кинетическую энергию горизонтальным флуктуациям скорости. Слияние струек представляет собой не что иное, как обратный каскад энергии, ведущий к возникновению крупномасштабных самоорганизующихся конвективных структур, иными словами, ”порядка из хаоса”. Сосуществование анархической и механической турбулентности – ключевой момент открытого нового явления и предложенной новой теории. Термин ”анархическая турбулентность” навеян известным афоризмом Кропоткина: ”анархия – мать порядка”. Разумеется, при конвекции существует и обычная турбулентность. Сдвиги скорости и в среднем течении, и в структурах порождают механическую турбулентность, характеризующуюся колмогоровским прямым каскадом энергии. Показано, что традиционные теории турбулентных замыканий, основанные на двухкомпонентном разложении - ”среднее течение + колмогоровская турбулентность” - являются прокрустовым ложем для анархической турбулентности и самоорганизующихся структур.

2. Разработаны теоретические модели ППС (включающие связь между приповерхностными турбулентными потоками и параметрами среднего течения, балковые законы сопротивления, связывающие напряжение сдвига на поверхности со средним полем ветра на верхней границе ППС, и уравнения для высоты ППС) и алгоритмы расчета для следующих типов ППС: условно-нейтральные ППС, долгоживущий устойчивый ППС.
Разработка новой теории осуществлена С. Зилитинкевичем с участием всей команды проекта. На основе проделанной работы продемонстрированы и количественно оценены следующие главные дефекты теории подобия Монина-Обухова.

При устойчивой стратификации теория не учитывает принципиальное различие в асимптотическом поведении коэффициентов турбулентной вязкости и теплопроводности, что приводит к артефакту вырождения турбулентности (обращению в нуль приповерхностных турбулентных потоков) при сильной статической устойчивости. До настоящего времени эта ошибка корректировалась в моделях без всякого теоретического обоснования. Предложенная новая теория сняла эту проблему.

При неустойчивой стратификации теория Монина-Обухова не учитывает ни специфику анархической турбулентности, ни наличие самоорганизующихся конвективных структур. Среди прочих ошибочных выводов, она дает неверные выражения для всех статистических моментов, включающих горизонтальные флуктуации скорости. При безветренной конвекции метод, основанный на теории подобия Монина-Обухова, недооценивает приповерхностный тепло/массообмен на порядок и более.

Развита новая теория, которая будет положена в основу принципиально улучшенной методики расчета турбулентных потоков при устойчивой и неустойчивой стратификации.

3. Изучено влияние шероховатости подстилающей водной поверхности на турбулентность в устойчиво-стратифицированном пограничном слое (УСПС). Проведено прямое численное моделирование (DNS) при различных балковых числах Рейнольдса (Re) и Ричардсона (Ri), и крутизны поверхностной волны (*ka*). Показано, что при фиксированном Re стационарный турбулентный режим устанавливается при Ri ниже порогового значения Ri_c, зависящего от Re. При $Ri > Ri_c$ идентифицированы трехмерные квазипериодические структуры, порог возникновения которых зависит от крутизны поверхностной волны (Рис. 4). Возникновение структур объясняется развитием параметрической неустойчивости возмущений, индуцированных в воздушном потоке волнами на поверхности воды. Результаты DNS хорошо согласуются с предсказанием теоретической модели, где решения для возмущений полей скорости и температуры находятся как решение двухмерной линеаризованной системы с неоднородным граничным условием, обусловленным наличием поверхностной волны (Рис. 5). Как и турбулентные флуктуации, обнаруженные трехмерные структуры обеспечивают перенос импульса и тепла, т.е. увеличение шероховатости границы раздела воды и воздуха, вызванное присутствием волн, приводит к усилению обмена в УСПС.

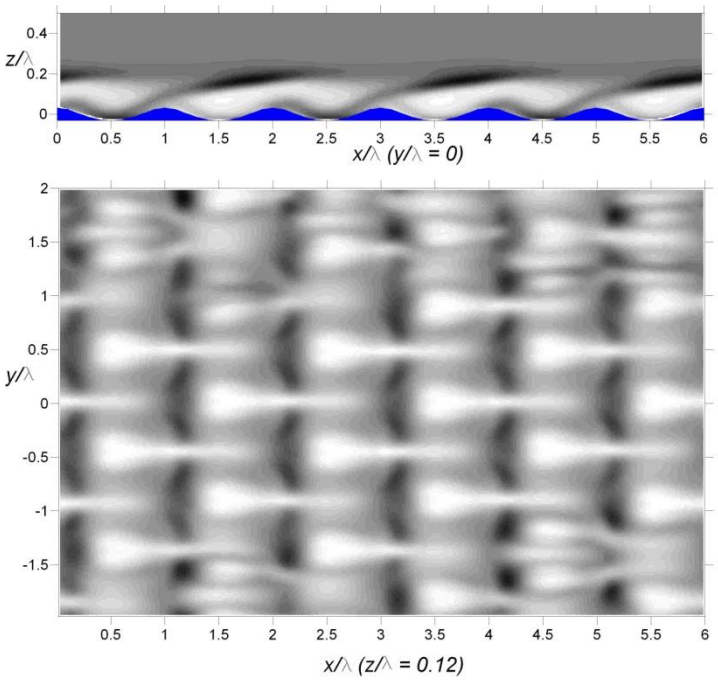


Рис. 4. Мгновенное поле модуля завихренности Ω в устойчиво-стратифицированном погранслое в момент времени $t = 1000$ для Re = 15000, Ri = 0.08. Крутизна волны $ka = 0.2$, фазовая скорость $c/U_0 = 0.05$.

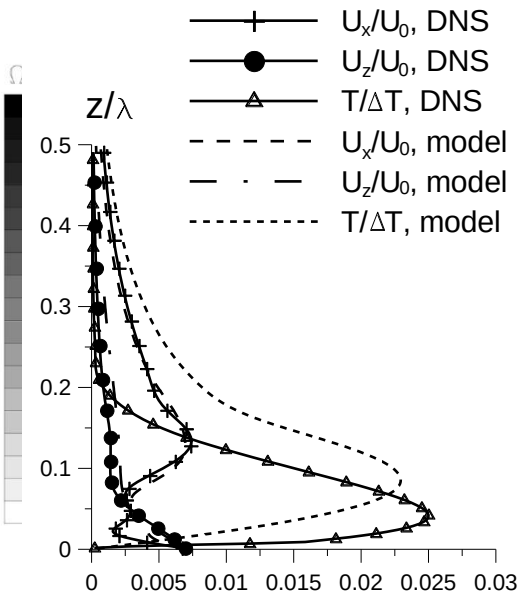


Рис. 5. Возмущения полей скорости и температуры, индуцированные поверхностной волной.

4.В рамках настоящего проекта проведено изучение влияния пены на поверхности воды на параметры поверхностного волнения и приводного ветра. В ходе исследований были получены следующие результаты:

1) Присутствие пены приводит к уменьшению уклона волнения, по сравнению с чистой водой для одинаковых скоростей воздушного потока в канале во всем диапазоне, однако наиболее сильно это сказывается для малых скоростей ветра.

2) Показано, что присутствие пены значительно влияет на спектры поверхностного волнения. Изменение пиковой частоты и волнового числа с увеличением скорости ветра в присутствии пены слабее, чем не чистой воде. Для пиковой частоты от 12 до 15 рад/с (с пеной) против 11 до 22 рад/с (для чистой воды). Аналогично для волновых чисел.
3) Присутствие пены на поверхности воды приводит к искажению профиля средней скорости ветра, особенно существенной при малых скоростях ветра.
4) Продемонстрирована работоспособность алгоритма определения концентрации пены до эквивалентной скорости ветра 16 м/с (25 Гц). Продемонстрировано, что уменьшение концентрации пены приводило к уменьшению покрытия водной поверхности с 37 до 15%.

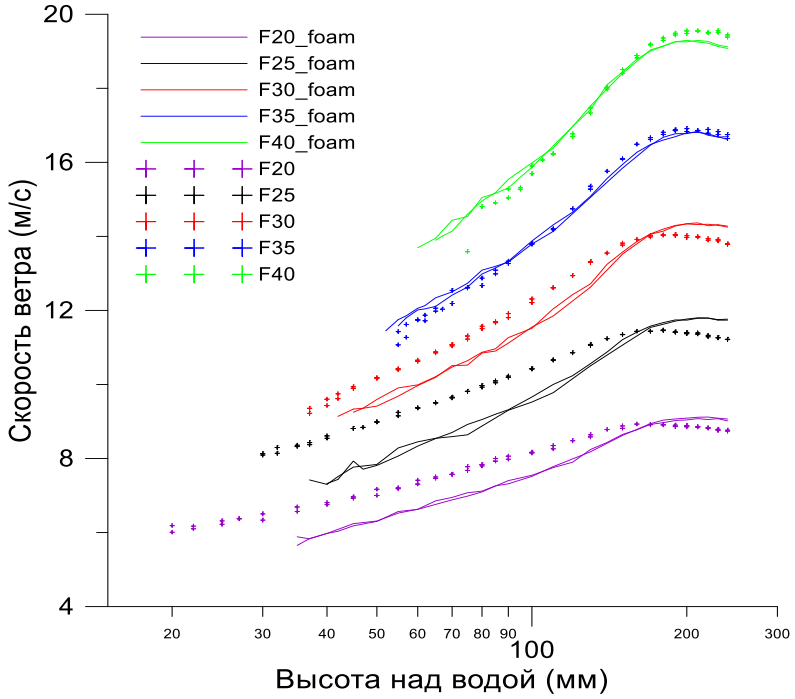
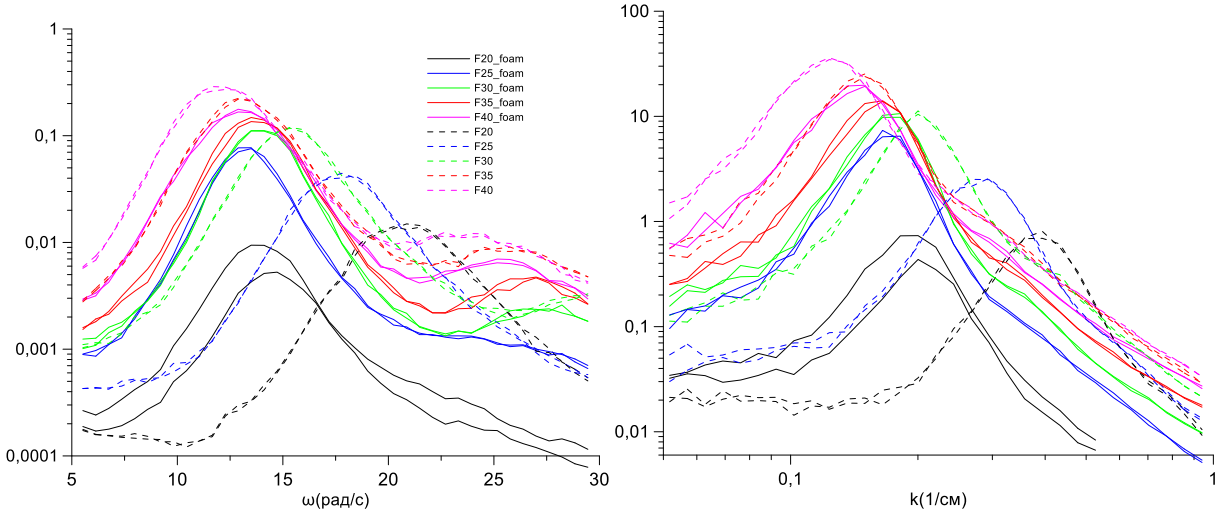


Рис. 6. Профили средней скорости ветра в канале. Символы - чистая вода, линии соответствуют случаю с добавлением пены. Разные цвета, соответствуют разным частотам вращения вентилятора (расходам воздуха в канале).



(а) (б)

Рис. 7. Сплошная линия с пеной, штриховая с чистой водой а) Спектр амплитуды волнения по частоте б) по модулю волнового числа.

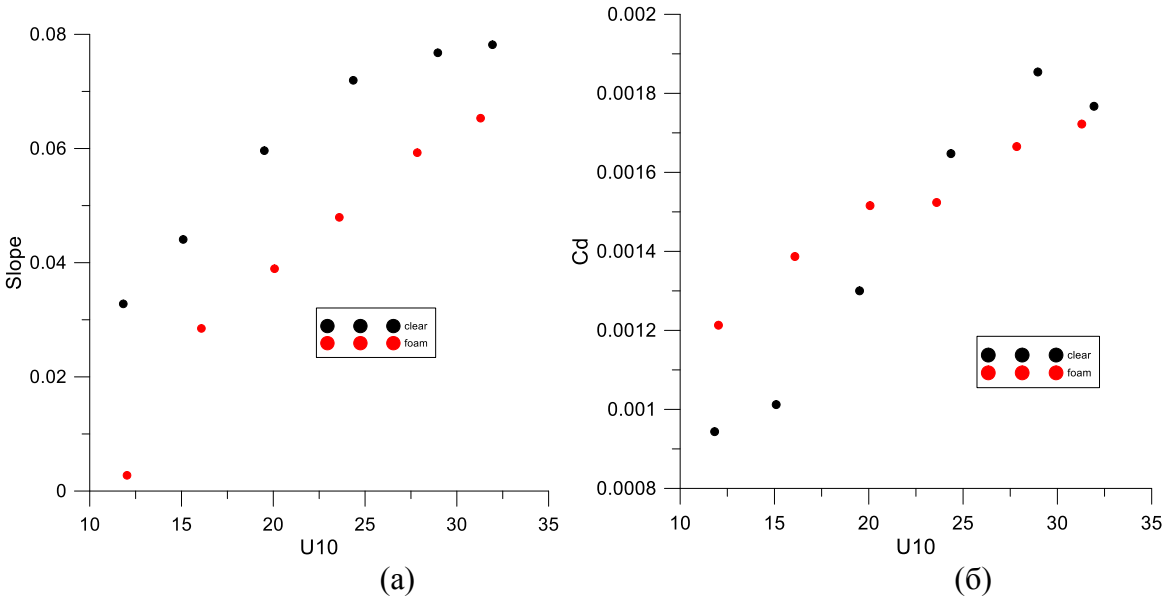


Рис. 8. (а) Зависимость среднего клона поверхности от эквивалентной скорости ветра (б) зависимость коэффициента обмена импульсом (аэродинамического сопротивления) от эквивалентной скорости ветра.

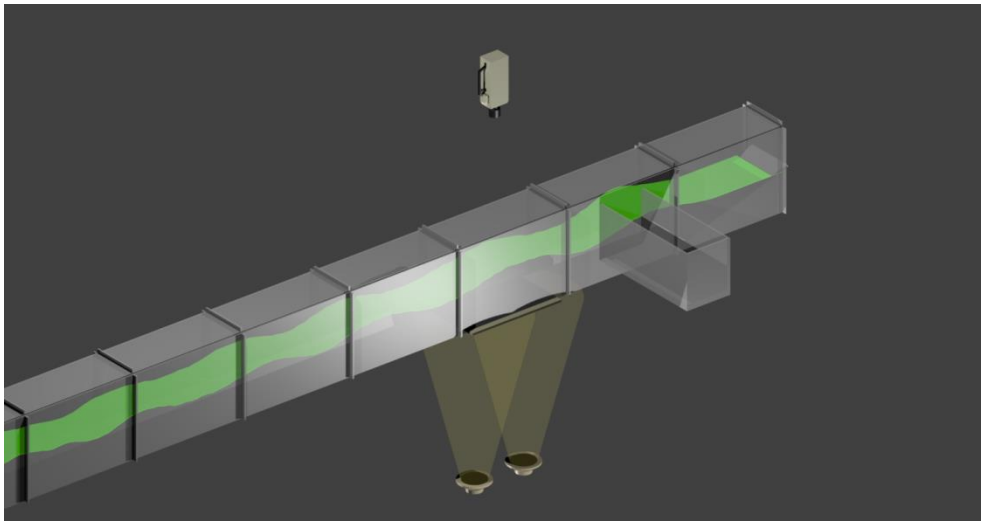


Рис. 9. Схема эксперимента с подводной подсветкой для измерения концентрации пены.

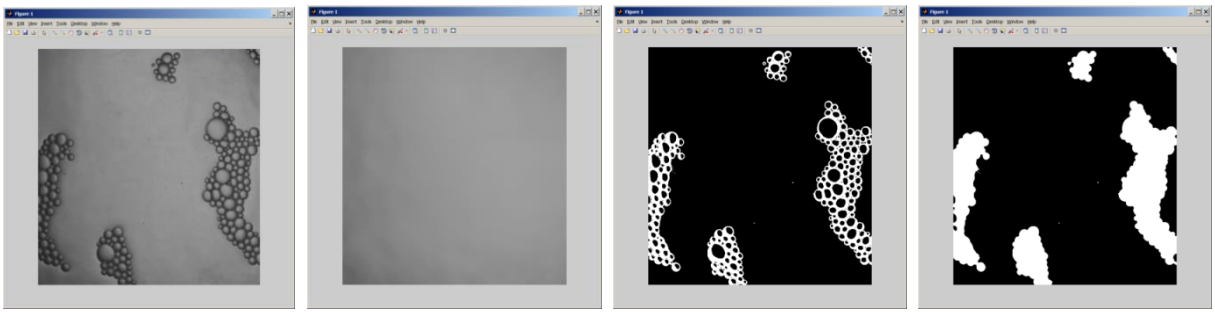


Рис. 10. Последовательность изображений при обработке для поиска площади поверхности занятой пеной (а) начальное изображение (б) найденный фон (в) бинеаризованное изображение по порогу 50 (г) с найденными областями покрытыми пеной.

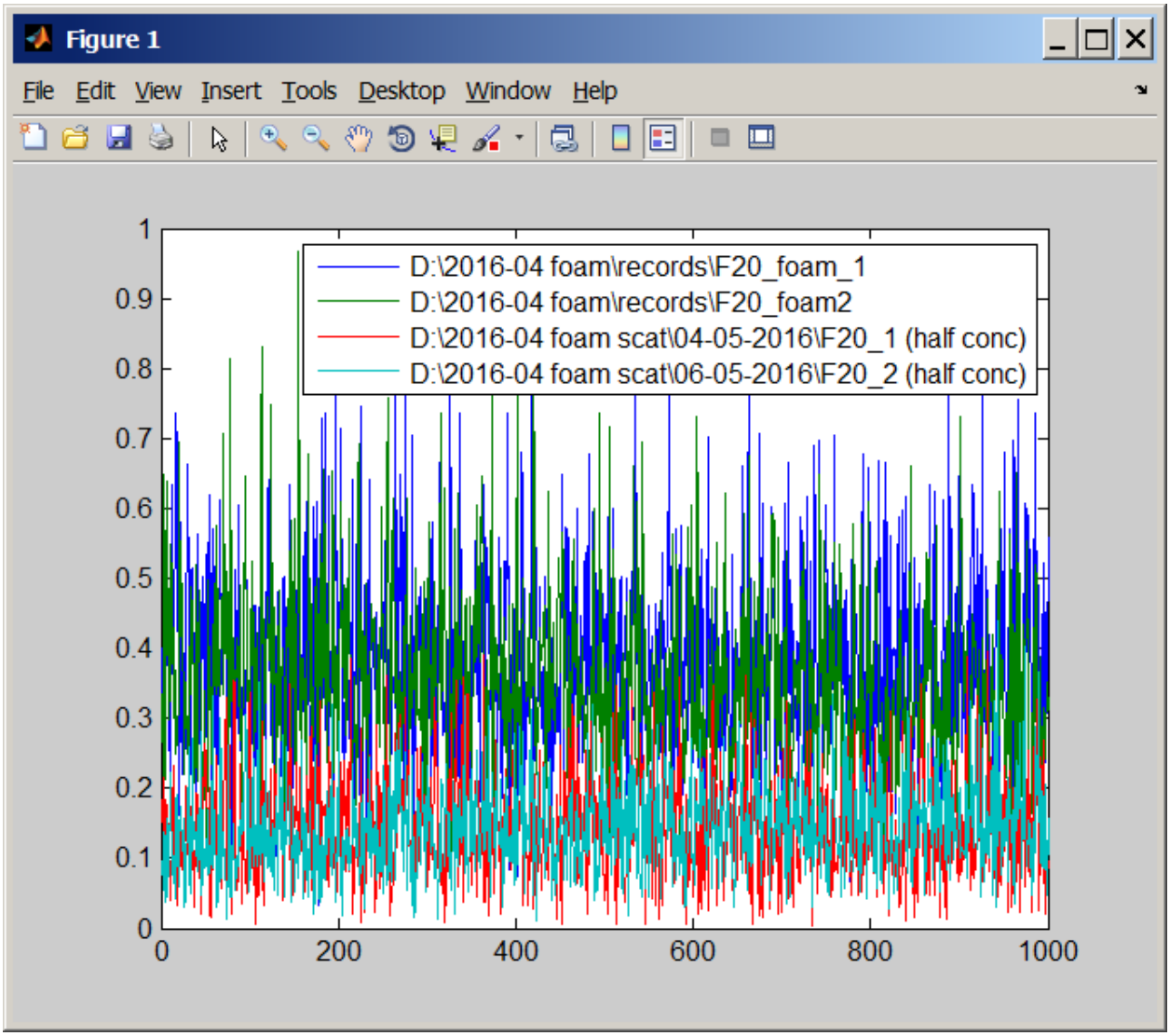
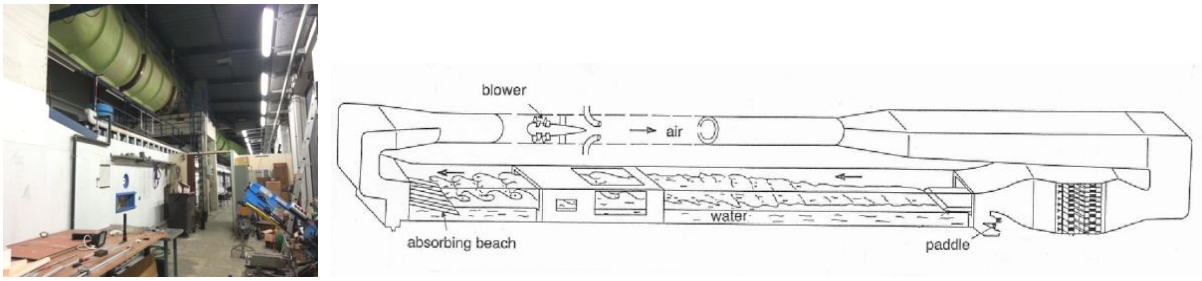


Рис. 11. Зависимость площади покрытой пеной (относительная) от времени для записей с камер. Частота вращения вентилятора 20 Гц.

5. На данном этапе проекта было проведено исследование поля обтекания взволнованной поверхности воды воздушным потоком, коэффициентов обмена импульсом, полученных на основе оптической анемометрии в широком диапазоне скоростей ветра и разгона волнения. Эксперименты проводились с использованием техники цифровой оптической анемометрии по изображениям частиц Particle Image Velocimetry (PIV на двух экспериментальных стендах - ветро-волновом канале LASIF (Large Air-Sea Interaction Facility) университета Марселя, а также на ВВК БТСБ ИПФ РАН в широком диапазоне скоростей ветра и параметров волнения. При этом были получены следующие результаты:
1) На канале LASIF были успешно впервые выполнены измерения скорости воздушного потока PIV-методами.
2) Были измерены последовательности полей скорости, восстановлены средние поля, профили, а также профили турбулентных характеристик (среднеквадратичных флуктуаций скорости, сдвиговых напряжений). Сравнение результатов определения коэффициента обмена импульсом по наклону профиля скорости в его логарифмической части и непосредственно из профиля сдвигового напряжения дали хорошее согласие.
3) Как показали измерения, проведенная модернизация системы PIV-измерений позволила увеличить в 6 раз количество корректно измеряемых векторов на мгновенном поле

скорости. При этом плотность изображения бликов оставалась постоянной, что позволило снизить их влияние на ошибки при определении скорости воздушного потока.
4) Результаты теоретических расчетов с помощью квазилинейной модели турбулентного пограничного слоя над взволнованной поверхностью оказались в хорошем согласии с данными эксперимента.
5) В экспериментах на ВВК БТСБ были получены средние поля скорости над средней формой поверхности. Усреднение мгновенных полей скорости найденных PIV-методом проводилось с учетом фазы основной гармоники поверхностной волны, вычисленной с использованием преобразования Гильберта.
6) Были получены профили средней скорости путем усреднения полей по фазе, во всем диапазоне исследуемых скоростей ветра. В отличие от контактных методов удалось провести измерения в непосредственной близости от водной поверхности, включая впадины волн.
7) Увеличенная точность измерения позволила впервые измерять турбулентные флуктуации воздушного потока в непосредственной близости от водной поверхности при моделировании ураганных ветров. Это позволило впервые построить профили турбулентного потока импульса (сдвигового напряжения) и определить по ним скорость трения для диапазона эквивалентной скорости ветра более 25 м/с.
8) Полученные результаты использованы для уточнения параметризации обмена импульсом.



(а) (б)

Рис. 12 (а) общий вид и (б) схема Large Air-Sea Interaction Facility

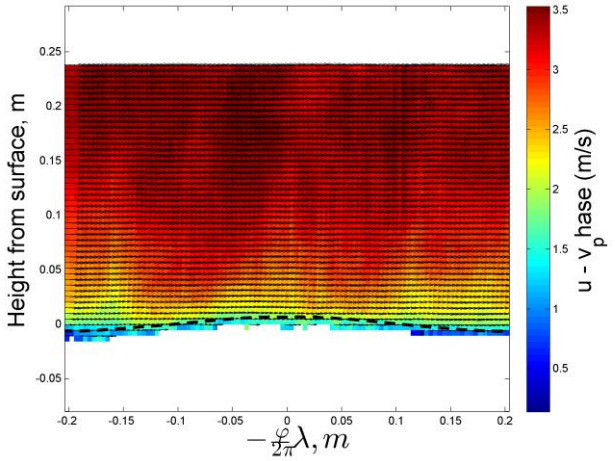
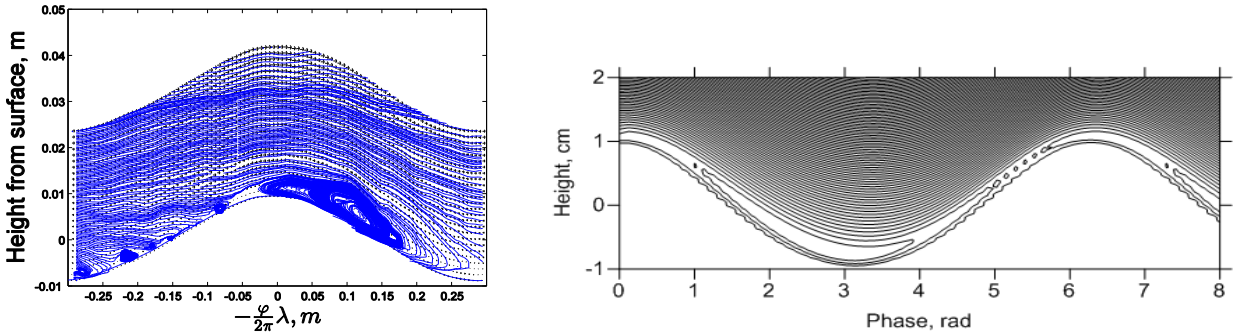
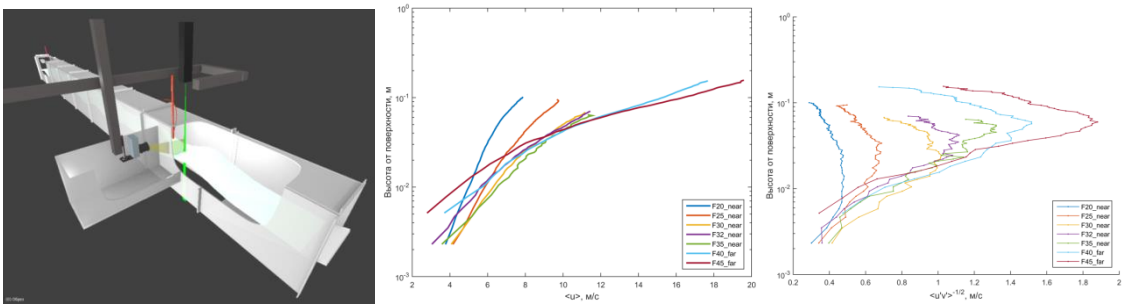


Рис. 13. Пример среднего поля скорости для ветра 5 м/с без волнопродуктора.



(а) (б)

Рис. 14. Сравнение полей линий тока по данным экперимента (а) и теоретически расчитанным (б)



(а) (б) (в)

Рис. 15. (а) Общая схема исследования PIV-методами на ВВК БТСБ (б) профили средней скорости (в) профили сдвигового напряжения (турбулентного потока импульса).

6. В приспособленной к условиям внутреннего водоема модели WAVEWATCH III проведена оценка чувствительности расчетных данных к изменению параметризации ветровой накачки. Показано заметное влияние изменения параметризации ветро-волнового взаимодействия на расчетные данные (стандартное отклонение от экспериментальных данных составило для модели WAM3 52 %, для Tolman&Chalikov – 40 %, для WAM4 – 46 % в значениях высоты значительных волн H_S).

Произведена верификация выполненного в рамках адаптированной модели WAVEWATCH III моделирования развития поверхностного волнения с использованием различных параметризаций ветрового напряжения для акватории Горьковского водохранилища при помощи данных натурных экспериментов, проведенных на Горьковском водохранилище. Измерения в натурном эксперименте проводились с использованием уникальной плавучей буйковой станции на базе океанографической вехи Фруда, оснащенной линейкой акустических датчиков скорости ветра и антенной струнных волнографов. При помощи использованной системы были оценены параметры приводного турбулентного пограничного слоя и пространственно-временные спектры волнения.

При верификации для всех моделей ветро-волнового взаимодействия, представленных в WAVEWATCHIII, наблюдается систематическое завышение высоты волнения и занижение среднего периода волнения, при этом стандартное отклонение расчетных значений высоты значительных волн H_S для WAM3 составляет 52 %, для Tolman&Chalikov – 40 %, для WAM4 – 46 %. Использование новой параметризации $C_D(U_{10})$, полученной в результате серии натурных экспериментов на Горьковском

водохранилище, уменьшает стандартное отклонение H_Sдля WAM3 с 52 % до 39 %, для Tolman&Chalikov - с 40 % до 37 %.

7. Показано, что в отсутствии заданного сдвига скорости при характерном масштабе турбулентности L, зависящем от стратификации N и энергии турбулентности e, эволюция пикноклина начинается с верхней границы - идет ее заглубление и укручение, о потом начинается движение нижней границы.

Продемонстрировано, что учет анизотропии (параметр R [Ezhovaa E.V., Zilitinkevitcha S.S., Rybushkinaa G.V., Soustovaa I.A., and Troitskaya Yu.I., 2016: On the application of a turbulence closure modified model to the description of the density jump evolution in a stably stratified medium. *Izverstiya Atmospheric and Oceanic Physics*, **52**, No. 3, 334-341 (О применении модифицированной модели турбулентного замыкания к описанию эволюции скачка плотности в устойчиво стратифицированной среде Е.В. Ежова, С.С. Зилитинкевич, Г.В. Рыбушкина, И.А. Соустова, Ю.И. Троицкая, *Известия РАН. Физика атмосферы и океана*, 2016, **52**, № 3, с. 334–341]) приводит к появлению на профилях плотности или температуры резких скачков.

При заданном сдвиге скорости в устойчиво стратифицированном сдвиговом потоке определен стационарный режим с отношением значений кинетической и потенциальной энергий турбулентности, независящим от числа Ричардсона при больших числах Ричардсона. При этом условии генерация турбулентности выполняется при любом значении числа Ричардсона.