

Отчет о выполнении проекта № 15-17-20009 за 2017 год

1.1. Заявленный в проекте план работы на год. Формируется в соответствии с заявкой.

1. 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 теории замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термиков, присущих приповерхностному сдвиговому подслою конвективного ППС. Построение обобщенной теории, численных моделей и методов расчета основных свойств сухого конвективного ППС.
2. Разработка оптимальной, не требующей значительных вычислительных затрат версии новой модели замыкания для турбулентных потоков для сильно-устойчиво-стратифицированной свободной атмосферы (и океана).
3. Получение универсального критерия турбулентно-ламинарного перехода, обобщающего известные критерии для конкретных типов потоков.
4. Разработка алгоритма прямого численного моделирования (DNS) воздушного погранслоя над водной поверхностью сложной формы, содержащей спектр поверхностных волн. Исследование методом DNS влияния формы спектра поверхностных волн на явление отрыва воздушного потока.
5. Лабораторное моделирование ветро-волнового взаимодействия и изучение процессов обмена турбулентного обмена в широком диапазоне скоростей ветра и параметров волнения, в том числе в присутствии длинных волн (генерируемых волнопродукторами), на одной из экспериментальных установок мирового уровня (США, Франции или Германии).
6. Обобщение данных лабораторных и натуральных экспериментов, а также результатов численного моделирования турбулентного погранслоя над поверхностными волнами с помощью вихреразрешающих моделей. На основании этого будет предложена параметризация переноса тепла и импульса в пограничном слое атмосферы, применимая при широком спектре метеоусловий.
7. Исследование эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы.
8. Исследование эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.
9. Исследование взаимодействия внутренних волн с турбулентностью в атмосфере в условиях устойчивой стратификации в рамках модели для турбулентности, основанной на уравнениях баланса импульса и энергии.

В рамках выполнения данного проекта запланирован ряд командировок. К расходам по командировкам относятся:

а) Расходы по командировкам для участия в научных мероприятиях (конференциях, симпозиумах и т.д.) для представления доклада и обсуждения результатов проекта.

На 2017 г планируется участие в:

Международная конференция IUTAM Symposium on Wind waves 2017 (Лондон, Англия)

Международный симпозиум Frontiers in Nonlinear Physics 2017 (Нижний Новгород, Россия)

Международная конференция European Geophysical Union (EGU) Assembly 2017 (Вена, Австрия)

б) Расходы по командировкам, связанные с выполнением исследований на зарубежных экспериментальных стендах:

Командировка во Францию для проведения исследований на ветро-волновом канале LASIF, университета Марселя.

Командировка в США для проведения исследований на ветро-волновом канале SURge- STructure-Atmosphere-INteraction (SUSTAIN),

Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, университет Майами

Командировка в Германию для проведения исследований на ветро-волновом канале AEOLOTRON , университета Гейдельберга

1.2. Заявленные научные результаты на конец года. Формируется в соответствии с заявкой.

1. Теория замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термик, присущих приповерхностному сдвиговому подслою конвективного ППС. Обобщенная теория, численные модели и методы расчета основных свойств сухого конвективного ППС.

2. Оптимальная версия новой теории замыкания для сильно-устойчивой стратификации (с числами Ричардсона, намного превышающими критическое значение $Ri = 0.25$).

3. Универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в устойчиво-стратифицированных турбулентных атмосферных потоках с конечным числом Рейнольдса; теоретические оценки перехода в условиях сильной стратификации в свободной атмосфере и толще океана.

4. Алгоритм DNS воздушного потока над водной поверхностью, содержащей спектр поверхностных волн. Оценка влияния формы спектра поверхностных волн на параметризацию турбулентного переноса импульса и тепла в атмосферном погранслое.

5. Результаты измерений параметров, характеризующих турбулентный обмен (сдвиговое напряжение, коэффициент обмена импульсом) в широком диапазоне скоростей ветра и волнения, включая искусственные длинные волны (создаваемые волнопродуктором).

6. Уточненная на основе данных DNS/LES параметризация переноса тепла и импульса в пограничном слое атмосферы, применимая при широком спектре метеоусловий.

7. Оценка эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы.

8. Оценка эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.

9. Теоретическая модель взаимодействия внутренних волн с турбулентностью в атмосфере в условиях устойчивой стратификации, исследование особенностей генерации турбулентности внутренними волнами.

1.3. Сведения о фактическом выполнении плана работы на год.

1. 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 теории замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термиков, присущих приповерхностному сдвиговому подслою конвективного ППС. Построение обобщенной теории, численных моделей и методов расчета основных свойств сухого конвективного ППС.

До недавнего времени считалось (см., например: Monin & Obukhov, 1954; Deardorff, 1972a,b; Sorbjan, 1989; Stull, 2012), что конвективная турбулентность принципиально не отличается от механической (сдвиговой) турбулентности. Для последней характерен колмогоровский прямой каскад энергии: турбулентные вихри, возникающие за счет сдвига скорости среднего течения, неустойчивы и разрушаются, порождая меньшие вихри.

В данном проекте на основе предшествующих теоретических исследований (Zilitinkevich, 1973; Kader & Yaglom, 1990; Zilitinkevich et al., 1999, 2006; Elperin et al., 2006) и прямого численного моделирования (Hellsten and Zilitinkevich, 2013) было показано, что конвективная турбулентность состоит из хаотических восходящих струек, порождаемых силами плавучести. При этом малые струйки (в отличие от обычных турбулентных вихрей) не разрушаются, а сливаются в более крупные струи. В ходе работы количественно определяется роль конвективных плавучих структур и фоновой турбулентности, в конвективном пограничном слое горизонтально однородной атмосферы (сухой и баротропной). Используются три метода для разделения этих структур и фоновой турбулентности: 1 – короткое время усреднения (STA), 2 – Фурье-разложение в определенной области волновых чисел (FF) и 3 – использование свойств ортогональности выбранного числа мод (POD). Анализ показал, что метод FF наиболее приемлем для решения данной задачи. При этом были рассмотрены два случая: один без среднего потока, другой - со средней скоростью ветра.

Исследование проводилось с использованием численного кода PALM (Raasch and Schröter 2001), позволяющего производить вихреразрешающее моделирование атмосферы на сложной форме поверхности Земли. Большим преимуществом данного кода является развитая версия для параллельных вычислений и вычислений и даже в последних версиях с использованием графических процессоров.

Показано, что примерно 85% вертикального потока потенциальной температуры и около 72% потока кинетической энергии переносится плавучими структурами в обоих случаях. Соответствующий процент для изменения потенциальной температуры составляет 81% в случае с нулевым средним ветром и 76% при наличии среднего ветра. Структуры отвечают за 94% момента импульса в перемешанном слое средней части среднего ветра. В

приповерхностном слое фоновая турбулентность, как правило, важнее вклада структур. Подробно проанализирован бюджет потока потенциальной температуры, и показано, что в основном он определяется структурами, а также взаимодействием между структурами и фоновой турбулентностью.

Слияние конвективных плавучих струек (структур) можно интерпретировать, как перенос энергии от мелкомасштабных движений к крупномасштабным, т.е. так называемый обратный каскадный перенос энергии, ведущий к возникновению конвективных когерентных структур, присутствие которых радикально изменяют процессы переноса, и, соответственно, модели турбулентного переноса в планетарном пограничном слое (ППС).

Список литературы:

1. Brunet et al., 2015 The quiet revolution of numerical weather prediction Nature 525, 47–55
2. Chorin A. 1968 Numerical solution of the Navier–Stokes equations. Math Comput 22:745–762
3. Deardorff J.W. 1972 Theoreticale expression for the counter-gradient vertical heat flux// J.Geoph.Res., V.77 p.5 900-5909.
5. Deardorff J.W. 1972: Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layer//J.Atmos.Sci. V.29.p.91.
6. Elperin et al.2006:Tangling turbulence and semi-organized structures in convective boundary layer//Boundary-Layer Meteorolol, V.119.p.449-472.
7. Kader & Yaglom. 1990: Mean field and fluctuation moments in unstably stratified turbulent boundary layers//J.Fluid.Mech..V.212.p.637-662.
8. Hellsten and Zilitinkevich, 2013:Role of Convective Structures in the Convective Boundary Layer// Boundary-Layer Meteorol .V.149:p.323–353
9. Monin & Obukhov. 1954:Основные закономерности турбулентного перемешивания в приземном слое атмосферы//Труды Геофизического института. Т.24.с.163-187.
10. Sorbjan Z. 198: Structure of the Atmospheric Boundary Layer// Prentice Hall. 318 p.
11. Raasch S, Schröter M (2001) PALM—a large-eddy simulation model performing on massively parallell computers. Meteorol Z 10(5):363–372.
13. Zilitinkevich S.S. Deardorff J.W. 1973:Smilarity theory for the planetary boundary layer of time-dependant height// J.Atmos.Sci, V.31.P.1449-1452.
14. Zilitinkevich et al. 2006:The influence of large cjnvective eddies on the surface-layer turbulence//Q.J.R.Meteorol.Soc., V.132.P.142or layer.6-1452.
15. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S., 2016: Closure schemes for stratified atmospheric flows without turbulence cutoff. J. Atmos. Sci. 73 , No. 12 , pp. 4817-4832 (doi: 10.1175/JAS-D-16-0101.1).
16. Esau I., Wolf T., Kadantsev E., Zilitinkevich S., 2016: On decay power law exponent of residual shear-free convection. Environmental Fluid Mechanics. Submitted.
17. Zilitinkevich S.S., Kleorin, N., Rogachevskii, 2017a: EFB closure theory for stratified PBLs revisited. Atmospheric Chemistry and Physics. Submitted.
18. Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Troitskaya Yu., 2017b:Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stratified flows. Atmospheric Chemistry and Physics. Submitted.

2. Разработка оптимальной, не требующей значительных вычислительных затрат версии новой модели замыкания для турбулентных потоков для сильно-устойчиво-стратифицированной свободной атмосферы (и океана).

В последнее время проблема турбулентного замыкания для устойчиво-стратифицированных потоков является весьма актуальной и обсуждается большим числом авторов. Большинство замыканий, используемых в атмосферных моделях, основано на

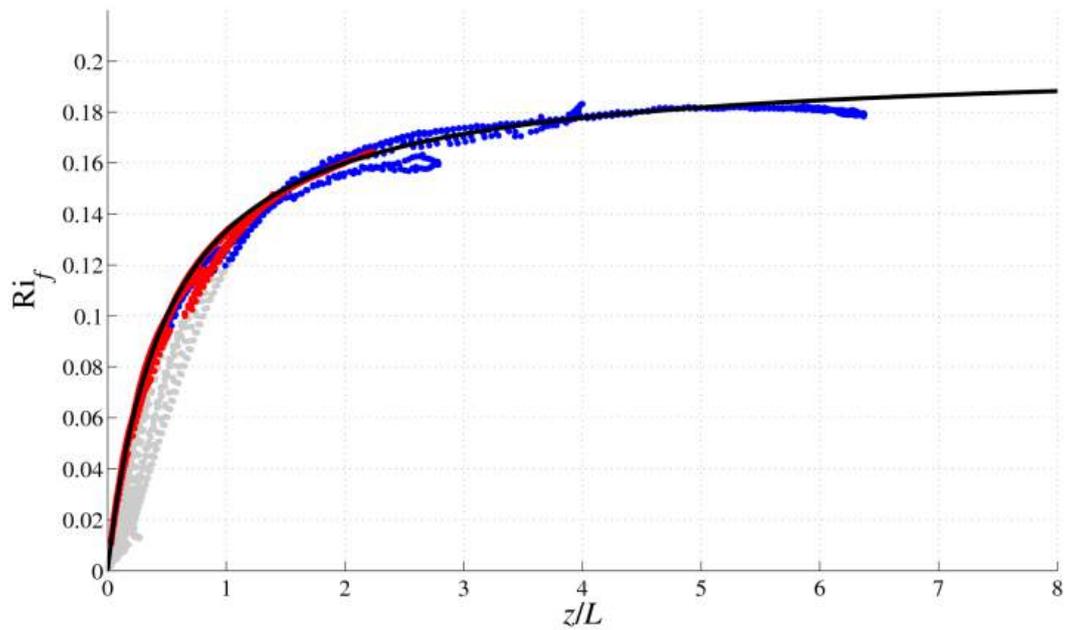
уравнении баланса кинетической энергии турбулентности и гипотезе о градиентном переносе. Эта теория, разработанная для нейтрально стратифицированных турбулентных течений не применима для сильно-устойчивой стратификации. В соответствии с планом, заявленным в данном проекте, разработаны две версии турбулентного замыкания для устойчивой стратификации, соответствующие асимптотически линейной зависимости турбулентного числа Прандтля от градиентного числа Ричардсона: обычная – в терминах одноточечных статистических моментов, и спектральная.

Список литературы:

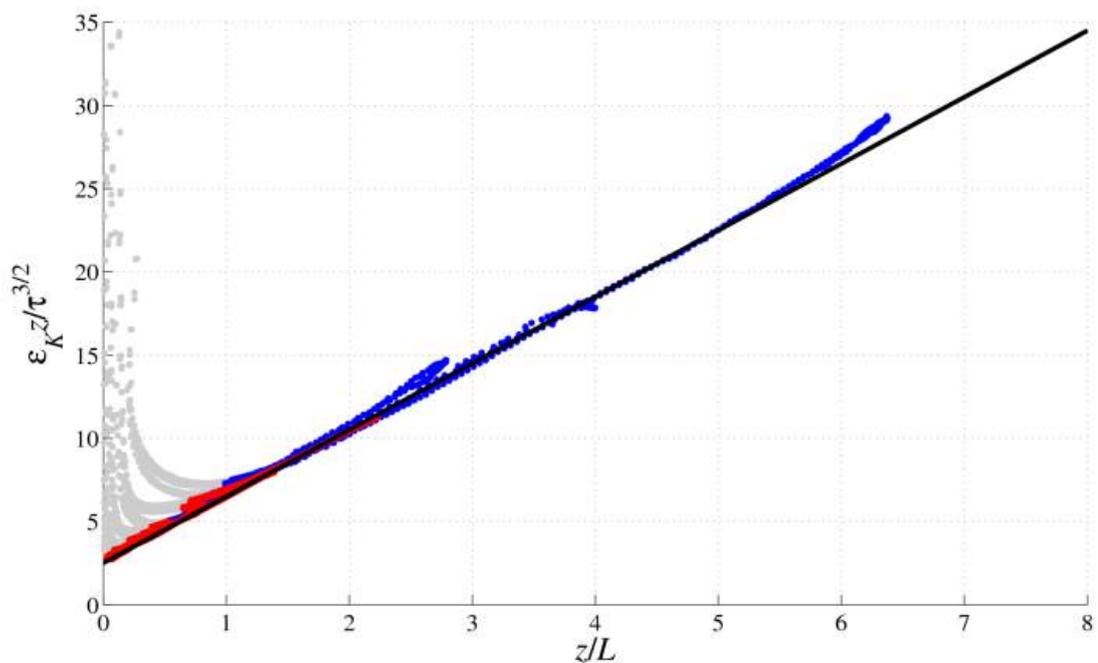
1. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S., 2016: Closure schemes for stratified atmospheric flows without turbulence cutoff. *J. Atmos. Sci.* **73**, No. 12, pp. 4817-4832 (doi: 10.1175/JAS-D-16-0101.1)
2. Esau I., Wolf T., Kadantsev E., Zilitinkevich S., 2016: On decay power law exponent of residual shear-free convection. *Environmental Fluid Mechanics*. Submitted.
3. Zilitinkevich S.S., Kleerorin, N., Rogachevskii, 2017a: EFB closure theory for stratified PBLs revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Submitted.

3. Получение универсального критерия турбулентно-ламинарного перехода, обобщающего известные критерии для конкретных типов потоков.

В рамках подхода, предложенного в предыдущем пункте, получен критерий перехода от турбулентного к ламинарному течению с учетом подавления турбулентности как вязкостью ("числом Рейнольдса") так и стратификацией ("числом Ричардсона") (Li et al., 2016). Новый критерий сформулирован в терминах эффективного числа Рейнольдса, основанного на масштабе длины L для устойчивой стратификации. Этот масштаб был получен в рамках EFB замыкания для устойчивой стратификации и всесторонне проверен по экспериментальным данным и результатам прямого численного моделирования (Zilitinkevich et al., 2017b). На рисунке 1а показана зависимость потокового числа Ричардсона Ri_f от безразмерной высоты, полученная в результате DNS устойчиво стратифицированного стационарного турбулентного течения Куэтта, и в результате расчетов в рамках предложенной теоретической модели. Здесь суммарные (турбулентные + молекулярные) вертикальные потоки импульса и потенциальная температура постоянны с высотой, что обеспечивает точное определение для Ri_f и L . При этом расчеты проводятся для режима развитой турбулентности, для которой молекулярный перенос пренебрежимо мал по сравнению с турбулентным переносом, так что турбулентные потоки практически совпадают с полными потоками. Так обстоит дело и в расчетах DNS, проведенных в рамках данного проекта, за исключением узкого приповерхностного переходного вязкого подслоя: $0 < z < 50\nu/\tau^{1/2}$. Данные для этих слоев показаны на рисунке серыми точками. Теоретическая кривая строится с учетом обычного значения константы фон Кармана, $k=0,4$, а уточненное значение $R_\infty = 0.2$ получено из наилучшего соответствия уравнения $Ri_f = (kz/L)/(1+kR_\infty^{-1} z/L)$, $z/L = (R_\infty/k) Ri_f / (R_\infty - Ri_f)$ и данных DNS. Чтобы контролировать точность численного моделирования, были использованы два разных кода DNS: ИВМ-РАН (красные точки) и ИПФ-РАН (синие точки), которые демонстрируют вполне удовлетворительные результаты. На рисунке 1б показаны данные DNS безразмерной скорости диссипации, как функции безразмерной высоты, вместе с теоретической кривой, построенной по формуле (12) значение постоянной Кармана $k=0,4$ и значение $R_\infty=0,2$ (получено в результате сравнения с данными DNS). Результаты теоретических расчетов очень хорошо согласуются с данными DNS, обеспечивая тем самым подтверждение используемой теории.



(a)



(б)

Рис. 1. (а) Зависимость потокового числа Ричардсона, Ri_f , от безразмерной величины z/L , где L – масштаб длины Обухова, в течении Куэтта по результатам экспериментов с двумя DNS-кодами (для прямого численного моделирования турбулентности): ИВМ-РАН (красные точки) и ИПФ-РАН (синие точки). Серые точки относятся к приповерхностному вязко-турбулентному переходному слою: $0 < z\sqrt{\tau}/\nu < 50$, где ν - кинематическая вязкость, τ - суммарный (вязкий + турбулентный) вертикальный турбулентный поток количества движения. Черной сплошной линией показана наша теоретическая модель при стандартном значении постоянной Кармана $k=0.4$ и эмпирическом значении максимального потокового числа Ричардсона $R_\infty = 0.2$, полученном по данным DNS. (б) Зависимость скорости диссипации КЭТ от z/L (обозначения те же).

Список литературы:

4. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S., 2016: Closure schemes for stratified atmospheric flows without turbulence cutoff. *J. Atmos. Sci.* **73**, No. 12, pp. 4817-4832 (doi: 10.1175/JAS-D-16-0101.1)
5. Esau I., Wolf T., Kadantsev E., Zilitinkevich S., 2016: On decay power law exponent of residual shear-free convection. *Environmental Fluid Mechanics*. Submitted.
6. Zilitinkevich S.S., Kleerorin, N., Rogachevskii, 2017a: EFB closure theory for stratified PBLs revisited. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Submitted.
7. Zilitinkevich S., Druzhinin O., Glazunov A., Kadantsev E., Mortikov E., Troitskaya Yu., 2017b: Dissipation rate of turbulent kinetic energy in stratified flows. *Atmospheric Chemistry and Physics*. Submitted.

4. Разработка алгоритма прямого численного моделирования (DNS) воздушного пограничного слоя над водной поверхностью сложной формы, содержащей спектр поверхностных волн. Исследование методом DNS влияния формы спектра поверхностных волн на явление отрыва воздушного потока.

Разработан алгоритм прямого численного моделирования турбулентного воздушного потока над взволнованной водной поверхностью с заданным спектром возвышений. Проведены тестовые расчеты DNS для случая, когда на основную, энергонесущую волну наложена мелкомасштабная рябь с амплитудой, малой по сравнению с амплитудой энергонесущей волны. При этом рассмотрены различные виды спектров ряби (рис.2).

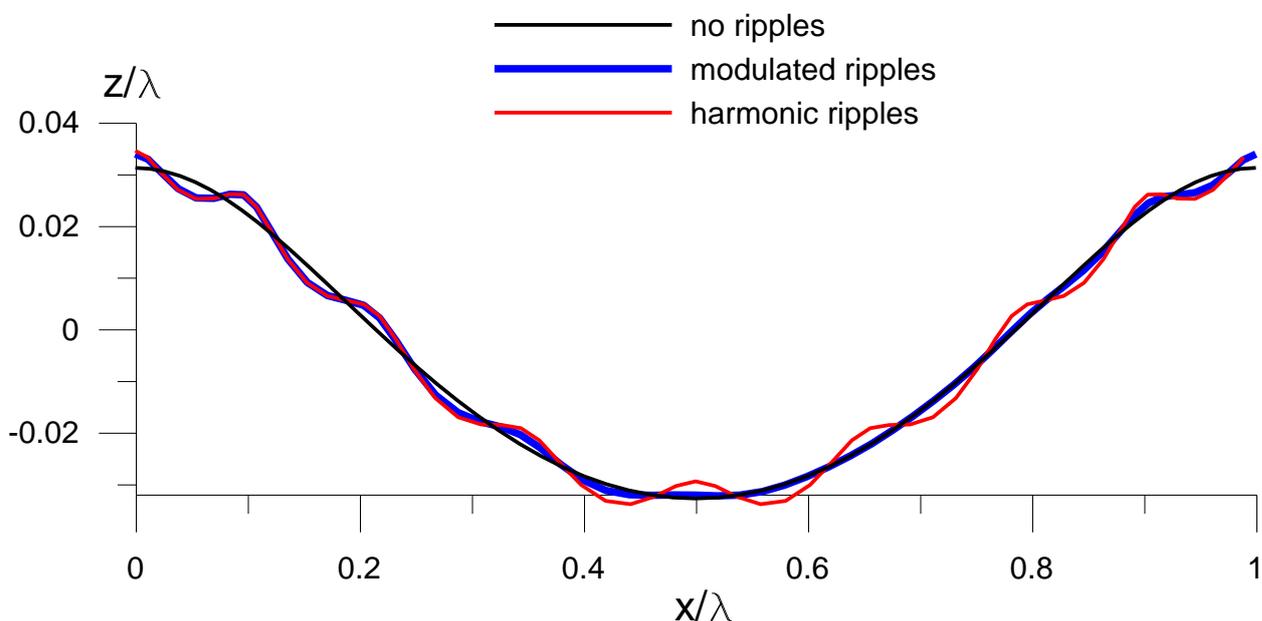


Рис.2. Различные формы возвышений водной поверхности в DNS на периоде энергонесущей волны.

Получены мгновенные поля скорости и завихренности воздушного потока, и проведено осреднение по ансамблю (т.е., по времени, поперечной координате и длине волны). Показано, что мгновенные распределения скорости ветра характеризуются присутствием точек отрыва воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля остаются безотрывными для различных видов спектров возвышений водной поверхности.

5. Лабораторное моделирование ветро-волнового взаимодействия и изучение процессов обмена турбулентного обмена в широком диапазоне скоростей ветра и параметров волнения, в том числе в присутствии длинных волн (генерируемых волнопродукторами), на одной из экспериментальных установок мирового уровня (США, Франции или Германии).

На данном этапе проекта были продолжены эксперименты по изучению процессов ветро-волнового взаимодействия в рамках лабораторного моделирования на уникальных экспериментальных стендах: кольцевом канале AEOLOTRON университета Гейдельберга и одном из крупнейших прямоточных ветро-волновых каналов - LASIF университета Марселя. В рамках работ на предыдущих этапах проекта на обеих установках были успешно освоены методики Particle Image Velocimetry с использованием эффективной дымовой визуализации, что позволило участникам проекта проводить измерения полей скорости с высокой точностью и пространственным разрешением. Основным направлением текущих исследований стало изучение распределения давления над взволнованной поверхностью, включая условия сильных ветров с регулярным обрушением. Распределение давления необходимо для нахождения важнейшей характеристики - ветровой накачки. Его контактные измерения (в основном с помощью диска Эллиота) в непосредственной близости от водной поверхности весьма кропотливы и сложны, особенно для случая сильно обрушающихся волн. В работе [Troitskaya et al. JPO 2011] был предложен и опробован способ получения распределения давления на основе полей скорости путем интегрирования выражения, полученного из усредненного по флуктуациям уравнения Навье Стокса с учетом кинематического граничного условия в квазидвумерном приближении. В отличие от предыдущего исследования, где создавались слабообрушающиеся (gentle spilling) волны при сравнительно небольших ветрах (до 5 м/с), в рамках настоящего проекта были выполнены две экспериментальные кампании в которых достигались условия регулярного интенсивного обрушения волн с образованием пенных гребней. Путем выбора оптимальных значений глубины и скорости ветра на установке AELOTRON был подобран режим с наиболее стабильной формой волны и регулярным обрушением. При этом наблюдалась достаточно сильная модуляция. При выходе на стационарный режим пакет насчитывал 5-6 волн, в котором они обычно регулярно обрушались с максимальной амплитудой. PIV-измерения выполнялись последовательно на трех уровнях с перекрытием окон наблюдения для возможности измерения от впадины волны до высоты 10 см над гребнями, вся область составляла более 50 см. На прямоточном LASIF шириной 3 м для получения квазидвумерной регулярно обрушающейся волны в области наблюдения на расстоянии 26 м от начала канала, необходимо было использовать волнопродуктор, т.к. чисто ветровые волны в условиях данного разгона имеют трехмерную структуру. Параметры работы волнопродуктора (амплитуда, частота) подбирались таким образом, чтобы волны были достаточно крутые и регулярно обрушающиеся, а с другой стороны не успевала развиться модуляционная неустойчивость до области наблюдения. Измерения в обоих случаях проводились с помощью специальной высокоскоростной камеры Dimax с непрерывной лазерной подсветкой, уровень поверхности контролировался с помощью специального лазерного датчика ЛНС. Полученные мгновенные поля скорости подвергались обработке с целью получения осредненных с учетом фазы средних полей скорости, а также турбулентного потока импульса.



Рис. 3. Общий вид изнутри канала LASIF.

Далее они использовались для вычисления распределения давления. В качестве предварительных тестов, методика восстановления давления была опробована на известных полях скорости и распределения давления, полученных при прямом численном моделировании DNS воздушного потока над взволнованной поверхностью.

Значительным достижением в рамках настоящего проекта является развитие международной коллаборации с участием российских ученых, и проведение на заключительном этапе совместных исследований на крупнейшем в мире ветро-волновом канале Surge Structure Atmosphere Interaction (SUSTAIN) университета Майами. На нем возможно создание скорости 62 м/с в максимально возможных сечениях ветро-волнового канала (6x2 м), а также использование соленой морской воды во всем объеме. С использованием разработанной участниками проекта методики исследования процессов обрушения и генерации брызг на основе высокоскоростной видеосъемки и подводной теневой подсветки была выполнена серия экспериментов, в которой принимали участие сотрудники университета Гейдельберга.

Список литературы:

Yu. Troitskaya, D. Sergeev, O. Ermakova, G. Balandina. Statistical parameters of the air turbulent boundary layer over steep water waves measured by the PIV technique // Journal of Physical Oceanography 41 (8), 1421-1454, 2011.

6. Обобщение данных лабораторных и натуральных экспериментов, а также результатов численного моделирования турбулентного погранслоя над поверхностными волнами с помощью вихреразрешающих моделей. На основании этого будет предложена параметризация переноса тепла и импульса в пограничном слое атмосферы, применимая при широком спектре метеоусловий.

В ходе завершающего этапа проекта выполнено обобщение результатов натуральных и лабораторных исследований процессов обмена импульсом в пограничных слоях атмосферы и гидросферы. По результатам многочисленных натуральных измерений проведенных в ходе экспедиционных работ в рамках настоящего проекта в период 2015-2017 г.г. был получен большой массив данных измерений характеристик ветра (скорости трения, коэффициента обмена импульсом) на основе метода профилирования с помощью уникальной автономной станции на базе вехи Фруда, оборудованной двухкомпонентными ультразвуковыми измерителями скорости, установленными на разных горизонтах. Была получена зависимость коэффициента обмена импульса в диапазоне эквивалентных скоростей ветра на 10-м высоте от 0 до 12 м/с, для которой была предложена нелинейная аппроксимация, учитывающая ее немонотонный характер. В то же время в широкой серии лабораторных экспериментов, выполненных в первую очередь на Высокоскоростном Ветро-Волновом Термостратифицированном Бассейне были получены данные о зависимости коэффициента обмена импульсом в диапазоне скоростей эквивалентных скоростей ветра от 11 до 45 м/с. При этом основным методом исследования было определение скорости трения и коэффициента аэродинамического сопротивления по измерениям профиля средней скорости (с помощью Пито) над взволнованной поверхностью. Однако в отличие от случаев неискаженного профиля в натуральных условиях, при лабораторном моделировании использовалась теория автомодельности, полученная ранее для аэродинамических труб и развитая позднее авторами проекта, для ветро-волновых каналов. Корректность восстановления значений с использованием свойства автомодельности проверялась на основе данных об измерении полей скорости воздушного потока, полученных с помощью методов PIV. Получение статических ансамблей полей скорости позволяет найти профили не только средней скорости, но турбулентного потока импульса, а значит, и непосредственно вычислить скорость трения (квадратный корень из сдвигового напряжения, деленного на плотность). Подобное сопоставление результатов контактных измерений с помощью Пито и оптических с помощью PIV было выполнено не только на ВВТСБ, но и на одном из наиболее крупных ветро-волновых каналов LASIF университета Марселя, где создается безнапорный поток. Натурные данные и результаты лабораторного эксперимента дополняют друг друга обеспечивая перекрытие диапазона от 0 до 45 м/с.

7. Исследование эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы.

Для исследования эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. Модель WRF позволяет рассчитывать поля скорости ветра с высоким пространственным разрешением. Для использования модели WRF были подгружены географические данные «modis_lakes» для четырех вложенных доменов с минимальным размером ячейки четвертого домена 1 км. Осуществлено извлечение данных GMTED2010 формата GEOTIFF с разрешением 250 м, данные будут использованы в пятом домене. В качестве начальных метеорологических данных были использованы данные “NCEP Final Analysis (FNL from GFS) (ds083.2)” с разрешением 1° .

В указанных настройках модели WRF была исследована эффективность использования моделей приповерхностного слоя атмосферы. Расчеты поля скорости ветра над акваторией водоема были реализованы с подключением различных параметризаций. Во-первых, с подключением параметризации Yonsei University scheme (YSU) для планетарного пограничного слоя (ППС) и схемой для приповерхностного слоя,

основанной на теории подобия Монина - Обухова с учетом вязкого подслоя в форме Карлсона – Боланда. Во-вторых, Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) схема ППС и схемой для приповерхностного слоя, основанной на теории подобия Монина - Обухова с длиной термической шероховатости в форме Зилитинкевича. Кроме того, были проведены расчеты скорости ветра при отключенной параметризации ППС, но с учетом турбулентных потоков (вихреразрешающее моделирование).

Результаты расчетов сравнивались с натурными измерениями на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вежи Фруда. Вежа представляет собой полупогруженную в воду мачту общей длиной 12 метров, удерживаемую в вертикальном положении грузом на глубине и плавучей секцией вблизи поверхности. За счёт малого сечения (18.7 см^2) и большой массы (около 28 кг) достигается низкая частота резонансных вертикальных колебаний - 0,16 Гц, что в 5-8 раз меньше частоты наблюдаемых энергонесущих волн. За счёт этого вежа остаётся неподвижной относительно среднего уровня взволнованной поверхности воды, что позволяет использовать расположенную на ней систему струнных волнографов для регистрации ветрового волнения. По записям волнения с системы струнных волнографов были восстановлены пространственно-временные направленные спектры волнения. Кроме этого, вежа оснащена линейкой акустических датчиков скорости ветра WindSonic производства Gill Instruments, расположенных на нескольких горизонтах: 0.75, 1.2, 2.4, 5.3 м от среднего уровня воды. Пятый датчик скорости располагается на отдельном поплавке, связанным с вежей, но отслеживающем форму поверхности, что позволяет проводить измерения в непосредственной близости к поверхности, в том числе во впадинах волн (высота области измерения - 10 см). Аппроксимация измеренного среднего профиля скорости ветра автоматической функцией позволила определить величину коэффициента аэродинамического сопротивления водной поверхности и его зависимость от скорости ветра, приведенной к стандартной метеорологической высоте 10 м.

8. Исследование эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.

Исследована эффективность алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза ветра и волнения.

Усвоение данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW реализовано при помощи «целевого анализа» OBSGRID. Результаты работы модуля OBSGRID позволяют предоставлять поля для начальных и граничных условий, улучшить качество прогноза расчетных полей, обеспечить вывод ASCII и netCDF для контроля качества усвоения данных.

Ассимиляция данных в расчетную модель WRF произведена из базы, накопленной в результате натурных измерений профиля ветра на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вежи Фруда.

Воздействие экспериментальных данных на расчетные реализовано при помощи стандартной схемы Крессмана, которая приписывает каждому наблюдению круговой радиус влияния R. Поле «первой догадки» в каждой точке сетки R корректируется с учетом всех наблюдений, которые оказывают влияние на R. Далее вычисляется разность между полем первой догадки и наблюдениями, и средневзвешенная разность значений добавляется к значению первой догадки в R. После корректировки всех полей обновленное поле используется в качестве "первой догадки" для цикла другой корректировки. Последующие проходы используют меньший радиус влияния. Иллюстрация схемы показана на Рис.4.

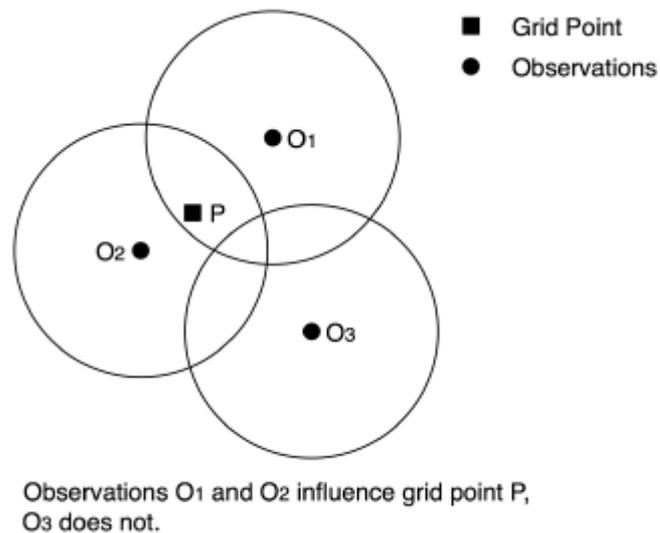


Рис.4. Стандартная схема Крессмана ассимиляция данных измерений.

9. Исследование взаимодействия внутренних волн с турбулентностью в атмосфере в условиях устойчивой стратификации в рамках модели для турбулентности, основанной на уравнениях баланса импульса и энергии.

На основе предложенной ранее и развиваемой в ходе выполнения данного проекта теории турбулентного замыкания (Li D et.al., 2016, Zilitinkevich et.al,2006,2017), основанной на уравнениях баланса для кинетической энергии турбулентности, потенциальной энергии турбулентности, вертикального потока плавучести, а также турбулентного масштаба времени, исследованы особенности взаимодействия внутренних волн с турбулентностью в условиях устойчивой стратификации. Согласно этой теории помимо обычной турбулентности с каскадом кинетической энергии турбулентности по направлению от больших вихрей к малым, присутствует и тип движения, который характеризуется обратным каскадом - от меньших вихрей к большим, приводящий к образованию крупномасштабных структур. Крупномасштабные внутренние гравитационные волны в устойчиво стратифицированной турбулентной среде создают дополнительный вертикальный поток импульса и дополнительные потоки турбулентной кинетической энергии, турбулентной потенциальной энергии и турбулентного потока потенциальной температуры. Это приводит к особенностям даже для стационарного однородного режима турбулентности. Например, в ряде зависимостей, характеризующих поведение стационарной турбулентности, которые ранее были универсальными, например зависимость энергетического числа Ричардсона от градиентного числа Ричардсона, или зависимость турбулентного числа Прандтля от числа Ричардсона, появляется дополнительный параметр - энергия (или поток энергии) внутренней волны (Yu. I. Troitskaya et.al 2017, Zilitinkevich et.al., 2017). Это приводит к уменьшению потока потенциальной температуры, изменению анизотропии турбулентности и другим особенностям в поведении турбулентности в областях с устойчивой стратификацией.

1. Li D., Katul G.G., Zilitinkevich S., 2016: Closure schemes for stratified atmospheric flows without turbulence cutoff. *J. Atmos. Sci.* 73 , No. 12 , pp. 4817-4832 (doi: 10.1175/JAS-D-16-0101.1)

2. Esau I., Wolf T., Kadantsev E., Zilitinkevich S., 2016: On decay power law exponent of residual shear-free convection. *Environmental Fluid Mechanics*. Submitted.

3. Zilitinkevich S.S., Kleerorin, N., Rogachevskii, 2017: EFB closure theory for stratified PBLs revisited. Atmospheric Chemistry and Physics. Submitted.
4. Troitskaya Yu.I et.al., 2017. The model of turbulent transfer and dynamics of small-scale turbulence in the stratified fluid Conference on Computer Simulation in Physics and beyond October 9-12, 2017, Moscow, Russia.

1.4. Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном году

1. Теория замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термик, присущих приповерхностному сдвиговому подслою конвективного ППС. Обобщенная теория, численные модели и методы расчета основных свойств сухого конвективного ППС.

Предложен метод разделения турбулентности на крупномасштабные конвективные структуры и фоновую турбулентность. Проведен численный анализ методом вихререзающего моделирования уравнений Навье-Стокса для горизонтально однородного сухого и баротропного ППС. Метод выделения конвективных турбулентных структур на фоне турбулентности включает в себя усреднение по малому времени (STA), Фурье разложение (Фурье фильтрацию) в определенном диапазоне волновых чисел (FF), разложение по ортогональным модам POD. Сделан вывод о том, что метод FF является наиболее подходящим для количественной оценки роли и относительной важности конвективных структур при их взаимодействии с фоновой турбулентностью в соответствующих областях ППС при наличии (отсутствии) сдвиговых течений. Проведена оценка вклада соответствующих структур в поток потенциальной температуры, дисперсии, в поток импульса, а также в поток кинетической энергии турбулентности. Сделан вывод об их доминирующем вкладе в бюджет потока потенциальной температуры. Выбор ширины области волновых чисел в методе FF остается в значительной степени произвольным.

Проведенный анализ показал, что примерно 85% вертикального потока потенциальной температуры переносится структурами в ППС в обоих случаях (как при наличии потока, так и без него). Именно структуры отвечают за 72% кинетической энергии в перемешанном слое в обоих случаях. Процентное соотношение вклада структур для вариации потенциальной температуры составляет 81% в случае с нулевым средним ветром и 76% при наличии среднего (по величине) ветра. Структуры ответственны и за 94% потока импульса в перемешанном слое при наличии среднего (по величине) ветра. Эти результаты согласуются с результатами Гринхут и Хальса (1982, 1987). В приповерхностном слое ППС фоновая турбулентность обычно более важна, чем структурный вклад в обоих исследованных случаях.

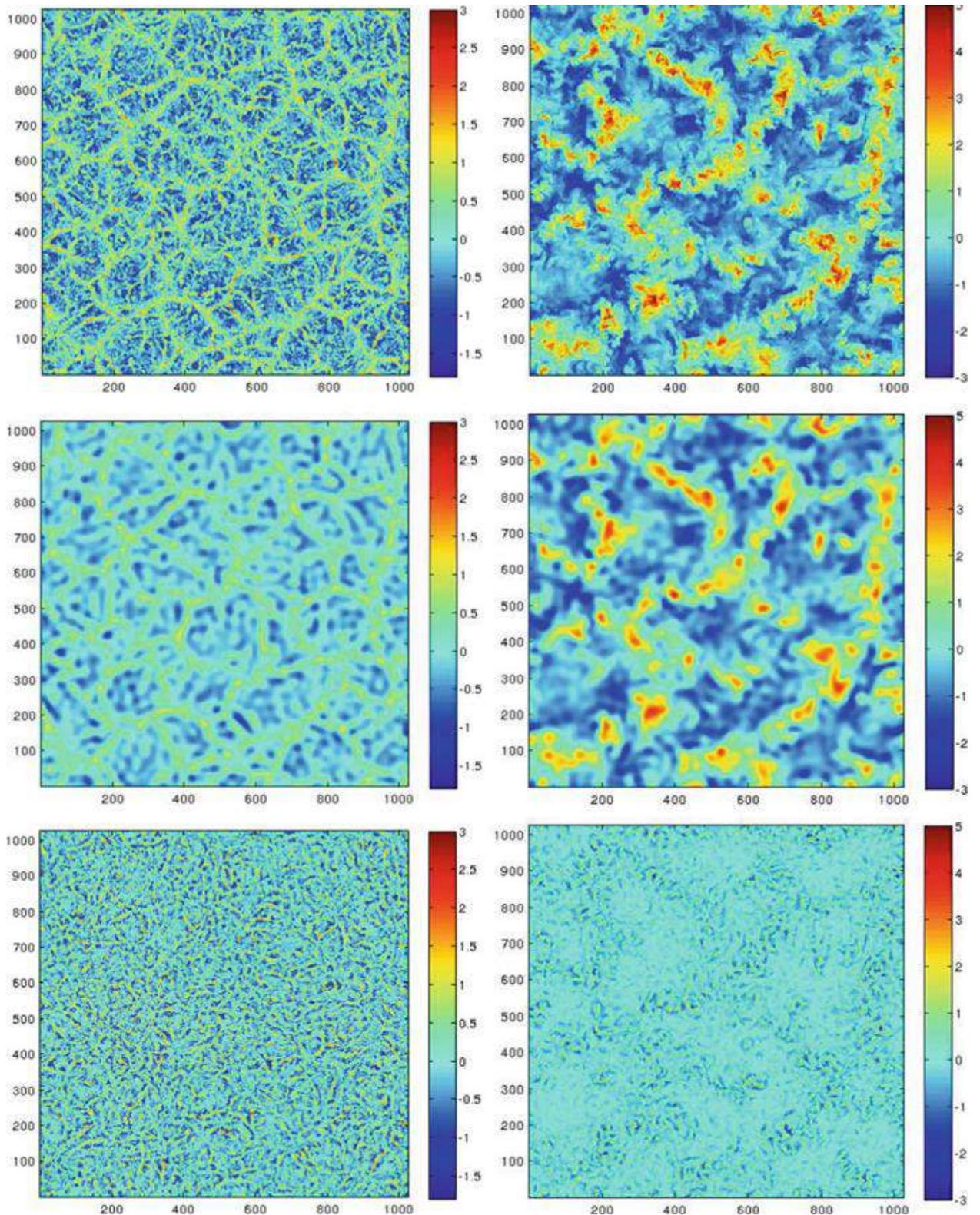


Рис. 5. Вертикальные поля скорости в м/с на горизонтальной плоскости при высотах $z/z_i = 0.04$ (левая панель) и $z/z_i = 0.56$ (правая панель). Мгновенные значения полной вертикальной скорости (верхний ряд), структурная часть (средний ряд) и часть, связанная с фоновой турбулентностью (нижний ряд).

На рис. 5 показано мгновенное вертикальное поле скоростей (суммарное) и разложенное на структуры и фоновую турбулентность в нижнем приповерхностном слое ППС при

$z/z_i=0.04$, и (для сравнения) также в верхнем перемешанном слое при $z/z_i = 0,56$. У поверхности вертикальное поле скоростей, очевидно, содержит когерентные сетчатые структуры, состоящие из узких нитей. Однако их амплитуда мала по сравнению с фоновой турбулентностью, которая действительно выглядит довольно некогерентным и случайным образом. В верхнем перемешанном слое ситуация иная: амплитуда структур существенно превышает фоновую турбулентность.

2. Оптимальная версия новой теории замыкания для сильно-устойчивой стратификации (с числами Ричардсона, намного превышающими критическое значение $Ri = 0.25$).

Разработана оптимальная версия новой теории EFB замыкания в условиях сильно-устойчивой стратификации (с числами Ричардсона, намного превышающими критическое значение $Ri = 0.25$) для атмосферного конвективного пограничного слоя с использованием модели EFB, включающей в себя набор уравнений баланса для моментов второго порядка. Основными уравнениями EFB-модели являются уравнения для потока импульса, потока тепла, турбулентной кинетической энергии и турбулентной потенциальной энергии в приближении Буссинеска. EFB модель учитывает и позволяет оценить отрицательную обратную связь между турбулентной кинетической энергией (ТКЭ) и турбулентной потенциальной энергией (ТПЭ), что предотвращает вырождение турбулентности в условиях сильно стратифицированной жидкости. Отрицательный поток плавучести преобразует часть ТКЭ в ТПЭ и таким образом, уменьшает ТКЭ и увеличивает ТПЭ. В результате увеличения ТПЭ возникает положительный вклад в поток плавучести и, следовательно, ослабляется общий отрицательный поток плавучести, что в дальнейшем приводит к восстановлению ТКЭ и предотвращает дегенерацию или коллапс турбулентности. Основные особенности модели замыкания в рамках EFB заключаются в следующем: 1) уравнение для коррелятора $\langle u'\theta' \rangle$ в явном виде не решается, хотя в уравнении для потока импульса он включен в член, описывающий перераспределение давления 2) уравнение для коррелятора $\langle w'w' \rangle$ так же не решается; вместо этого используется общее уравнение для турбулентной кинетической энергии и параметризуется вертикальная анизотропия, в результате вводится дополнительная константа (C_0). 3) Максимальное потоковое число Ричардсона R_{fm} также определяется эмпирически и включается в список констант в модели EFB. 4) параметризация для декорреляции давления является более простой, чем версия Ротта, используемая в известной модели Mellor-Yamada (MY). EFB параметризация основана на «возврате к изотропии» и требует только одной эмпирической константы (C_p), в отличие от MY, где используется три константы. 5) масштаб длины диссипации в уравнении для турбулентной кинетической энергии предполагается идентичным главному масштабу в MY-модели (таким образом, число констант снова сокращается), однако главный масштаб в модели EFB зависит от устойчивости и требует введения константы (C_v). Константы, предложенные в рамках модели, были получены путем верификации теоретических данных на базе численных расчетов.

3. Универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в устойчиво-стратифицированных турбулентных атмосферных потоках с конечным числом Рейнольдса; теоретические оценки перехода в условиях сильной стратификации в свободной атмосфере и толще океана.

Получен универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в турбулентных атмосферных потоках с устойчивой стратификацией в терминах эффективного числа Рейнольдса, выраженного через масштаб длины, полученный в рамках EFB замыкания для устойчивой стратификации. Проведены теоретические оценки перехода в условиях сильной стратификации в свободной атмосфере и толще океана. Для описания диссипации

турбулентной энергии в терминах градиента средней скорости было использовано уравнение баланса турбулентной кинетической энергии и релаксационное уравнение (для нестационарного случая). Это позволило определить, как диссипация турбулентной энергии зависит от потокового числа Ричардсона в условиях слабых и умеренных устойчивых стратификаций, присущих установившемуся атмосферному пограничному слою. В рамках данного проекта были выполнены расчеты стационарных, устойчиво стратифицированных турбулентных сдвиговых потоков методом DNS в широком диапазоне условий вплоть до сильных стратификаций. Результаты численных экспериментов были сопоставлены с теоретическим анализом уравнения баланса турбулентной кинетической энергии. Было показано, что развитая теория очень хорошо согласуется с данными прямого численного моделирования. Сопоставление теоретических данных и результатов численных расчетов позволило определить количественную асимптотику диссипации турбулентной энергии при больших высотах. В ходе исследований выяснилось, что вид скорости диссипации в условиях слабой и умеренной стратификации, с одной стороны, и в условиях чрезвычайно сильной стратификации, с другой стороны, оказывается одинаковым, в результате, может быть получена универсальная зависимость безразмерной диссипации турбулентной энергии и потокового числа Ричардсона от безразмерной высоты во всем спектре стратификаций от нейтральных до чрезвычайно сильных.

4. Алгоритм DNS воздушного потока над водной поверхностью, содержащей спектр поверхностных волн. Оценка влияния формы спектра поверхностных волн на параметризацию турбулентного переноса импульса и тепла в атмосферном погранслое.

Разработан алгоритм прямого численного моделирования турбулентного воздушного потока над взволнованной водной поверхностью с заданным спектром возвышений. Проведены тестовые расчеты DNS для различных видов спектров, описывающих случай, когда на энергонесущую волну наложена мелкомасштабная рябь с амплитудой, малой по сравнению с амплитудой основной волны. Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости и завихренности воздушного потока (Рис. 6). Показано, что мгновенные распределения скорости ветра характеризуются присутствием точек отрыва воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля являются безотрывными для рассмотренных видов спектров возвышений водной поверхности (Рис. 7).

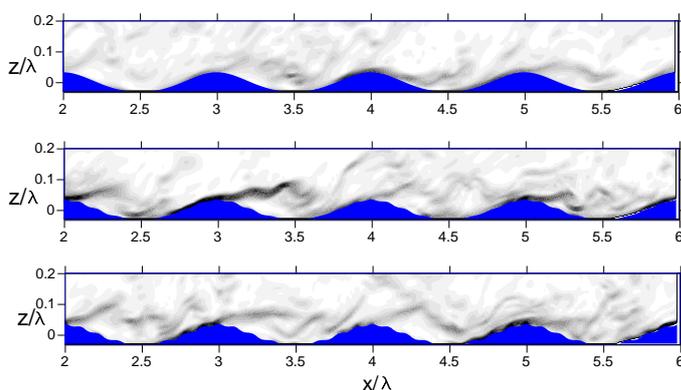


Рис. 6. Мгновенные поля модуля завихренности воздушного потока над взволнованной водной поверхностью при отсутствии ряби (верхняя панель) и для различных спектров ряби в DNS с крутизной энергонесущей волны $ka = 0.2$ и фазовой скоростью $c/U_0 = 0.05$.

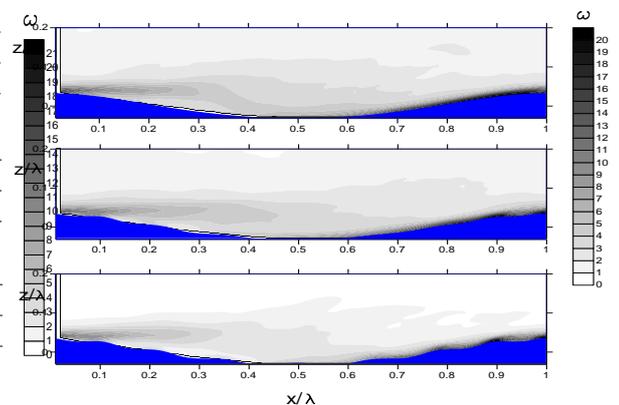


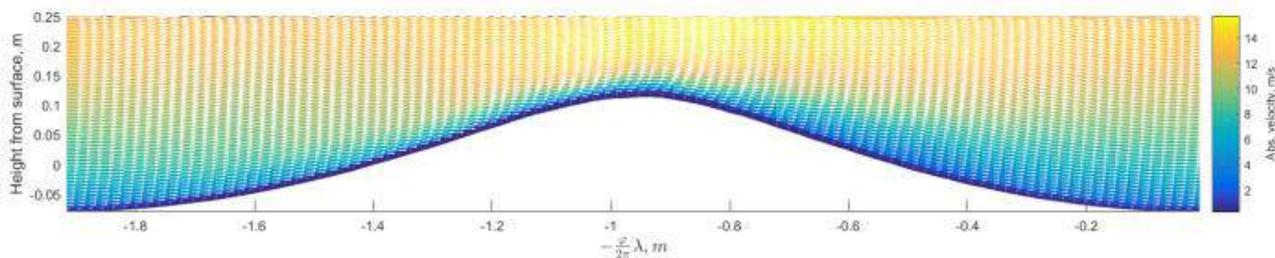
Рис. 7. Поля модуля завихренности полученные осреднением ее соответствующих мгновенных распределений (панели слева) по ансамблю реализаций (т.е., фазовые средние).

5. Результаты измерений параметров, характеризующих турбулентный обмен (сдвиговое напряжение, коэффициент обмена импульсом) в широком диапазоне скоростей ветра и волнения, включая искусственные длинные волны (создаваемые волнопродуктором).

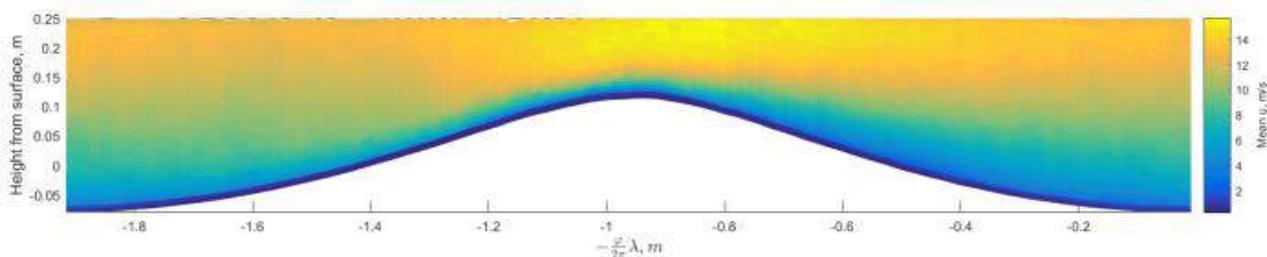
Предложен метод восстановления осредненного по турбулентным флуктуациям поля давления на поверхности воды по измеренным осредненным полям скорости. Метод верифицирован на основе полученных в ходе DNS расчетов воздушного потока над волнами с крутизной 0.2 и соотношением фазовой скорости к скорости трения 0.05, а затем 0.2 (при той же крутизне) (рис.8). Было продемонстрировано удовлетворительное согласие с результатами, полученными непосредственно в ходе расчетов полей распределения давления с помощью DNS. Выявлен минимальный размер области измерения, необходимый для восстановления поля давления по полю скорости.

В серии экспериментов на кольцевом канале AEOLOTRON были получены последовательные поля скорости над взволнованной поверхностью, возвышение которой представляло собой суперпозицию двух гармонических волн с близкими частотами. Предложен алгоритм их обработки, включающий условное осреднение при постоянных фазе и амплитуде волн, входящих в волновой пакет. В серии экспериментов на установке LASIF амплитудная модуляция была незначительной, и проводилось условное осреднение только при постоянной фазе. Были обработаны данные для режима работы волнопродуктора на 0.9 Гц и эквивалентной скорости ветра 14 м/с.

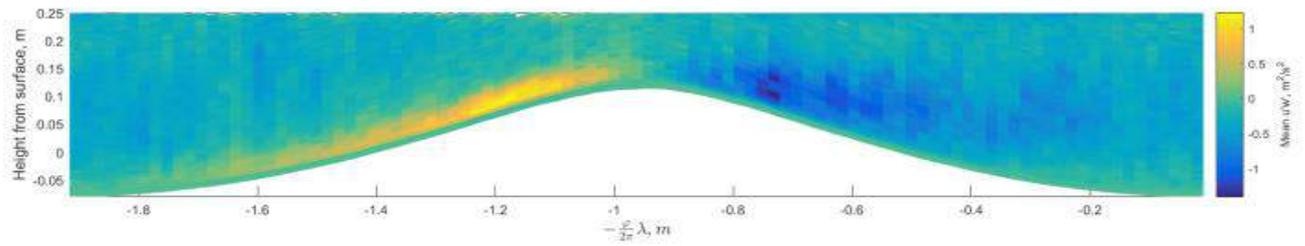
На основе измеренных полей средней скорости и турбулентного напряжения, были успешно выполнены вычисления распределения давления по отработанной на примерах результатов DNS методике (рис.9).



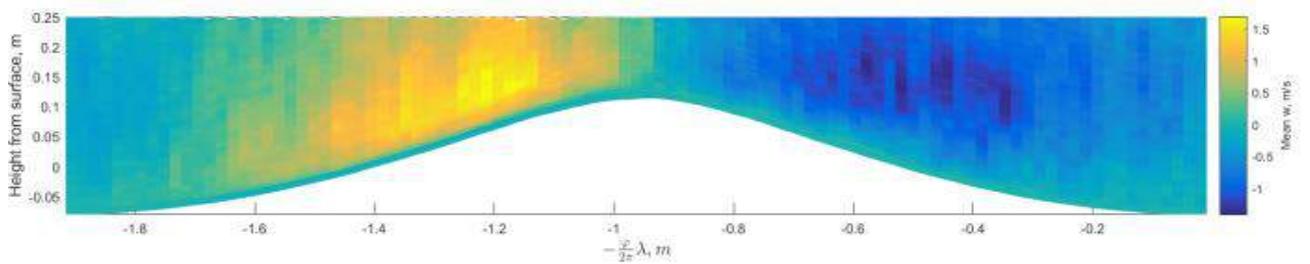
(a)



(б)



(в)



(г)

Рис.8. Демонстрация результатов обработки экспериментов с PIV-измерениями на LASIF
 а) поле среднего модуля скорости с векторами б) средней горизонтальной компоненты скорости б) среднего турбулентного потока импульса г) средней вертикальной компоненты скорости

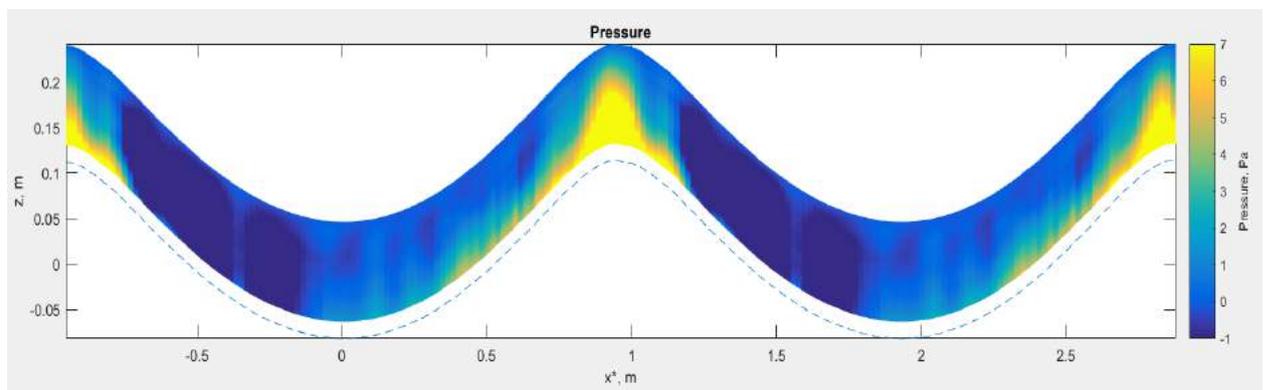


Рис. 9. Восстановленное среднее поле давления.

6. Уточненная на основе данных DNS/LES параметризация переноса тепла и импульса в пограничном слое атмосферы, применяемая при широком спектре метеоусловий.

По результатам натурных измерений была предложена немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления, учитывающая наличие минимума в области эквивалентных скоростей ветра 3-4 м/с, резкий рост при приближении к 0 и плавное возрастание с увеличением скорости ветра:

$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}$$

Несмотря на сильно отличающиеся, на первый взгляд, натурные условия и условия на ветро-волновых каналах, эта зависимость также хорошо описывает полученные в ходе исследований данные лабораторных экспериментов вплоть до скоростей 27 м/с. Начиная с этих скоростей, начинает наблюдаться тенденция к насыщению, что неплохо согласуется

с небольшим количеством имеющихся данных натуральных измерений при сильных ветрах. Поэтому в диапазоне более 27 м/с данные аппроксимируются медленно растущей линейной зависимостью (практически константой):

$$C_D = 0.0015 + 1.24 \cdot 10^{-5} U_{10}$$

Таким образом, в рамках исследований предложена уточненная двухдиапазонная составная балк-формула для параметризации процесса обмена импульсом в широком диапазоне условий.

На основании экспериментальных исследований в ВВБТСБ была получена зависимость коэффициента обмена теплом от скорости ветра (рис.11). На их основе предложена параметризация коэффициента обмена теплом $C_T = 10^{-4} (4.0u_*^2 + 1.5u_* + 5.5)$

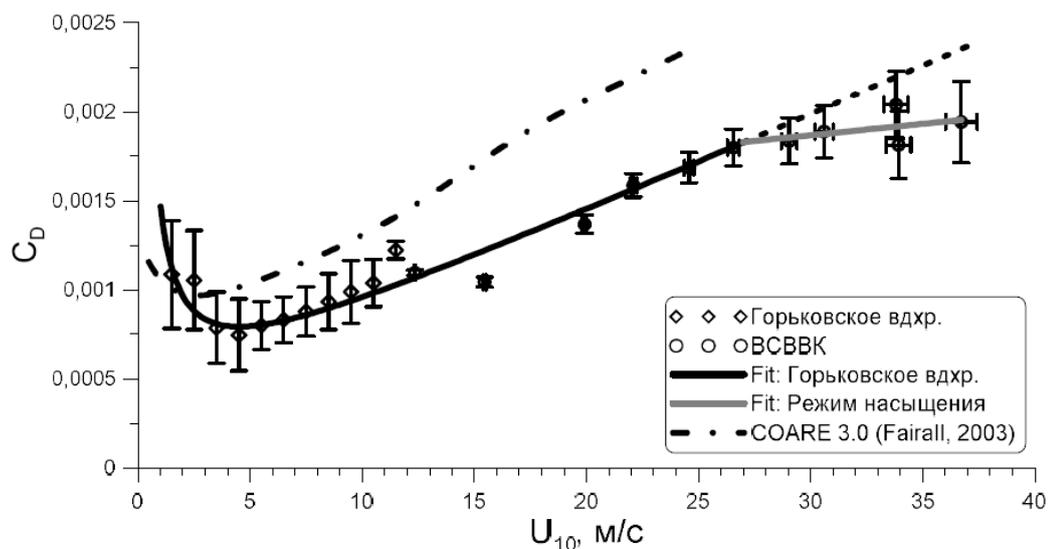


Рис.10. Зависимость коэффициента сопротивления поверхности от скорости ветра. \diamond – натурные данные, \circ – результаты лабораторного моделирования. Черная сплошная линия – аппроксимация натуральных данных, серая линия – линейная аппроксимация режима насыщения при скорости более 27 м/с, штрих-пунктирная линия – эмпирическая модель COARE 3.0.

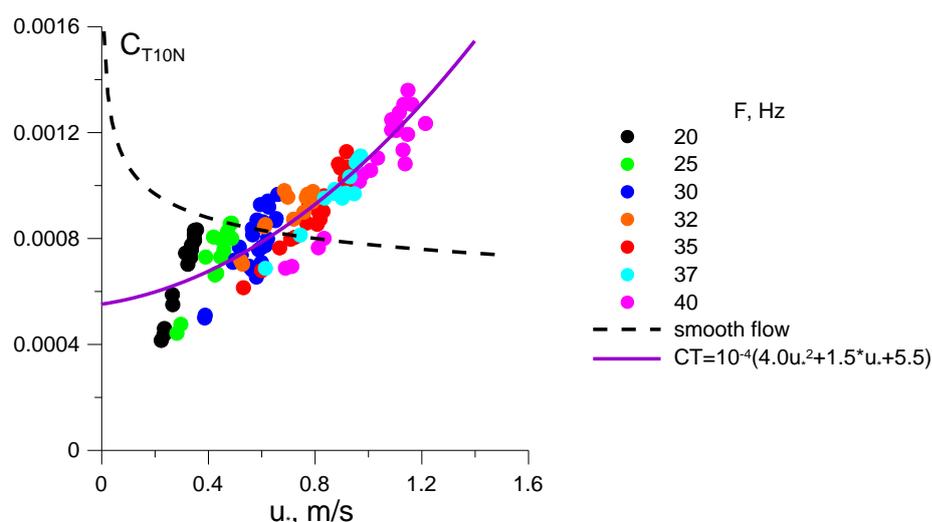


Рис.11 Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости трения воздушного потока. Черные символы соответствуют скорости вентилятора 20 Гц, зеленый - 25 Гц, синий - 30 Гц, оранжевый - 32 Гц, красный - 35 Гц, циан - 37 Гц, пурпурный - 40 Гц.

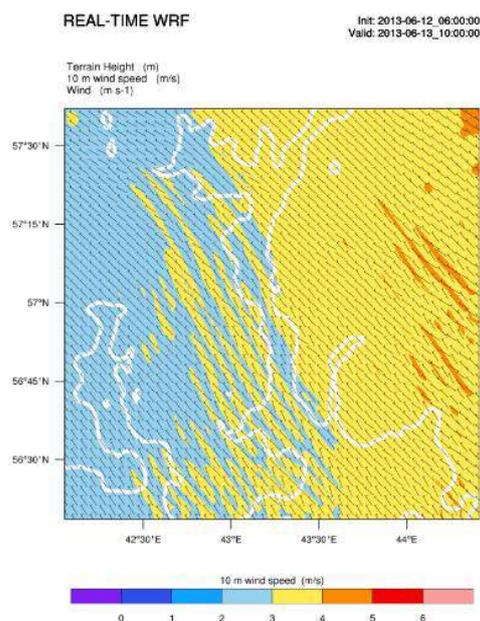
Проведено прямое (DNS) и вихреразрешающее (LES) численное моделирование турбулентного атмосферного пограничного слоя над водной поверхностью в широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации для отношения высоты погранслоя к масштабу Обухова, z/L , $z/L \gg 1$. На основе численных расчетов проведена верификация эмпирических констант в уравнениях для кинетической и потенциальной энергии турбулентности и в выражении для диссипации турбулентной энергии в атмосферном пограничном слое над водной поверхностью. В результате получено универсальное уравнение для кинетической энергии турбулентности, пригодное для описания атмосферного погранслоя, в том числе при сильной устойчивой стратификации (см. рис. 2,3).

7. Оценка эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы.

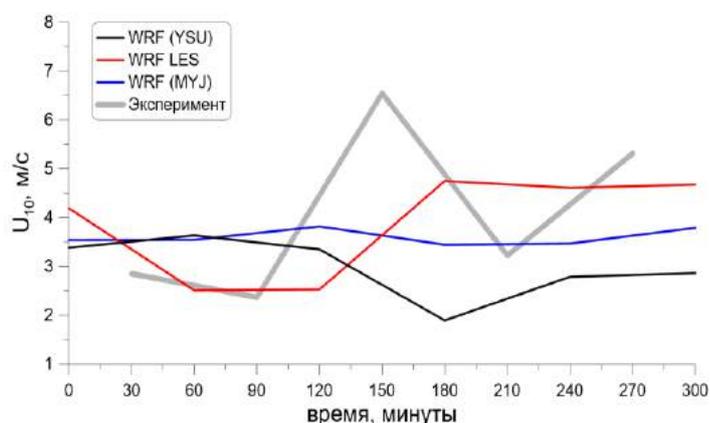
Произведена оценка эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы. Реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. Результаты расчета для тестового дня, показанные на Рис. 12а, демонстрируют распределение скорости ветра над акваторией Горьковского водохранилища, модуль скорости отображен цветом, а направление - направлением отрезка. Применение модели WRF на акватории Горьковского водохранилища показывает пространственную изменчивость скорости ветра, что позволяет сделать вывод о необходимости использования неоднородного задания поля ветра в модель WAVEWATCH III для достоверных расчетов параметров волнения на Горьковском водохранилище.

Были сопоставлены расчетные данные в рамках различных параметризаций приповерхностного слоя атмосферы и произведено сравнение расчетов с данными натуральных измерений. По всем моделям сделан вывод о тенденции к занижению расчетных данных (Рис. 12б). При этом сопоставление моделей YSU и WRF LES демонстрирует лучшее соответствие WRF LES натурным данным: как качественно, описывая изменчивость ветра, так и количественно. Также отмечено, что при постоянном ветре поведение модели MYJ близко к YSU, но в случае его резкой изменчивости MYJ дает лучшее соответствие модельных и экспериментальных данных даже без подключения модуля WRF LES.

Перспективным направлением дальнейшей работы является использование MYJ совместно с вихреразрешающим моделированием WRF LES и добавление еще одного вложенного домена с более высоким пространственным разрешением.



(а)



(б)

Рис. 12. (а) Распределение скорости ветра над акваторией Горьковского моря для тестового дня. (б) Эволюция скорости ветра от времени в точке натуральных измерений при расчете моделью WRF при подключении параметризации YSU (черный цвет), MYJ (синий цвет), WRF LES (красный цвет), данные натурального эксперимента (серый цвет).

Мы связываем неточности предсказания ветра моделью WRF в первую очередь с тем, что на рассматриваемой акватории производится ассимиляция данных только с двух метеорологических станций (Волжская ГМО, Юрьевец), а они расположены на высоком берегу, и измеряемый ими ветер существенно отличается от ветра над водохранилищем, измерения которого проводятся в натуральных экспериментах. Таким образом, показана необходимость дополнительной ассимиляции данных с метеостанций или буев, расположенных на берегу или на акватории водохранилища.

8. Оценка эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приводного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.

Проведена оценка эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приводного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза ветра и волнения. Сравнение результатов моделирования и натуральных данных показало занижение расчетных данных как для обычного расчета WRF, так и расчета WRF с ассимиляцией данных по стандартной схеме Крессмана (Рис.13).

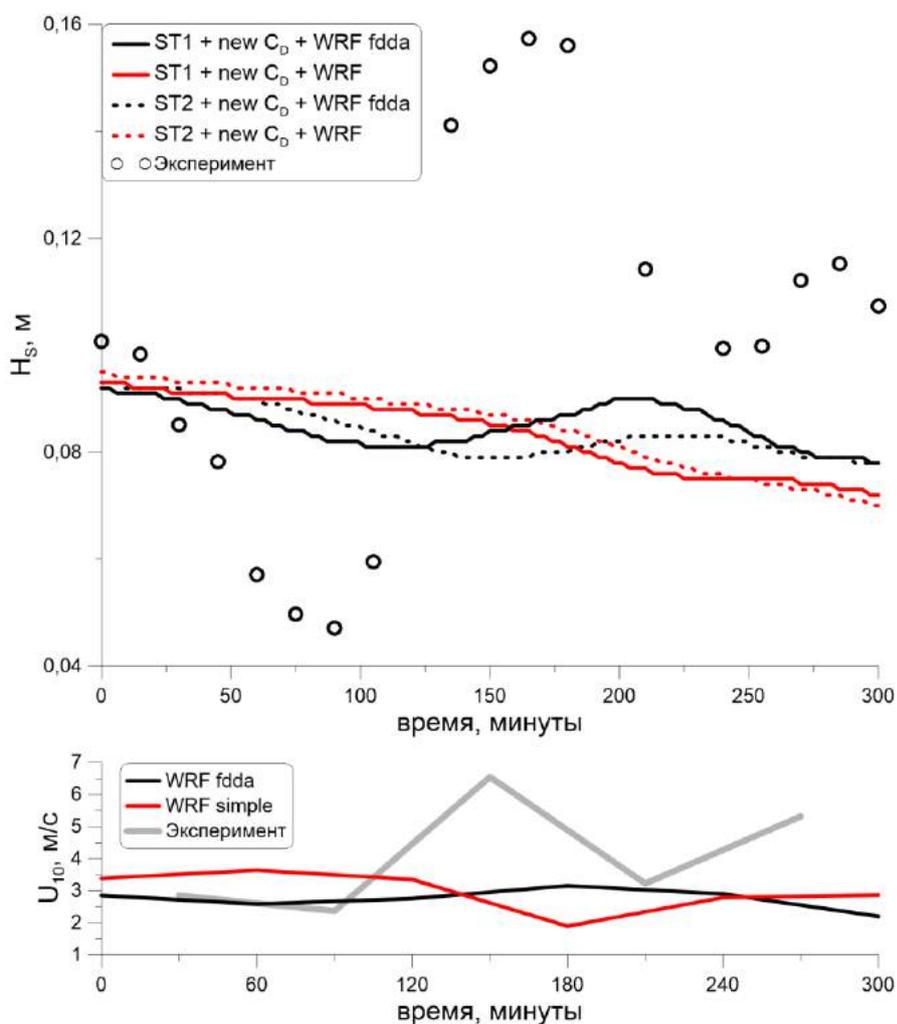


Рис.13. Сверху: расчетные значения адаптированной модели WAVEWATCH III при подключении параметризации ST1 и форсинге ветром WRF (сплошная красная линия), параметризации ST1 и форсинге ветром WRF fdda (сплошная черная линия), ST2 и форсинге ветром WRF (пунктирная красная линия), параметризации ST2 и форсинге ветром WRF fdda (пунктирная черная линия). Точками отмечены данные натуральных измерений волнения в точке. Снизу: расчет ветра WRF (красный цвет), WRF fdda (черный цвет), данные натуральных измерений (серый цвет).

Однако при этом было отмечено, что результат расчета скорости ветра по WRF с ассимиляцией данных (WRF fdda) дает лучшее соответствие данным натуральных измерений с более качественным отслеживанием локальных изменений ветра. Особенно наглядно это демонстрируется при моделировании волнения в WAVEWATCH III, где в качестве форсинга ветром использовался как стандартный расчет модели WRF, так и расчет WRF fdda. В WAVEWATCH III использованы следующие параметризации для расчета параметров волнения: модель WAM3 (ST1) с предложенным нами в работе (Kuznetsova A.M. et al, 2016) коэффициентом параметризации аэродинамического сопротивления, а также модель Tolman&Chalikov (ST2) с вышеуказанным коэффициентом параметризации аэродинамического сопротивления.

Таким образом, ассимиляция данных натуральных наблюдений позволяет повысить точность прогноза ветра и волнения. Однако требуется ассимиляция данных с большего количества источников измерений, что может быть осуществлено при установке частных переносных метеостанций по периметру водохранилища. Запланированы работы по данному направлению.

Список литературы:

1. Kuznetsova A.M., Baydakov G.A., Papko V.V., Kandaurov A.A., Vdovin M.I., Sergeev D.A., Troitskaya Yu. I. Adjusting of wind input source term in WAVEWATCH III model for the middle-sized water body on the basis of the field experiment // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Meteorology, 2016, vol. 1, article ID 574602, pp. 1-13.

9. Теоретическая модель взаимодействия внутренних волн с турбулентностью в атмосфере в условиях устойчивой стратификации, исследование особенностей генерации турбулентности внутренними волнами.

В рамках новой модели турбулентного замыкания была получена система уравнений, описывающая двухсторонние взаимодействия между внутренними гравитационными волнами (ВГВ) и турбулентностью. Эта система включает в себя уравнение баланса для полной (кинетической плюс-потенциальной) энергии ВГВ и уравнения для кинетической и потенциальной энергий турбулентности, турбулентные потоки тепла для волн и потока потенциальной температуры для произвольной стратификации. Общая физическая картина в двухсторонней связи между ВГВ и турбулентностью при постоянной частоте Брента-Вяйсяля следующая:

1. внутренние волны, излучаемые на определенном уровне в атмосфере (в случае отсутствия преломления), распространяются вверх. Потери энергии ВГВ приводят к генерации турбулентности. В соответствии с уравнением Бугера - более интенсивные волны проникают на более короткое расстояние (затухание сильнее), менее интенсивные волны проникают выше (затухание за счет турбулентности слабее),
2. показано, что чем меньше интенсивность внутренних волн, тем сильнее проявляется анизотропия турбулентности. Этот факт определяется 90% вкладом потенциальной энергии (уровень которой мал при малой амплитуде ВГВ) в полную энергию турбулентности и соответствует экспериментальным данным на высотах тропосферы.

1.5. Описание выполненных в отчетном году работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ

на русском языке

1. Методом вихреразрешающего моделирования проведен численный анализ уравнений Навье-Стокса для горизонтально однородного сухого и баротропного ППС с целью выделения конвективных турбулентных структур. Проведена оценка вклада соответствующих структур в поток потенциальной температуры, дисперсии, в поток импульса, а также в поток кинетической энергии турбулентности. Сделан вывод об их доминирующем вкладе в уравнение баланса для потока потенциальной температуры. Проведенный анализ показал, что примерно 85% вертикального потока потенциальной температуры переносится структурами в ППС в обоих случаях (как при наличии потока, так и без него). Именно структуры отвечают за 72% кинетической энергии в перемешанном слое в обоих случаях. Процентное соотношение вклада структур для вариации потенциальной температуры составляет 81% в случае с нулевым средним ветром и 76% при наличии среднего (по величине) ветра. Структуры ответственны и за 94% потока импульса в перемешанном слое при наличии среднего (по величине) ветра. Эти результаты согласуются с результатами Гринхут и Хальса (1982, 1987). В

приповерхностном слое ППС фоновая турбулентность обычно более важна, чем структурный вклад в обоих исследованных случаях (с потоком и без него).

2. Разработана оптимальная версия новой модели замыкания для турбулентных потоков в условиях сильно-устойчиво-стратифицированной свободной атмосферы, учитывающая взаимодействие между механической турбулентностью за счет сдвига скорости, конвективной турбулентностью, средним течением и «конвективными ветрами». Модели турбулентного замыкания для устойчивой стратификации разработаны как в терминах одноточечных статистических моментов, так и в спектральной форме.

3. Проведено сравнение зависимости потокового числа Ричардсона, и зависимости скорости диссипации кинетической энергии турбулентности от высоты погранслоя, полученных в численных экспериментах на основе DNS, с предсказанием теоретической модели с параметризацией на основе численных данных. Получен универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в устойчиво-стратифицированных турбулентных атмосферных потоках в терминах эффективного числа Рейнольдса, выраженного через масштаб длины, полученный в рамках EFB замыкания. Получена универсальная зависимость скорости диссипации кинетической энергии турбулентности от отношения высоты погранслоя к масштабу Обухова.

4. Разработан алгоритм прямого численного моделирования турбулентного воздушного потока над взволнованной водной поверхностью с заданным спектром возвышений. Проведены расчеты DNS для различных видов спектров, описывающих случай, когда на энергонесущую волну наложена мелкомасштабная рябь. Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости воздушного потока. Показано, что мгновенные распределения скорости ветра характеризуются присутствием отрывов воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля являются безотрывными.

5. На установках AEOLOTRON университета Гейдельберга и LASIF университета Марселя выполнены детальные измерения характеристик воздушного потока над регулярно обрушающимися квазидвумерными волнами с помощью PIV-методов. По данным измерений получены поля средней скорости и турбулентного напряжения, что позволило разработать методику определения поля давления на основе интегрирования уравнений осредненных по турбулентным флуктуациям уравнения Навье-Стокса. Данная методика существенно превосходит имеющиеся возможности контактных измерений распределения давления. Для ее тестирования также использовались результаты расчетов DNS. С использованием разработанной участниками проекта методики на крупнейшем в мире ветро-волновом канале SUSTAIN впервые выполнены детальные исследования процессов обрушения волн и образования брызг.

6. На крупнейшем в мире ветро-волновом канале SUSTAIN университета Майами на основе комбинации результатов натуральных и лабораторных экспериментов, предложена уточненная балк-формула для коэффициента обмена импульсом от эквивалентной скорости ветра. Выделено два диапазона по скорости ветра, до 27 м/с и более, в которых используются разные зависимости. Продемонстрировано, что, несмотря на сильные отличия реальных условий и ветро-волновых каналов, немонотонная зависимость, полученная в диапазоне менее 12 м/с исключительно на основе натуральных измерений, хорошо описывает результаты лабораторных измерений вплоть до 27 м/с, когда начинает наблюдаться тенденция к насыщению. На основании лабораторных экспериментов предложена параметризация коэффициента переноса тепла, применимая при скорости трения ветра до 1.4 м/с (скорость ветра примерно до 30 м/с). На основе обобщения данных прямого (DNS) и вихреразрешающего (LES) численного моделирования проведена

параметризация уравнения для кинетической энергии турбулентности в атмосферном пограничном слое над водной поверхностью, получено универсальное уравнение для диссипации кинетической энергии турбулентности в широком диапазоне метеоусловий, в том числе при сильной устойчивой стратификации.

7. Для исследования эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. В адаптированной модели WRF была исследована эффективность использования моделей приповерхностного слоя атмосферы. Расчеты поля скорости ветра над акваторией водоема были реализованы с подключением различных параметризаций. Результаты расчетов сравнивались с натурными измерениями на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда. Перспективным направлением дальнейшей работы является использование MYJ совместно с вихреразрешающим моделированием WRF LES.

8. Также проведена ассимиляция данных в расчетную модель WRF из базы, накопленной в результате натурных измерений профиля ветра на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда. Исследована эффективность алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза ветра и волнения. Усвоение данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW реализовано при помощи «целевого анализа» OBSGRID с использованием стандартной схемы Крессмана, что способствовало повышению точности прогноза ветра и волнения.

9. В рамках новой модели турбулентного замыкания получена система уравнений, описывающая двухсторонние взаимодействия между внутренними гравитационными волнами (ВГВ) и турбулентностью. Эта система включает в себя уравнение баланса для полной (кинетической плюс-потенциальная) энергии внутренних волн (ВГВ) и уравнения для кинетической и потенциальной энергий турбулентности, турбулентные потоки тепла для волн и потока потенциальной температуры при стратификации, характерной для различных высот ППС.

Выявлены некоторые характерные особенности двухсторонней связи между ВГВ и турбулентностью при постоянной частоте Брента-Вяйсяля:

1) Внутренние волны, излучаемые на определенном уровне (в случае отсутствия преломления), распространяются вверх. Потери энергии ВГВ приводят к генерации турбулентности. В соответствии с уравнением Бугера - более интенсивные волны проникают на более короткое расстояние (затухание сильнее), менее интенсивные волны проникают выше (затухание за счет турбулентности слабее).

2) Показано, что менее интенсивные внутренние волны приводят к более сильному проявлению анизотропии турбулентности. Этот факт определяется 90% вкладом потенциальной энергии (уровень которой мал при малой амплитуде ВГВ) в полную энергию турбулентности и соответствует экспериментальным данным на высотах тропосферы.

на английском языке

1. The numerical analysis of the Navier-Stokes equations for horizontally uniform dry and barotropic PBL with the purpose of filtering convective turbulent structures from the background is carried out by the method of large eddy simulation modeling. The contribution of the corresponding structures to the flux of potential temperature, dispersion, to the momentum flux,

and also to the turbulent kinetic energy flux is estimated. A conclusion is drawn about their dominant contribution to the balance equation for the potential temperature flow.

The analysis showed that approximately 85% of the vertical flow of the potential temperature is transferred by structures in the PBL in both cases (with and without flow). It is the structures that account for 72% of the kinetic energy in the mixed layer in both cases. Percentage of contribution of structures for the variation of the potential temperature is 81% in the case of zero mean wind and 76% in the presence of an average (in magnitude) wind. Structures are also responsible for 94% of the momentum flux in the mixed layer in the presence of an average (in magnitude) wind. These results are consistent with the results of Grinhut and Khals (1982, 1987). In the near-surface layer of PBL, background turbulence is usually more important than the structural contribution in both investigated cases (with and without flow).

2. An optimal version of the new closure model for turbulent flows in conditions of a strongly-stable-stratified free atmosphere is developed, taking into account the interaction between mechanical turbulence due to velocity shear, convective turbulence, mean flow and "convective winds". The turbulent closure models for stable stratification are developed both in terms of single-point statistical moments and in spectral form.

3. The dependence of the flow Richardson number, and the dependence of the rate of dissipation of the kinetic energy of turbulence, on the height of the boundary layer, in numerical DNS experiments with the prediction of a theoretical model with parameterization on the basis of numerical data are compared. A universal criterion for turbulent-laminar transition in stable-stratified turbulent atmospheric flows is obtained using the effective Reynolds number, expressed in terms of the length scale obtained within the framework of the EFB closure. A universal dependence of the dissipation rate of the kinetic energy of turbulence on the ratio of the height of the boundary layer to the Obukhov scale was obtained.

4. An algorithm for Direct Numerical Simulation of a turbulent air flow over a water surface with a prescribed spectrum of surface elevations has been developed. DNS was performed for different spectra describing a small-scale ripples imposed over a carrier fundamental surface wave. Instantaneous and ensemble-averaged air velocity fields were obtained. The results show that instantaneous air flow is characterized by the presence of separation points at the water surface whereas the ensemble-averaged fields remain smooth and have no separation points.

5. At the AEOLOTRON facilities of the University of Heidelberg and LASIF of the University of Marseilles, detailed measurements of the air flow characteristics over regularly breaking quasi-two-dimensional waves using PIV-methods were carried out. According to the measurement data, the fields of mean velocity and turbulent stress were obtained, which allowed developing a technique for determining the pressure field by integrating the equations of the Navier-Stokes equations averaged over turbulent fluctuations. This technique significantly exceeds the available capabilities of contact measurements of pressure distribution. To test it, we also used the results of DNS calculations.

6. Using the methodology developed by the project participants at the world's largest wind-wave channel, SUSTAIN, detailed studies of the wave breaking and spray generation processes were performed for the first time. On the basis of a combination of results of field and laboratory experiments, an improved bulk-formula is proposed for the aerodynamic drag coefficient from the equivalent wind speed. There are two ranges for wind speed, up to 27 m / s and more in which different dependencies are used. It was demonstrated that despite the strong differences in real conditions and wind-wave flumes, the nonmonotonic dependence in the speed range obtained in the range of less than 12 m / s almost on the basis of full-scale measurements well describes the results of laboratory measurements up to 27 m / s, when a tendency to saturation.

On the base of laboratory experiments, the parameterization of the heat transfer coefficient is proposed, applicable at wind speed up to 1.4 m / s (wind speed up to about 30 m / s).

7. To study the efficiency of using surface atmospheric models, the Weather Research and Forecasting (WRF) model was adjusted to the conditions of the Gorky reservoir. In the adapted WRF model, the efficiency of using surface layer models was investigated. Simulation of the wind speed field over the water area of the reservoir was realized with various parametrizations. The results of the simulation were compared with field measurements in the Gorky reservoir using an autonomous floating oceanographic Froude buoy. A perspective direction for further research is the use of MYJ together with the WRF LES simulation.

8. The data accumulated from the full-scale measurements of the wind profile in the Gorky reservoir using an autonomous floating oceanographic Froude buoy was assimilated into the WRF model. The efficiency of the algorithms for the assimilating the measurement data of the surface layer atmospheric parameters used in the WRF-ARW model is studied for the implementation to wind and wave forecasts. The assimilation of the surface layer atmospheric measurements parameters in the WRF-ARW model was realized using the "objective analysis" OBSGRID using the standard Cressman scheme, which results in an increase in the accuracy of the wind and wave forecast.

9. Within the framework of the new turbulent closure model, a system of equations describing two-way interactions between internal gravity waves (IGW) and turbulence is obtained. This system includes the balance equation for the total (kinetic plus-potential) internal-wave energy (IGW) and equations for the kinetic and potential turbulence energies, turbulent heat fluxes for waves, and the potential temperature flow for stratification typical for different PBL heights. Some characteristic features of the two-way interaction between IGW and turbulence at a constant Brunt-Vaisala frequency are revealed:

1. Internal waves radiated at a certain level (in the absence of refraction) propagate upward. The loss of IGW energy leads to the generation of turbulence. In accordance with Bouguer's equation, more intense waves penetrate a shorter distance (damping is stronger), than less intense waves.

2. It is shown that less intense internal waves lead to a stronger manifestation of the anisotropy of turbulence. This fact is determined by the 90% contribution of the potential energy (which level is small at a small amplitude of the IGW) to the total turbulence energy and corresponds to the experimental data at tropospheric altitudes.

Итоговый отчет о выполнении проекта № 15-17-20009

«Исследование физической природы и разработка теоретических моделей атмосферного пограничного слоя над неоднородной подстилающей поверхностью для нужд высокоразрешающего моделирования погоды, климата и качества воздуха»

(представляется в последний год практической реализации проекта вместе с отчетом о выполнении проекта)

1. Заявленный в проекте план работы на весь срок выполнения проекта, предлагаемые методы и подходы (в соответствии с исходной заявкой на участие в конкурсе)

Основным методом исследования турбулентного обмена в приводном слое атмосферы при штормовых и ураганных условиях будет являться проведение лабораторного моделирования на крупномасштабном гидрофизическом стенде. Следует отметить, что лабораторные условия отличаются от натуральных существенно меньшими разгонами. Это означает, что крупномасштабная структура волнения не может быть воспроизведена в лабораторном эксперименте. Однако короткие волны, процессы образования брызг и пены, образование пузырьков в приповерхностном слое воды в лаборатории воспроизводятся хорошо, а именно мелкомасштабные процессы определяют процессы турбулентного обмена, являющиеся предметом исследований в рамках настоящего проекта. Преимущество лабораторного моделирования связано с тем, что оно обеспечивает повторяемость и контролируемые условия измерений.

Эксперименты будут проводиться на высокоскоростном ветро-волновом канале Большого термо-стратифицированного бассейна (БТСБ) ИПФ РАН которая входит в перечень Уникальных Научных Установок (УНУ) «Комплекс крупномасштабных геофизических стендов ИПФ РАН» (ссылка <http://www.ckr-rf.ru/usu/77738/>). Также она входит в реестр уникальных экспериментальных стендов РФ (№019). Бассейн оборудован уникальной системой создания и поддержания температуры в верхнем и нижнем слое основной чаши бассейна с перепадом до 20 градусов для создания стратификации термоклинного типа с частотой плавучести до 0.2 рад/с.

В ветровом канале достигаются эквивалентные скорости создаваемого воздушного потока до 40 м/с (ураганные условия). 10 м рабочей части воздушного канала позволяют реализовать интенсивно обрушающиеся волны с образованием пены и брызг. Программное управление задающим поток вентилятором обеспечивает высокую степень повторяемости условий эксперимента. За счет контролируемого изменения температуры воздуха и воды между ними может в пограничном слое может быть достигнута разность до 20 град, причем в обе стороны. Это позволяет смоделировать эффекты как устойчивой, так и неустойчивой стратификации приводного слоя воздушного потока. Установка была создана в 1992 году, а в 2009 году прошла коренную модернизацию. По своим параметрам она не имеет аналогов в России. Подобными параметрами по скорости обладают лишь ветро-волновой канал Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science Университета г. Майами США, а также недавно созданный канал Institute Fluid Science and Engineering, Университета г. Киото Япония.

Бассейн оборудован волнопродуктором поверхностных волн с приводом от серводвигателя, что позволяет, управляя сигналом с компьютера, задавать зависимость амплитуды смещения рабочего тела от времени; частота генерации – в диапазоне от 0.2 до 4 Гц. Также бассейн оборудован волнопродуктором внутренних волн и системами буксировки. В ходе выполнения настоящего проекта запланировано проведение модернизации ветро-волнового канала, в результате чего рабочая часть канала будет расширена, ее сечение составит 70 на 70 см на входе и 70 на 85 см на выходе канала, что обеспечит формирование безградедного турбулентного пограничного слоя в воздушном потоке над поверхностью воды. Будет также произведена замена вентилятора, нагнетающего воздух в канал, будет установлен вентилятор МАФ 1250-6-4, обеспечивающий расход воздуха 60000 куб.м/час. В результате ожидаемая скорость на оси канала составит 30 м/с, что соответствует эквивалентной скорости ветра на стандартной высоте примерно 50 м/с. В ходе выполнения проекта канал будет оснащен системой для создания искусственного дождя с регулируемой интенсивностью. Также будет создано специальное устройство для создания пенного покрова.

Для измерения скоростей воздушного потока будут применяться контактные и дистанционные методы. К контактным средствам измерения относятся:

- 1) Трубки Пито с дифференциальными манометрами MKS Baratron для измерения средней скорости воздушного потока (диапазон измеряемых скоростей до 30 м/с с точностью 15 см/с).
- 2) Датчиком измерения пульсаций давления на основе диска Эллиота. Этот датчик также подключается к дифференциальному манометру MKS Baratron (точность 0.5 Па, частота измерений до 50 Гц).
- 3) Термоанемометры E+Electronics для измерения средних скоростей и температуры воздушного потока. Диапазон измерения: 0-40 м/с при -40...120°C. Точность: +/-0,2 м/с при +/-0,5°C.
- 4) Система высокочувствительных малоинерционных температурных датчиков (16 шт) измерений температуры воды, которые могут устанавливаться в различных конфигурациях (измерения колебаний изотерм, пространственные распределения скорости на разных горизонтах). Диапазон измеряемых температур составляет 0°÷30°C, точность измерений 0.05°C, время релаксации 0.5 с.
- 5) Для измерения параметров поверхностного волнения используется трехканальный и шестиканальный волнографы резистивного типа. Для определения трехмерных спектров (частота и две проекции волнового числа) волнения используется метод FDM (Fourier directional method), который является оригинальной разработкой авторов проекта и представляет собой модификацию метода WDM (wavelet directional method, предложенного и реализованного авторами работы Donelan, et al, 1996). Метод позволяет получать трехмерные спектры поверхностных волн (по частоте и двум компонентам волнового вектора) в диапазоне длин волн от 1-2 см до 1-2 м и в отличие от оригинала обеспечивает более высокое спектральное разрешение.
- 6) Трехкомпонентный ультразвуковой доплеровский измеритель скорости ADV-LAB Nortec в диапазоне до 2.5 м/с с точностью 0.1 мм/с, частота опроса из от 0.1 до 25 Гц
- 7) Система для термоанемометрических измерений Dantec Dynamics. Включает в себя 4 канала измерения скорости и 2 температуры. Позволяет производить измерения в точке одновременно 3-х компонент скорости и температуру воздушного потока с частотой до 100 кГц в диапазонах от 0 до 350 м/с точностью 10 см/с и 0-150 градусов соответственно. На настоящий момент является лучшим инструментом для измерения параметров турбулентных флуктуаций.
- 8) Для всех датчиков предусмотрена возможность установки на сканирующее устройство, управляемое с компьютера, которое обеспечивает позиционирование с точностью 0.5 мм. Устройство может работать в автоматическом режиме, осуществляя измерение профилей

скорости и температуры потоков, существенно ускоряя проведение экспериментов. По измеренным профилям скорости и температуры могут быть восстановлены потоки импульса и температуры в воздушном потоке на основе метода профилирования.

Дистанционные методы, основаны на визуализации потоков и применения методов оптической анемометрии по изображениям частиц (Particle Image Velocimetry, PIV).

Авторами проекта разработан оригинальный PIV измерительный комплекс на основе высокоскоростной видеосъемки и непрерывной лазерной подсветке Пат. 110494 РФ 20.11.2011.

При различных исследованиях может быть использована следующая аппаратура и материалы:

- 1) Источниками световых ножей являются непрерывные твердотельные лазеры с диодной накачкой LCS-DTL с мощностью от 0.5 до 2 Вт и длиной волны 527 нм (зеленый свет).
- 2) Матричные светодиодные светильники (прожекторы) мощностью до 400 Вт.
- 3) Цифровые видеокамеры: а) Скоростная камера ВИДЕОСПРИНТ (разрешение 1 Мп, скорость до 250 000 кадров/сек) б) Компактная скоростная камера Optronic CR3000 (разрешение до 0.9 Мп, скорость съемки до 100 000 кадров/сек) в) Высокоскоростная светочувствительная камера NAC Menresam HX-3 (разрешение 5 Мп, скорость до 1000 000 кадров/сек).
- 4) Устройство для ввода микрочастиц (трассеров) в поток авторской разработки Пат. 134542РФ от 20.11.2013.
- 5) Различные визуализирующие вещества: микрочастица полиамида 5, 20, 50 мкм, дымовая жидкость и т.п.

Для измерения турбулентных напряжений и потоков тепла будут применяться метод профилирования и пульсационный метод (eddy-correlation). При использовании метода профилирования будет использовано свойство автомодельности профилей дефекта скорости ветра в развивающемся пограничном слое, типичном для лабораторных установок (см. подробности метода в Troitskaya et al, 2012). Реализация пульсационного метода будет основана на проведении синхронных измерений пульсаций компонент скорости воздушного потока и температуры на разных горизонтах. Потоки тепла и импульса будут восстановлены по стандартным алгоритмам метода Eddy-correlation.

В соответствие с проектом, финансируемым в рамках 7-й рамочной программы Европейской Комиссии по схеме международных научных обменов коллектив проекта имеет доступ к работе на двух крупных Европейских установках: большом ветро-волновом канале Университета Марселя и большом кольцевом ветро-волновом канале Университета Гейдельберга. Преимуществом этих установок является большой разгон, позволяющий изучать эффекты обрушения волн при умеренных скоростях ветра.

Разработка моделей турбулентного переноса в планетарных пограничных слоях будет основана на теоретическом анализе, анализе данных с помощью современных методов для различения турбулентности и когерентных структур и численном моделировании турбулентности. При этом будут применяться прямое численное моделирование (DNS), а также вихреразрешающие модели (LES) и уравнения Рейнольдса (RANS equations). Численное интегрирование будет проводиться с использованием параллельной вычислительной системы (кластера) на основе 2х 8-ми ядерных процессоров Xenon (2.9 GHz) и общей оперативной памятью 64 Gb, приобретенного а 2012 г в ИПФ РАН. Исходные параметры в численном моделировании будут задаваться на основании данных лабораторного эксперимента. Будет проведено качественное и количественное сравнение численных и экспериментальных результатов.

Также для расчета параметров приводного ветра будет использоваться квазилинейная модель турбулентного пограничного слоя над взволнованной поверхностью. Модель основана на решении системы уравнений Рейнольдса (RANS-equations), замыкаемых с помощью градиентной аппроксимации, в которой коэффициент турбулентной вязкости считается заданной функцией координат. В модели учитывается вязкий подслой логарифмического пограничного слоя вблизи водной поверхности, масштаб которого, не превышающий нескольких миллиметров, мал по сравнению с типичными амплитудами поверхностных волн. Чтобы избежать сильной геометрической нелинейности, модель сформулирована в криволинейных координатах, сопровождающих волны. Для описания взаимодействия ветра и волн используется квазилинейное приближение, когда отдельные гармоники рассматриваются независимо в линейном приближении, а в уравнении для средних компонент скорости учитываются нелинейные слагаемые – волновые потоки импульса или волновые напряжения, определяемые спектром поверхностных волн. При расчетах используются текущие измеренные спектры волнения.

При моделировании волнения на акватории водохранилища и приводного слоя атмосферы будут использованы сопряженные модели WRF-ARW и WWATCH-III.

В модели WRF-ARW расчеты будут производиться с использованием вложенных доменов (нестинг доменов). В имеющейся на настоящее время версии модели реализован нестинг 4-х доменов с масштабами 30 км, 10 км, 3 км и 1 км соответственно. Предполагается повысить разрешение модели до 250 м. Для этого будет использована цифровая модель рельефа GMTED2010 с разрешением 7.5" (250 м) <https://lta.cr.usgs.gov/GMTED2010>. Работа с моделью будет производиться на суперкомпьютере Йеллоустоун (счет на 256 процессорах) под управлением Линукс. В расчетах будет использоваться вихреразрешающая модель с базовыми параметризациями для микрофизики облаков, длинноволновой и коротковолновой радиации, облачности и т.д. При параметризации приводного слоя атмосферы будут использоваться оригинальные модели, основанные на данных измерений, которые проводятся в течение нескольких лет на акватории Горьковского водохранилища.

При моделировании волнения на акватории водохранилища будет использована модель третьего поколения WAVEWATCH III, сопряженная с WRF-ARW. Модель WAVEWATCH III приспособлена главным образом к описанию морских и океанических волн. В рамках настоящей модели будет произведена ее адаптация к условиям внутреннего водоема. В имеющейся на настоящее время версии модели диапазон моделируемых частот волн был смещен в высокочастотную область, соответствующую более коротким разгонам, типичным для внутренних водоемов (использовалась 31 частота, изменяющаяся в диапазоне от 0,2 Гц до 4 Гц, и 30 направлений). Также была изменена (уменьшена до 0.05 м) минимальная значительная высота волнения в исходных кодах модели. Для дальнейшей адаптации модели к условиям водохранилища будет изменена функция ветровой накачки в соответствии с данными натурных наблюдений, а также будут протестированы новые параметризации ветровой накачки и нелинейной диссипации, развитые на основе натурных экспериментов на оз.Джорж в Австралии и инкорпорированные в WAVEWATCH III® (Rogers, W.E., J.D. Dykes, and P.A. Wittmann. 2014. US Navy global and regional wave modeling. *Oceanography* 27(3):56–67, <http://dx.doi.org/10.5670/oceanog.2014.68>).

Измерения характеристик поверхностного волнения и параметров воздушного потока на акватории Горьковского водохранилища будут проводиться с помощью многофункциональной платформы для исследования гидрофизических процессов в пограничных слоях атмосферы и гидросферы на базе вехи Фруда, которая является авторской разработкой участников настоящего проекта. Платформа представляет собой мачту (до 7 м в надводной части) с поплавком и подводным грузом балансиром. На мачте

вертикально расположены 4 датчика WindSonik Gill Instruments, которые позволяют измерять 2 компоненты скорости в диапазоне до 60 м/с с погрешностью 4%, частота измерения 4Гц. Еще один датчик расположен на отдельном поплавке (в непосредственной близости от водной поверхности), соединенный кабелем и тросом с основной платформой. На платформе также размещен 3-х канальный струнный волнограф резистивного типа для измерения возвышения взволнованной поверхности. Последующая обработка с использованием FDM-метода, разработанного авторами проекта (Troitskaya et al, 2012, JGR), позволяет восстанавливать 3D-спектры волнения по частоте, модулю волнового числа и направлению. Для измерения мелкомасштабных турбулентных характеристик воздушного потока используется у/з измеритель HS-50. Он позволяет проводить измерения 3-х компонент скорости в диапазоне до 50 м/с с частотой до 50 Гц. Устанавливается стационарно с выносом на исследовательском судне. Снабжается акселерометром для компенсации смещений связанных с качкой судна. Полученные данные используются для параметризации приводного слоя атмосферы и верификации модельных расчетов волнения.

Использование параметризаций воздушных турбулентных потоков над водной поверхностью в численной модели внутреннего равнинного водоема: Горьковского водохранилища, р. Волга.

Для тестирования развитых в рамках настоящего проекта моделей приводного слоя атмосферы и планетарного пограничного слоя они будут использованы при построении тестовой версии численной модели прогноза волнения на водохранилище по исходным метеорологическим данным. Она будет основана на использовании сопряженных моделей циркуляции атмосферы и прогноза волнения (WRF-ARW и WAVEWATCH III). Будет произведена адаптация соединенных моделей циркуляции атмосферы и прогноза волнения (WRF-ARW и WAVEWATCH III) к условиям внутреннего водоема средних размеров (на примере Горьковского водохранилища), в том числе

4.1. модификация географической модели подстилающей поверхности в модели WRF-ARW с использованием цифровой модели рельефа GMTED2010 с разрешением 7.5“ (250 м) при моделировании локального состояния атмосферы и ветра;

4.2. модификация модели приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе новых параметризаций и моделей пограничного слоя атмосферы;

4.3. модификация функции источника, спектрального интервала и диапазона разгонов в модели WAVEWATCH-III

4.4 верификация модели на основе сопоставления с данными наблюдений, в том числе

4.4.1 моделирование типичных сценариев развития волнения и верификация модели на основе сопоставления расчетов с данными одновременных натуральных наблюдений параметров приводного пограничного слоя и 3-х мерных спектров волнения

4.4.2. Исследование эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приводного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.

Ожидаемые результаты

При успешном выполнении WP4 в 2017 г. будет создан прототип модели микроклимата и локальной погоды природного ландшафта, содержащего внутренний водоем среднего размера, и, в том числе, прогноза волнения на водохранилище по исходным метеорологическим данным. Развитие такой модели впервые позволит количественно на современном уровне оценить влияние водохранилищ Волжского каскада на климат Поволжья и после доработки может стать основой для оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) при планировании строительства водохранилищ на равнинных реках.

2. Содержание фактически проделанной работы, полученные результаты (за все годы, не более 10 стр).

По техническим причинам произошло искажение плана работ на весь срок выполнения проекта в русском тексте заявки. Корректный план содержится в английском тексте (Форма 4.7) и в приложенном файле (http://grant.rscf.ru/sys/= @2Fsys @2F @3Fbatch_apply_to_all @3D0 @26context @3D_is_us er~ @26field @3Denb_filew @26in_db @3D1 @26key_vals @3D__3Vuq010KGPBr1sWmqM 2VLb00~~~ @26subop @3Dui @26table @3Dmain @2Eenrf_stages @26target @3Dlob/Download.pdf). Итоговый отчет составлялся в соответствии с корректным планом работ на весь срок выполнения проекта.

1. В ходе выполнения проекта были проведены масштабные экспериментальные исследования процессов взаимодействия атмосферного пограничного слоя с неоднородной подстилающей поверхностью объектов гидросферы. Основная их задача заключалась в получении данных о мелкомасштабных турбулентных процессах происходящих в пограничных слоях атмосферы и гидросферы, параметризации процессов обмена для дальнейшего использования при высокоразрешающем численном моделировании гидрометеорологической обстановки. Исследования включали в себя как натурные измерения, так и лабораторное моделирование. Натурные измерения проводились в первой половине проекта на полигоне Горьковского водохранилища. По результатам многочисленных натурных измерений, проведенных в ходе экспедиционных работ в рамках настоящего проекта в период 2015-2017 г.г., был получен большой массив данных измерений характеристик ветра (скорости трения, коэффициента обмена импульсом) на основе метода профилирования с помощью уникальной автономной станции на базе вехи Фруда, оборудованной двухкомпонентными ультразвуковыми измерителями скорости, установленными на разных горизонтах (Рис.1). Была получена зависимость коэффициента обмена импульсом в диапазоне эквивалентных скоростей ветра на 10-м высоте от 0 до 12 м/с, для которой была предложена нелинейная аппроксимация, учитывающая ее немонотонный характер.

Основная часть исследований была выполнена на крупномасштабных экспериментальных стендах. Очень важно, что в ходе проекта удалось развить сотрудничество между ведущими научными группами, занимающимися лабораторным моделированием процессов взаимодействия атмосферного погранслоя с подстилающей водной поверхностью гидросферы. В исследования были задействованы практически все наиболее крупные экспериментальные ветро-волновые каналы: 1) крупнейший в мире из действующих кольцевых каналов - канал AEOLOTRON университета Гейдельберга (Рис.2в) 2) крупнейший по сечению и самый высокоскоростной в мире канал Surge Structure Atmosphere Interaction (SUSTAIN) университета Майами (Рис.2г) 3) обеспечивающий наилучшее качество воздушного потока из действующих ветро-волновых каналов Large Air Sea Interaction Facility (LASIF) (Рис.2б) 4) Ветро-волновой термостратифицированный бассейн (ВВТСБ) Института прикладной физики РАН, обладающий уникальными возможностями по варьированию параметров температурной стратификации пограничного слоя воздушного потока за счет создания разницы температуры между водой и воздухом до 20 градусов (Рис.2а). Успешному выполнению работ и получению новых результатов способствовал обмен опытом проведения экспериментов, и применяемых методик измерений.

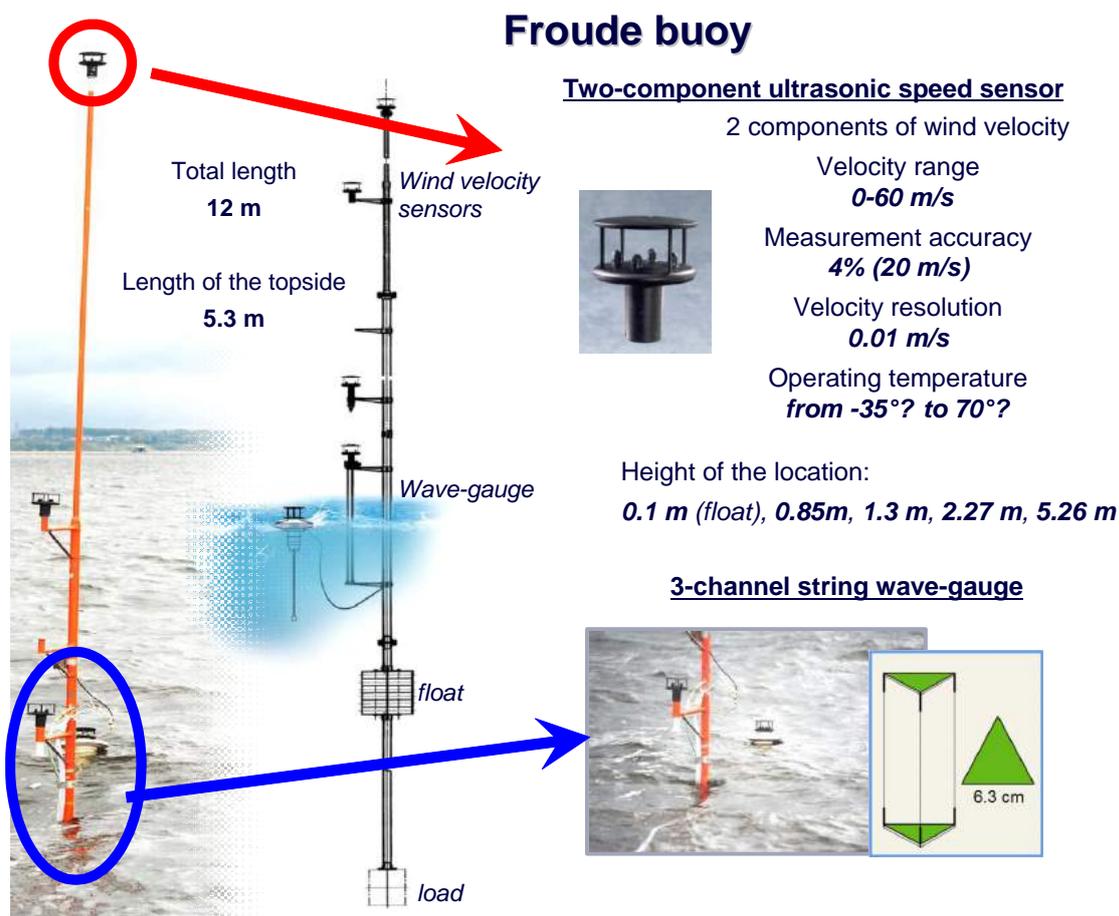


Рис.1. Конструкция многофункциональной платформы для исследования гидрофизических процессов в пограничных слоях атмосферы и гидросферы на базе вехи Фруда

В широкой серии лабораторных экспериментов, выполненных в первую очередь на Высокоскоростном Ветро-Волновом Термостратифицированном Бассейне, были получены данные о зависимости коэффициента обмена импульсом в диапазоне эквивалентных скоростей ветра от 11 до 45 м/с с параллельным измерением параметров волнения. При этом основным методом исследования было определение скорости трения и коэффициента аэродинамического сопротивления по измерениям профиля средней скорости (с помощью Пито) над взволнованной поверхностью. Однако в отличие от случаев неискаженного профиля в натуральных условиях, при лабораторном моделировании использовалась теория автомодельности, полученная ранее для аэродинамических труб и развитая позднее авторами проекта для ветро-волновых каналов.



(a)

(б)



(в)

(г)

Рис.2. Изображения ветро-волновых каналов, на которых выполнялись исследования в рамках проекта (а) Ветро-волновой термостратифицированный бассейн ИПФ РАН (б) Large Air Sea Interaction Facility (LASIF) (в) кольцевой канал AEOLOTRON университета Гейдельберга (г) Surge Structure Atmosphere Interaction (SUSTAIN) университета Майами

Корректность восстановления значений с использованием профилирования и свойства автомодельности проверялась на основе данных об измерениях полей скорости воздушного потока. Для их измерений был использован наиболее современный среди лазерно-оптических методов, основанных на визуализации, - Particle Image Velocimetry (PIV). Он был существенно модифицирован авторами настоящего проекта для проведения исследований при больших скоростях ветра и возможности получения полей скорости воздушного потока в непосредственной близости от водной поверхности даже в условиях интенсивного обрушения и генерации брызг. Использовалась схема с высокоскоростной видеосъемкой и непрерывной лазерной подсветкой. Это позволило получать статические ансамбли полей скорости, обрабатывая которые, можно найти не только профили средней скорости, но и профили турбулентного потока импульса, а значит вычислить напрямую скорость трения (сдвиговое напряжение). Подобное сопоставление результатов контактных измерений с помощью Пито и оптических, с помощью PIV, было выполнено не только на ВВТСБ, но и на канале LASIF (1,5*3 м) университета Марсея, где за счет большого сечения воздушного потока по сравнению с ВВТСБ (0.4*0.4), а также

соблюдения условия безнапорного потока, профиль скорости потока испытывает наименьшее искажение. Для проведения этих экспериментов LASIF был оборудован системой для проведения PIV-измерений с использованием мелкодисперсной дымовой визуализации на основе реакции аммиака и соляной кислоты с образованием хлорида аммония. Данная методика была разработана и освоена совместно со специалистами из университета Гейдельберга и также в дальнейшем использовалась на канале AELOTRON.

Натурные данные и результаты лабораторного эксперимента по измерению коэффициента обмена импульсом дополняют друг друга и обеспечивают перекрытие широкого диапазона исследуемых эквивалентных скоростей ветра от 0 до 45 м/с. На их основе была предложена уточненная параметризация зависимости коэффициента обмена импульсом от эквивалентной скорости ветра.

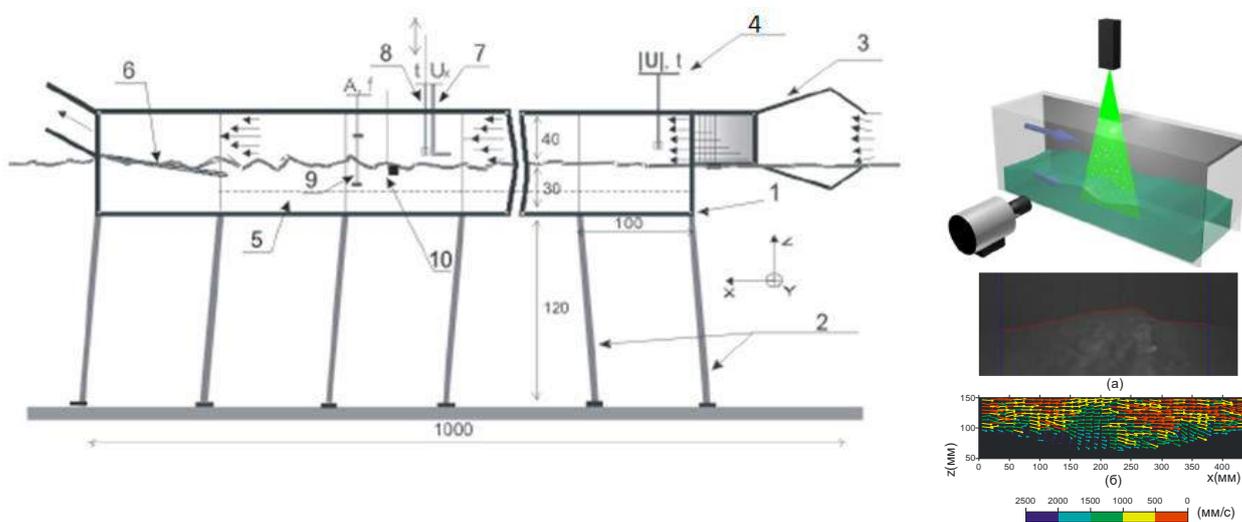


Рис.3. Слева - схема рабочей части экспериментальной ВВТСБ с расположением измерительных средств: 1) корпус Ветро-волнового канала, 2) вертикальные стойки канала, 3) сопло на входе в канал, 4) контрольный термоанемометр на входе в канал, 5) пластиковая сетка, натянутая под поверхностью, 6) волногаситель, 7) трубка Пито на сканирующем устройстве, 8) термоанемометр на сканирующем устройстве, 9) трехканальный волнограф 10) датчик температуры поверхности воды. Размеры указаны в см. Справа - схема применения PIV-метода для исследования воздушного потока при ветро-волновом взаимодействии (а) пример восстановления формы поверхности (б) пример полученного поля скорости

Отработка и освоение новой методики визуализации при проведении PIV-измерений позволили проводить измерения полей скорости с более высокой точностью и пространственным разрешением. Этот результат в сочетании с возможностью доступа к установкам AELOTRON и LASIF позволили исследовать новые методики получения распределения давления в воздушном потоке над шероховатой поверхностью, включая условия сильных ветров с регулярным обрушением. Распределение давления необходимо для нахождения важнейшей характеристики - функции ветровой накачки, которая

используется во всех численных моделях прогноза волнения. Контактные измерения распределения давления (в основном с помощью диска Эллиота) в непосредственной близости от водной поверхности весьма кропотливы и сложны, особенно для случая сильно обрушающихся волн. В работе (Troitskaya et al., 2011) был предложен и опробован способ получения распределения давления на основе полей скорости путем интегрирования выражения, полученного из усредненного по флуктуациям уравнения Навье-Стокса с учетом кинематического граничного условия в квазидвумерном приближении. В отличие от предыдущих исследований, где создавались слабообрушающиеся (*gentle spilling*) волны при сравнительно небольших ветрах (до 5 м/с), в рамках настоящего проекта были выполнены две экспериментальные кампании на AELOTRON и LASIF, в которых достигались условия регулярного интенсивного обрушения волн с образованием пенных гребней. Мгновенные поля скорости подвергались обработке с целью получения осредненных с учетом фазы средних полей скорости, а также турбулентного потока импульса.

Результаты лабораторных исследований обмена импульсом (подробнее см. ниже описание полученных результатов) продемонстрировали изменение характера зависимости коэффициента обмена импульсом от скорости ветра при превышении порога около 27 м/с. Как видно из экспериментов в этом случае происходит изменение характера подстилающей поверхности, связанное с началом интенсивного обрушения волн, генерацией пенных гребней и потоков брызг. Именно сложная форма подстилающей поверхности гидросферы определяет процессы турбулентного обмена в атмосферном погранслое. Чтобы разобраться, какие именно факторы (пена, брызги) влияют на обмен и лучше понять механизмы, были проведены дополнительные исследования.

На ВВТСБ исследовалось влияние пены. С целью обеспечения возможности регулярного создания пены на поверхности воды было разработано специальное устройство - пеногенератор, использующий Лаурилсульфат натрия для создания на поверхности воды мелкопузырьковой (мелкодисперсной) пены, аналогичной реальным условиям (Рис.5).

Во время проведения измерений ветра и волнения пеногенератор работал непрерывно, т.е. пена непрерывно поступала на поверхность. Измерения параметров воздушного потока проводились, как и ранее, методом профилирования Пито и восстанавливались значения эквивалентной скорости и коэффициента обмена импульсом. Также измерялись параметры волнения струнным волнографом. Диапазон исследуемых скоростей ветра был аналогичен экспериментам на чистой воде. Для оценки концентрации пены на поверхности жидкости была создана специальная оптическая система, основанная на видеосъемке сверху на водную поверхность 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. Были выполнены тестовые измерения при одной и той же скорости ветра при двух разных концентрациях пенного раствора.

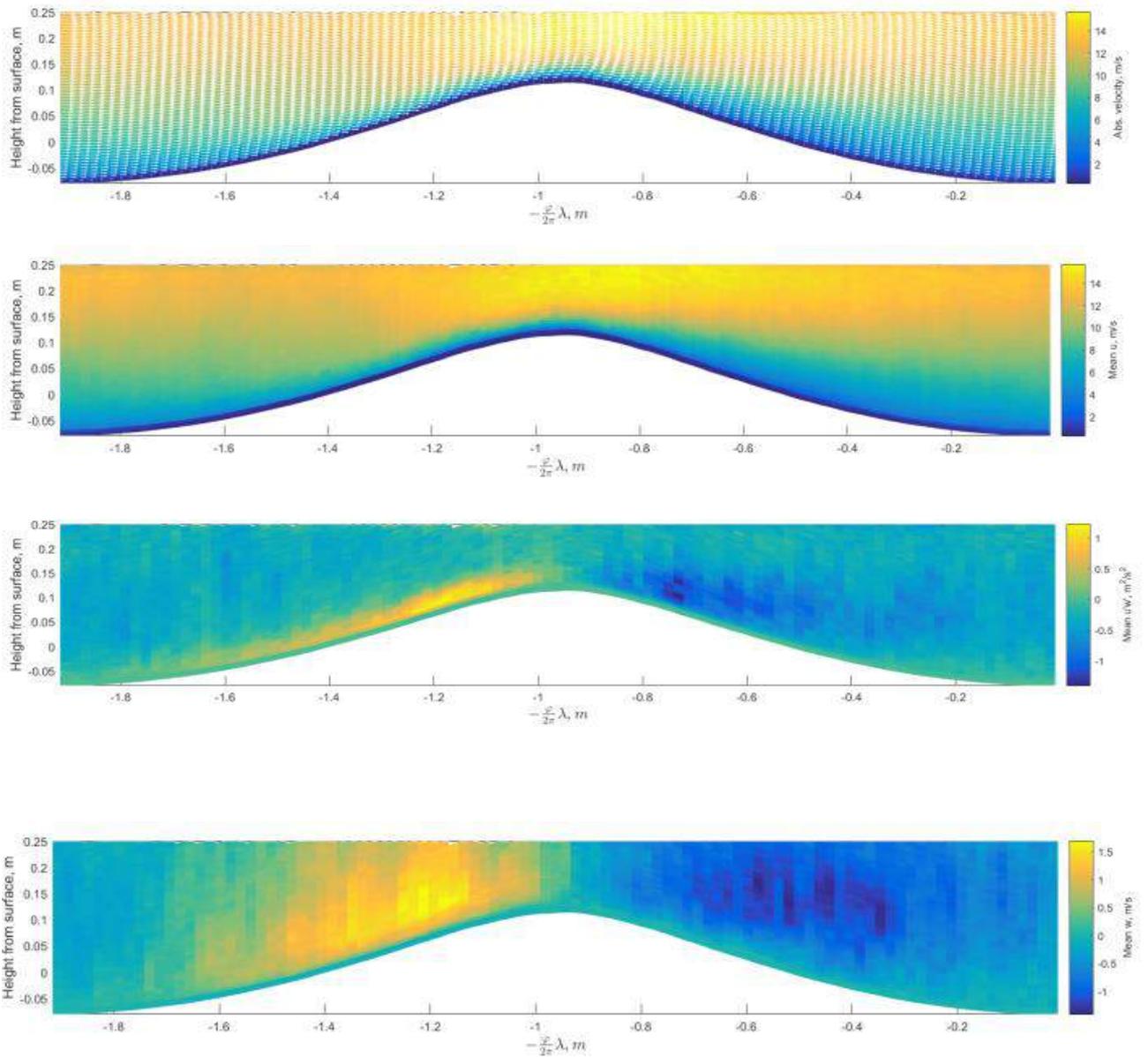


Рис.4. Результаты обработки экспериментов с PIV-измерениями на LASIF а) поле среднего модуля скорости с векторами б) средней горизонтальной компоненты скорости б) среднего турбулентного потока импульса г) средней вертикальной компоненты скорости

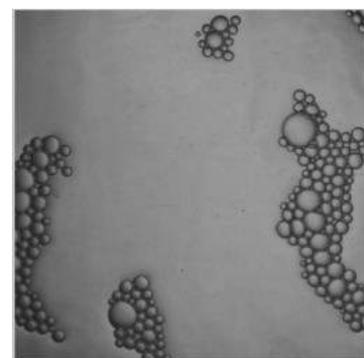
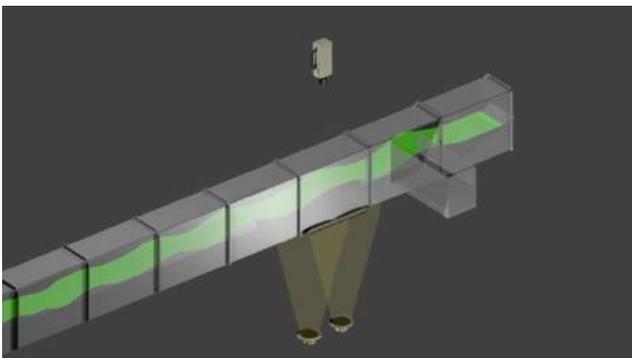


Рис.5. Схема визуализации пены с помощью подводной теневой подсветки и пример изображения.

Наряду с исследованием обмена импульсом изучался и теплообмен между атмосферой и гидросферой в пограничном слое. Эксперименты по его исследованию требуют возможности создания и поддержания разницы температур воды и воздуха в канале. Поэтому данные эксперименты выполнялись на ВВТСБ ИПФ РАН. Эксперименты были проведены также для полного диапазона скоростей ветра, включая экстремальные с интенсивным обрушением волн и образованием брызг. Устойчивая температурная стратификация приводного слоя воздуха, создавалась за счет его подогрева перед входом в канал в среднем до 35 градусов (варьируется в зависимости от скорости воздушного потока). Температура поверхности воды при этом в ходе всех экспериментов поддерживалась постоянной, около 15 градусов. Для одновременных измерений профилей скорости и температуры, Пито была дополнена пленочным датчиком температуры. Для измерения температуры поверхностного слоя воды в рабочей секции находился специальный датчик температуры. Методом профилирования были получены коэффициенты обмена импульсом и теплом (число Стентона). Результаты измерений также продемонстрировали важность влияния брызг на процессы теплообмена.

Исследования механизмов образования брызг проводились на уникальной экспериментальной установке SUSTAIN университета Майами, предоставляющей на сегодняшний день возможности наиболее близко смоделировать условия подстилающей водной поверхности при сильных ветрах. На нем возможно создание скорости 62 м/с в максимально возможных сечениях ветро-волнового канала (6x2 м), а также использование соленой морской воды во всем объеме. С использованием разработанной участниками проекта методики исследования процессов обрушения и генерации брызг на основе высокоскоростной видеосъемки и подводной теневой подсветки была выполнена серия экспериментов, в которой также принимали участие сотрудники университета Гейдельберга.

Все запланированные изначально экспериментальные исследования выполнены, а также проведены дополнительные.

2. Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование (DNS) устойчиво стратифицированного турбулентного погранслоя над водной поверхностью при числах Рейнольдса до 80000 и крутизнах волн до 0.2 (Рис. 6).

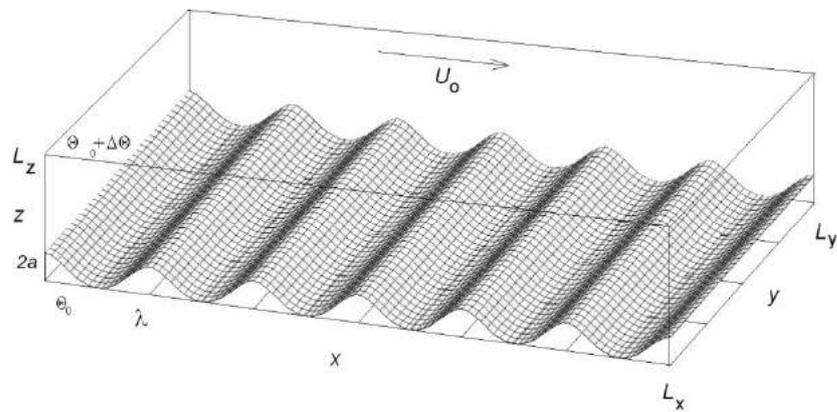


Рис. 6. Схема численного эксперимента по исследованию устойчиво стратифицированного турбулентного воздушного погранслоя над водной поверхностью

Исследованы как стационарный турбулентный режим при достаточно малых числах Ричардсона, так и режим при сильной стратификации воздуха, когда флуктуации скорости и температуры отличны от нуля лишь вблизи водной поверхности. 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.

Разработан алгоритм прямого численного моделирования турбулентного воздушного потока над взволнованной водной поверхностью с заданным спектром возвышений. Проведены расчеты DNS для различных видов спектров, описывающих случай, когда на энергонесущую волну наложена мелкомасштабная рябь с амплитудой, малой по сравнению с амплитудой основной волны (Рис. 7).

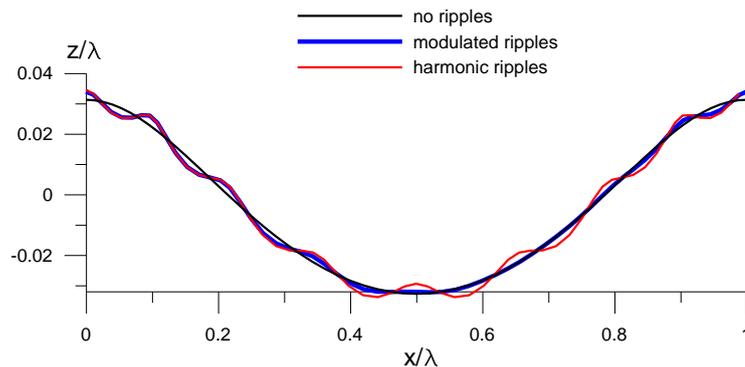


Рис.7. Различные формы возвышений водной поверхности в DNS

Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости и завихренности воздушного потока. Показано, что мгновенные распределения скорости ветра характеризуются присутствием точек отрыва воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля являются безотрывными для рассмотренных видов спектров возвышений водной поверхности.

Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование (DNS) турбулентного воздушного пограничного слоя, несущего мелкодисперсные капли, над взволнованной водной поверхностью с учетом обмена импульсом между воздухом и каплями. Исследовано влияние капель на среднее поле скорости и турбулентный поток импульса в воздушном потоке при различных механизмах инжекции, скорости оседания и массовой доли капель, и крутизны поверхностных волн. Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости и турбулентного потока импульса воздуха, потока импульса от капель к воздуху, и концентрации капель. Показано, что воздействие капель на поток существенным образом зависит как от механизма их инжекции, так и от отношения скорости гравитационного оседания капель к скорости трения и их массовой концентрации.

3. Проведена разработка теоретических моделей и методов расчета турбулентных потоков для использования в оперативных моделях прогноза ППС в условиях нейтральных и долгоживущих устойчивых ППС над водной поверхностью. 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). Проведен пересмотр традиционной теории атмосферных конвективных ППС с учетом нелокальной природы конвективной турбулентности, самоорганизации крупномасштабной конвекции и взаимодействия ППС со свободной атмосферой и турбулентного перемешивания. На основе теоретических исследований и прямого численного моделирования показано, что конвективная турбулентность состоит из хаотических восходящих струек, порождаемых силами плавучести. При этом малые струйки (в отличие от обычных турбулентных вихрей) не разрушаются, а сливаются в более крупные струи. В ходе работы количественно определяется роль конвективных плавучих структур и фоновой турбулентности, в конвективном пограничном слое горизонтально однородной атмосферы (сухой и баротропной). Разработана теория замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термиков, присущих приповерхностному сдвиговому подслою конвективного ППС. Разработана оптимальная версия новой модели замыкания для турбулентных потоков в условиях сильно-устойчиво-стратифицированной свободной атмосферы, учитывающая взаимодействие между механической турбулентностью за счет сдвига скорости, конвективной турбулентностью, средним течением и «конвективными ветрами». Получен универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в устойчиво-стратифицированных турбулентных атмосферных потоках в терминах эффективного числа Рейнольдса. Критерий сформулирован в терминах эффективного числа Рейнольдса, основанного на масштабе длины L для устойчивой стратификации, который был получен в рамках EFB замыкания для устойчивой стратификации и верифицирован на основе экспериментальных данных и результатов прямого численного моделирования (Рис.8).

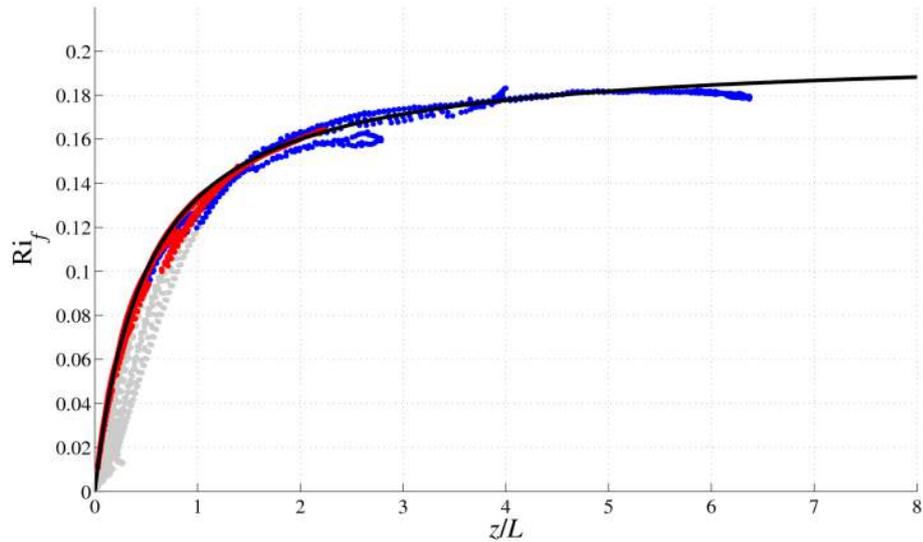


Рис. 8. Зависимость потокового числа Ричардсона, Ri_f , от безразмерной величины z/L , где L – масштаб длины Обухова, в течении Куэтта по результатам экспериментов с двумя DNS-кодами (для прямого численного моделирования турбулентности): ИВМ-РАН (красные точки) и ИПФ-РАН (синие точки). Серые точки относятся к приповерхностному вязко-турбулентному переходному слою: $0 < z\sqrt{\tau} / \nu < 50$, где ν - кинематическая вязкость, τ - суммарный (вязкий + турбулентный) вертикальный турбулентный поток количества движения. Черной сплошной линией показана наша теоретическая модель при стандартном значении постоянной Кармана $k = 0.4$ и эмпирическом значении максимального потокового числа Ричардсона $R_{\infty} = 0.2$, полученном по данным DNS.

4. Осуществлена адаптация модели WAVEWATCH III к условиям внутренних водоемов средних размеров на примере Горьковского водохранилища. Для этого, в первую очередь, в открытом программном коде был изменен ряд параметров. Дальнейшая адаптация модели состояла из двух этапов: подстройка ветровой накачки и "интеграла столкновений". Первый этап подстройки показал существенное улучшение прогноза высоты значительных 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 $C_D(U_{10})$.

Однако также была показана необходимость второго этапа, а именно подстройки схемы нелинейности. Для этого была произведена оценка чувствительности модели к различным комбинациям коэффициентов (λ_{nl}, C) , входящих в схему и отвечающих за отклонение по частоте и за интенсивность взаимодействия соответственно. Были рассмотрены различные комбинации в применении к блоку ветроволнового взаимодействия, предложенного А.Бабаниным.

Для исследования эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. Модель WRF позволяет рассчитывать поля скорости ветра с высоким пространственным разрешением. Для использования модели WRF были подгружены географические данные «modis_lakes» для четырех вложенных доменов с минимальным размером ячейки четвертого домена 1 км. Осуществлено извлечение данных GMTED2010 формата GEOTIFF с разрешением 250 м, данные будут использованы в пятом домене. В качестве начальных метеорологических данных были использованы данные “NCEP Final Analysis (FNL from GFS) (ds083.2)” с разрешением 1⁰.

В указанных настройках модели WRF была исследована эффективность использования моделей приповерхностного слоя атмосферы. Расчеты поля скорости ветра над акваторией водоема были реализованы с подключением различных параметризаций. Во-первых, с подключением параметризации Yonsei University scheme (YSU) для планетарного пограничного слоя (ППС) и схемой для приповерхностного слоя, основанной на теории подобия Монина - Обухова с учетом вязкого подслоя в форме Карлсона – Боланда. Во-вторых, Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) схема ППС со схемой для приповерхностного слоя, основанной на теории подобия Монина - Обухова с длиной термической шероховатости в форме Зилитинкевича. Кроме того, были проведены расчеты скорости ветра при отключенной параметризации ППС, но с учетом турбулентных потоков (вихреразрешающее моделирование).

Результаты расчетов сравнивались с натурными измерениями на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда.

Исследована эффективность алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза волнения.

Усвоение данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW реализовано при помощи «целевого анализа» OBSGRID с использованием стандартной схемы Крессмана. Ассимиляция данных в расчетную модель WRF произведена из базы, накопленной в результате натурных измерений профиля ветра на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда.

3. Основные результаты выполнения проекта (не более 10 стр.)

1. В ходе выполнения экспериментальных работ по проекту были получены следующие основные результаты:

1) По результатам натурных измерений была предложена немонотонная зависимость коэффициента аэродинамического сопротивления, учитывающая наличие минимума в области эквивалентных скоростей ветра 3-4 м/с, резкий рост при приближении к 0 и плавное возрастание с увеличением скорости ветра.

$$C_D = 0.00124U_{10}^{-1} + 0.00034 + 0.000049U_{10}$$

Несмотря на сильно отличающиеся на первый взгляд натурные условия и условия на ветро-волновых каналах, эта зависимость также хорошо описывает полученные в ходе исследований данные лабораторных экспериментов вплоть до скоростей 27 м/с. Начиная с этих скоростей, наблюдается тенденция к насыщению, что неплохо согласуется с небольшим количеством имеющихся данных натурных измерений при сильных ветрах. Поэтому в диапазоне более 27 м/с данные аппроксимируются медленно растущей линейной зависимостью (практически константа).

$$C_D = 0.0015 + 1.24 \cdot 10^{-5} U_{10}$$

Таким образом, в рамках исследований предложена уточненная двухдиапазонная составная балк-формула для параметризации процесса обмена импульсом в широком диапазоне условий (рис.9а).

Превышение пороговой скорости в 27 м/с приводило к существенному изменению характера подстилающей водной поверхности. Начиналось регулярное интенсивное обрушение с образованием пенных гребней и генерацией брызг.

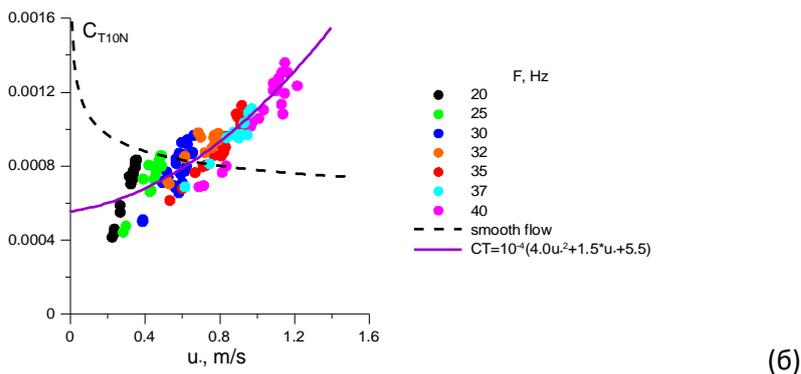
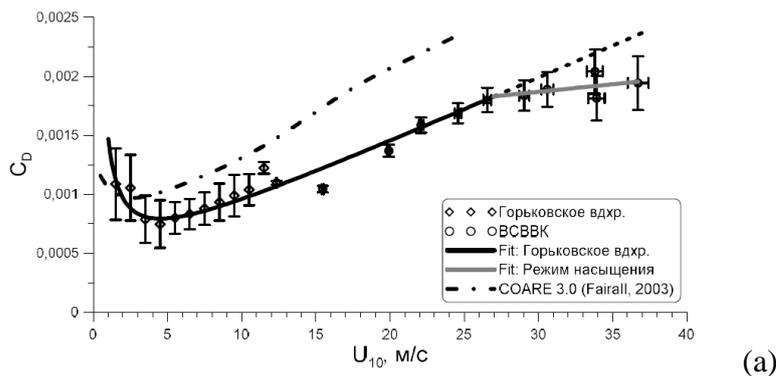


Рис.9. Зависимость коэффициента сопротивления поверхности от скорости ветра(а). \diamond – натурные данные, \circ – результаты лабораторного моделирования. Черная сплошная линия – аппроксимация натурных данных, серая линия – линейная аппроксимация режима насыщения при скорости более 27 м/с, штрих-пунктирная линия – эмпирическая модель COARE 3.0. Зависимость коэффициента переноса тепла от скорости трения ветра. Зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости трения воздушного потока. Черные символы соответствуют скорости вентилятора 20 Гц, зеленый - 25 Гц, синий - 30 Гц, оранжевый - 32 Гц, красный - 35 Гц, циан - 37 Гц, пурпурный - 40 Гц.

В отличие от турбулентного потока импульса (скорости трения) и коэффициента обмена импульсом показано, что температурная шероховатость (поток тепла) и, соответственно, коэффициент переноса тепла (число Стентона) слабо зависит как от скорости, так и от параметров волнения до начала генерации. Брызги, которые начинают генерироваться тоже примерно после 27 м/с, приводят к сильному росту и тенденции к насыщению, как у коэффициента обмена импульсом, не наблюдается (см.рис.9б):

$$C_T = 10^{-4} (4.0u_*^2 + 1.5u_* + 5.5)$$

Однако данные имеют более сильный разброс, чем при изучении обмена импульсом.

2) Исследования влияния пены продемонстрировали ряд интересных результатов. Присутствие пены приводит к уменьшению среднего уклона волн, по сравнению с чистой водой во всем диапазоне скоростей воздушного потока, однако наиболее сильно это сказывается для малых ветров (Рис.10). При изменении скорости ветра во всем диапазоне не происходит значительной (по сравнению с чистой водой) перестройки пиковых значений частоты и волнового числа. Т.е. пена препятствует трансформации волнения. Визуальное наблюдение свидетельствует, что при больших скоростях ветра (более 22 м/с) с началом регулярного обрушения, пена начинает концентрироваться в области гребней и все большее пространство становится свободной от нее. Зависимость коэффициента обмена импульсом в присутствии пены значительно более слабая, чем для чистой воды. Вначале она идет выше, чем для чистой воды, затем пересекает ее в точке, соответствующей скорости ветра примерно 22 м/с и дальше идет чуть ниже.

Обобщая полученные результаты, можно предложить следующее объяснение наблюдаемым эффектам влияния пены. Пена приводит с одной стороны к сглаживанию волнения особенно при малых скоростях ветра (уменьшение уклона), однако за счет своей мелкомасштабной структуры (мелкой шероховатости) она приводит к увеличению коэффициента обмена импульсом.

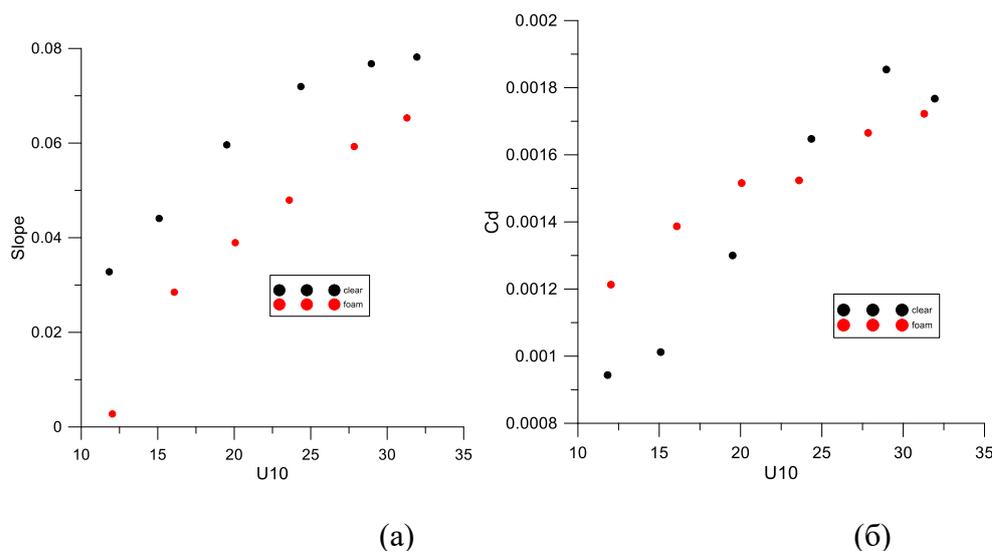


Рис.10. (а) Зависимость среднего уклона поверхности от эквивалентной скорости ветра (б) зависимость коэффициента обмена импульсом (аэродинамического сопротивления) от эквивалентной скорости ветра.

3) При исследовании распределений давления в воздушном потоке, новая методика, основанная на использовании полей скорости вначале была протестирована на основе полученных в ходе DNS расчетов воздушного потока над волнами при крутизне 0.2 и соотношением фазовой скорости к скорости трения 0.05, а затем 0.3 (при той же крутизне). Было продемонстрировано удовлетворительное согласие с полученными, также непосредственно в ходе DNS, расчетами полей распределения давления. После этого методика применялась уже к результатам эксперимента.

Путем выбора оптимальных значений глубины и скорости ветра на установке AELOTRON был подобран режим с наиболее стабильной формой волны и регулярным обрушением. При этом наблюдалась достаточно сильная модуляция. При выходе на стационарный режим пакет насчитывал 5-6 волн, в котором волны обычно регулярно обрушались с максимальной амплитудой. PIV-измерения выполнялись последовательно на трех уровнях с перекрытием окон наблюдения для возможности измерения от впадины волны до высоты 10 см над гребнями, вся область более 50 см. Однако в силу сильной модуляции волнения нужно не просто выполнять усреднение по фазам для всех волн, но и принимать во внимание амплитуду волн, т.е. выбирать ансамбль полей скорости для волн в группе с фиксированным номером. Это существенно увеличивает время исследований т.к. необходимо набирать количество полей скорости в 5-6 раз больше, по сравнению со случаем волн регулярной формы. Также большой проблемой явилась не двумерность воздушного потока в канале, которая увеличивает количество ошибок при определении скорости, а самое главное усложняет корректную "сшивку" полей скорости, полученных с разных уровней наблюдения в единое поле, т.к. съемка на областях перекрытия проводится под разными углами. Поэтому основное внимание было уделено обработке, полей скорости, полученных в экспериментах на установке LASIF, лишенных этих недостатков. На прямоточном LASIF шириной 3 м для получения квазидвумерной регулярно обрушающейся волны в области наблюдения на расстоянии 26 м от начала канала, необходимо было использовать волнопродуктор, т.к. чисто ветровые волны в условиях данного разгона имеют трехмерную структуру. Параметры работы волнопродуктора (амплитуда, частота) удалось подобрать таким образом, чтобы волны были достаточно крутые и регулярно обрушающиеся, а с другой стороны не успевала развиваться модуляционная неустойчивость до области наблюдения.

Были обработаны данные для режима работы волнопродуктора на 0.9 Гц и эквивалентной скорости ветра 14 м/с. Полученные результаты полностью подтвердили работоспособность новой методики определения распределения давления.

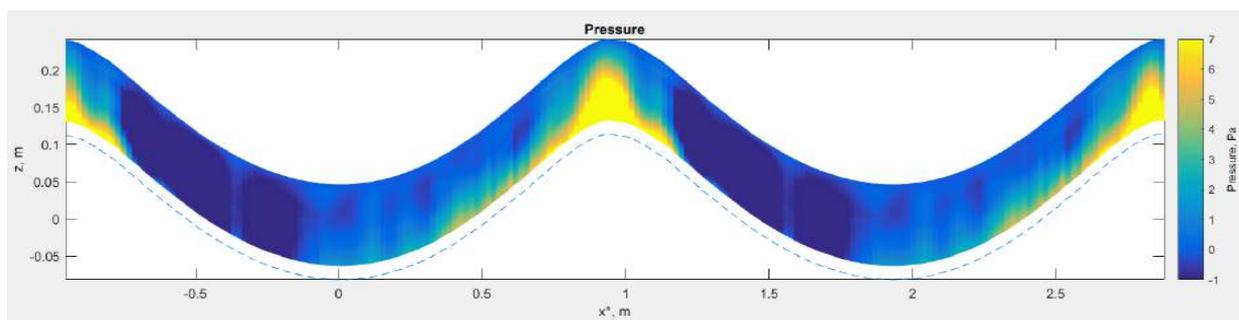


Рис.11. Восстановленное среднее поле давления.

4) В ходе выполнения совместных экспериментальных исследований на разных стендах, научные коллективы обменялись опытом проведения экспериментов. Отработаны методики использования различных оптических методов, основанных на визуализации для одновременного измерения структуры воздушного потока над волнами (PIV), подводных (PIV) и поверхностных течений с помощью активной термографии (TG), а также характеристик волнения, включая параметры поверхностных волн с помощью телецентрической оптической системы и подводной градиентной подсветки, вплоть до капиллярного диапазона (ISG). Было отработано применение различных флуоресцирующих веществ, например Пиранина. Это вещество в щелочной среде флуоресцирует зеленым светом при облучении голубым светом. Был разработан специальный алгоритм определения концентрации пены до эквивалентной скорости ветра 16 м/с. Продемонстрировано, что уменьшение концентрации пены в 2 раза приводило к уменьшению покрытия водной поверхности с 37 до 15%.

2. Прямым численным моделированием (DNS) изучено влияние шероховатости подстилающей водной поверхности на турбулентность в устойчиво-стратифицированном пограничном слое (УСПС) при различных балковых числах Рейнольдса (Re), 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 ka (Рис. 12). Развита теоретическая модель, объясняющая возникновение структур развитием параметрической неустойчивости возмущений, индуцированных в воздушном потоке волнами на поверхности воды. Найдены решения для возмущений полей скорости и температуры хорошо согласующиеся с результатами DNS (Рис. 13). Показано, что увеличение шероховатости границы раздела воды и воздуха, вызванное присутствием волн, приводит к усилению обмена в УСПС.

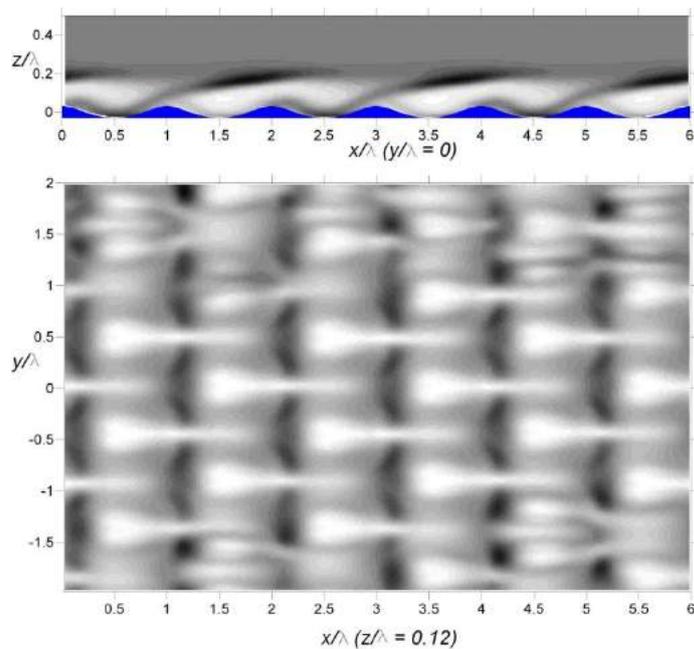


Рис. 12. Мгновенное поле модуля завихренности Ω в устойчиво-стратифицированном погранслое в момент времени $t = 1000$ для $Re = 15000$, $Ri = 0.08$. Крутизна волны $ka = 0.2$, фазовая скорость $c/U_0 = 0.05$.

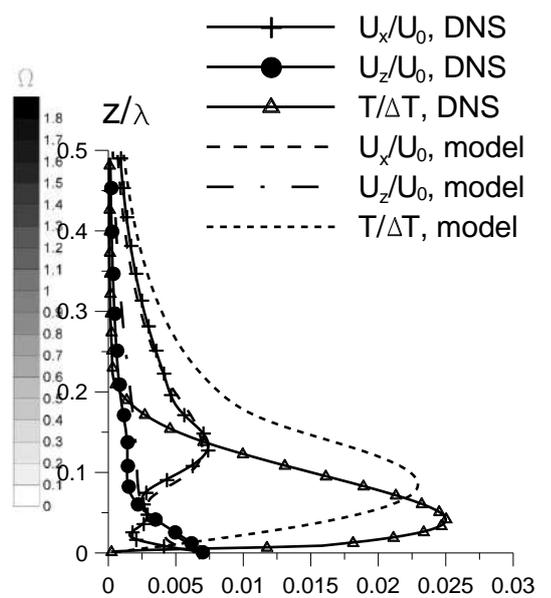


Рис. 13. Возмущения полей в скорости и температуры, индуцированные поверхностной волной.

Разработан алгоритм прямого численного моделирования турбулентного воздушного потока над взволнованной водной поверхностью с заданным спектром возвышений. Проведены расчеты DNS для различных видов спектров, описывающих случай, когда на энергонесущую волну наложена мелкомасштабная рябь с амплитудой, малой по сравнению с амплитудой основной волны. Получены мгновенные и осредненные по ансамблю поля скорости и завихренности воздушного потока (Рис. 14). Показано, что мгновенные распределения скорости ветра, характеризуются присутствием точек отрыва воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля являются безотрывными (Рис. 15).

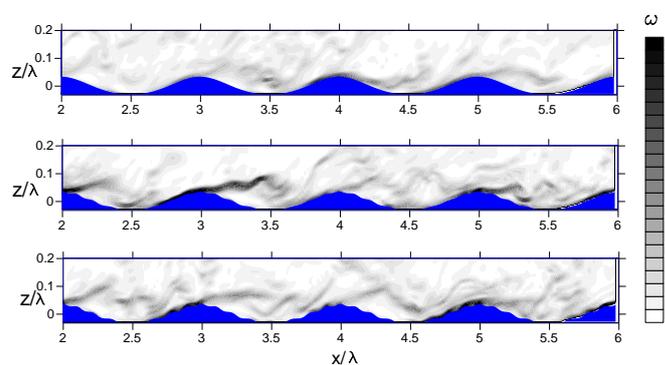


Рис. 14. Мгновенные поля модуля завихренности воздушного потока над взволнованной водной поверхностью при отсутствии ряби (верхняя панель) и для различных спектрах ряби в DNS с крутизной волны $ka = 0.2$ и фазовой скоростью $c/U_0 = 0.05$.

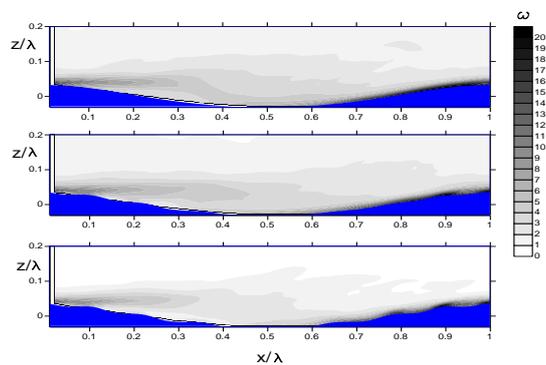


Рис. 15. Поля модуля завихренности, полученные осреднением ее соответствующих мгновенных распределений (панели слева) по ансамблю реализаций (т.е., фазовые средние).

Проведено прямое численное моделирование (DNS) турбулентного воздушного пограничного слоя, несущего мелкодисперсные капли, над взволнованной водной поверхностью с учетом обмена импульсом между воздухом и каплями. Показано, что воздействие капель на поток существенным образом зависит как от механизма их инъекции, так и от отношения скорости гравитационного оседания капель к скорости трения и их массовой концентрации.

3. Разработана теория, описывающая крупномасштабные структуры ППС, при этом предполагается, что флуктуации вертикальной скорости при неустойчивой стратификации осуществляются в основном в виде хаотических восходящих струек, порождаемых силами плавучести, малые струйки сливаются в более крупные струйки. Слияние струек представляет собой не что иное, как обратный каскад энергии, ведущий к возникновению крупномасштабных самоорганизующихся конвективных структур. Получен балковый закон сопротивления конвективного ППС, связывающий напряжение сдвига на поверхности со средним полем ветра на верхней границе ППС.

Разработана теоретическая модель ППС (включающая 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. Основными уравнениями модели являются уравнения для потока импульса, потока тепла, турбулентной кинетической энергии и турбулентной потенциальной энергии в приближении Буссинеска. Модель учитывает и позволяет оценить отрицательную обратную связь между турбулентной кинетической энергией (ТКЭ) и турбулентной потенциальной энергией (ТПЭ), что предотвращает вырождение турбулентности в условиях сильно стратифицированной жидкости. Разработана оптимальная версия новой теории EFB замыкания в условиях сильно-устойчивой стратификации для атмосферного конвективного пограничного слоя с использованием предложенной теоретической модели, включающей в себя набор уравнений баланса для моментов второго порядка в приближении Буссинеска. Предложенная модель замыкания включает в себя следующие предположения: 1) уравнение для коррелятора $\langle u'\theta' \rangle$ в явном виде не решается, хотя в уравнении для потока импульса он включен в член, описывающий перераспределение давления 2) уравнение для коррелятора $\langle w'w' \rangle$ так же не решается; вместо этого используется общее уравнение для турбулентной кинетической энергии и параметризуется вертикальная анизотропия, в результате вводится дополнительная константа (C_0). 3) Максимальное потоковое число Ричардсона R_{im} также определяется эмпирически и включается в список констант в модели. 4) параметризация для декорреляции давления является более простой, чем версия Ротта, используемая в известной модели Mellor-Yamada (MY). Предложенная параметризация основана на «возврате к изотропии» и требует только одной эмпирической константы (C_p), в отличие от MY, где используется три константы. 5) масштаб длины диссипации в уравнении для турбулентной кинетической энергии предполагается идентичным главному масштабу в MY-модели (таким образом, число констант снова сокращается), однако главный масштаб в модели EFB зависит от устойчивости и требует введения константы (C_v). Константы, предложенные в рамках модели, были получены на основе численных расчетов DNS, проведенных в рамках проекта.

На основе сравнения результатов теоретических расчетов с результатами численного моделирования DNS установлена универсальная зависимость безразмерной диссипации турбулентной энергии и потокового числа Ричардсона от безразмерной высоты во всем спектре стратификаций от нейтральных до чрезвычайно сильных.

4. В приспособленной к условиям внутреннего водоема модели WAVEWATCH III проведена оценка чувствительности расчетных данных к изменению параметризации ветровой накачки. Показано заметное влияние изменения параметризации ветроволнового 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). Использование новой параметризации $C_D(U_{10})$, полученной в результате серии натуральных экспериментов на Горьковском водохранилище, уменьшает стандартное отклонение H_S для WAM3 с 52 % до 39 %, для Tolman&Chalikov - с 40 % до 37 %.

Кроме того, в ходе пробных экспериментов в рамках адаптированной модели WAVEWATCH III была протестирована схема нелинейности Discrete Interaction Approximation (DIA), была показана необходимость подстройки комбинации коэффициентов (λ_{nl}, C) , входящих в схему и отвечающих за отклонение по частоте и за интенсивность взаимодействия соответственно. Четырехволновое взаимодействие обычно рассчитывается с использованием одной фиксированной комбинации (λ_{nl}, C) . Например, для блока ветроволнового взаимодействия, предложенного А.Бабаниным, на основе которого проводилась модификация, эта комбинация $(\lambda_{nl}, C)=(0.25, 3*107)$. Были рассмотрены другие комбинации в применении к данному блоку ветроволнового взаимодействия, $(\lambda_{nl}, C)=(0.1, 3*107)$, $(0.4, 3*107)$, $(0.25, 3*106)$, $(0.25, 3*108)$, и проведена оценка чувствительности модели к использованию различных комбинаций коэффициентов (λ_{nl}, C) . Было показано, что эти комбинации оказывают существенное влияние на расчет среднего периода волнения.

Произведена оценка эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы в модели WRF-ARW на основе данных натуральных измерений в приповерхностном слое атмосферы. Реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. Были сопоставлены расчетные данные в рамках различных параметризаций приповерхностного слоя атмосферы и произведено сравнение расчетов с данными натуральных измерений. По всем моделям сделан вывод о тенденции к занижению расчетных данных. При этом сопоставление моделей YSU и WRF LES демонстрирует лучшее соответствие WRF LES натурным данным: как качественно, описывая изменчивость ветра, так и количественно. Также отмечено, что при постоянном ветре поведение модели MYJ близко к YSU, но в случае его резкой изменчивости MYJ дает лучшее соответствие модельных и экспериментальных данных даже без подключения модуля WRF LES. Перспективным направлением дальнейшей работы является использование MYJ совместно с вихреразрешающим моделированием WRF LES и добавление еще одного вложенного домена с более высоким пространственным разрешением.

Проведена оценка эффективности алгоритмов усвоения данных измерений параметров приповерхностного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза

ветра и волнения. Сравнение результатов моделирования и натуральных данных показало занижение расчетных данных как для обычного расчета WRF, так и расчета WRF с ассимиляцией данных по стандартной схеме Крессмана. Однако при этом было отмечено, что результат расчета скорости ветра по WRF с ассимиляцией данных (WRF fdda) дает лучшее соответствие данным натурных измерений с более качественным отслеживанием локальных изменений ветра. Особенно наглядно это демонстрируется при моделировании волнения в WAVEWATCH III, где в качестве форсинга ветром использовался как стандартный расчет модели WRF, так и расчет WRF fdda. В WAVEWATCH III использованы следующие параметризации для расчета параметров волнения: модель WAM3 (ST1) с полученным в результате выполнения данного проекта коэффициентом параметризации аэродинамического сопротивления, а также модель Tolman&Chalikov (ST2) с вышеуказанным коэффициентом параметризации аэродинамического сопротивления.

Таким образом, ассимиляция данных натурных наблюдений позволяет повысить точность прогноза ветра и волнения. Однако требуется ассимиляция данных с большего количества источников измерений, что может быть осуществлено при установке частных переносных метеостанций по периметру водохранилища. Запланированы работы по данному направлению.

Создан прототип модели микроклимата локальной погоды природного ландшафта, содержащего внутренний водоем среднего размера, на примере территории, содержащей и окружающей Горьковское водохранилище. Прогноз атмосферных параметров осуществляется по исходным метеорологическим данным при помощи адаптированной в рамках данного проекта модели WRF. Прогноз волнения на водохранилище осуществляется при помощи адаптированной в рамках данного проекта модели WAVEWATCH III. Запланированы дальнейшие пути развития данной модели микроклимата погоды и прогноза волнения с последующей верификацией.

4. Описание выполненных работ и полученных научных результатов (в том числе степень выполнения проекта) для публикации на сайте РНФ

1. На основе комбинации результатов натурных и лабораторных экспериментов на ветро-волновых каналах, предложена уточненная балк-формула для параметризации коэффициента обмена импульсом от эквивалентной скорости ветра. Выделено два диапазона по скорости ветра, до 27 м/с и более, в которой используются разные зависимости. Продемонстрировано, что, несмотря на сильные отличия реальных условий и ветро-волновых каналов, немонотонная зависимость полученная в диапазоне скоростей менее 12 м/с исключительно на основе натуральных измерений, хорошо описывает результаты лабораторных измерений вплоть до 27 м/с, когда начинает наблюдаться тенденция к насыщению. При этом на поверхности начинается сильное обрушение волн с образованием пены и брызг. В отличие от него коэффициент обмена теплом практически не зависит от скорости ветра как раз до момента начала генерации брызг, а затем начинает наблюдаться сильный рост. Предложены параметризации для коэффициента сопротивления и коэффициента теплообмена. Исследование по влиянию пены на процесс

обмена импульсом и параметры шероховатости взволнованной поверхности, продемонстрировало, что она приводит к уменьшению амплитуд и уклонов волн по сравнению с чистой водой во всем диапазоне исследуемых скоростей, при этом коэффициент обмена импульсом увеличивается по сравнению с чистой водой, для малых скоростей ветра. Разработана модифицированная методика PIV измерений полей скорости. С ее помощью выполнены детальные измерения характеристик воздушного потока над регулярно обрушающимися квазидвумерными волнами. По данным измерений получены поля средней скорости и турбулентного напряжения, что позволило разработать методику определения поля давления на основе интегрирования уравнений, осредненных по турбулентным флуктуациям уравнения Навье-Стокса. Данная методика существенно превосходит имеющиеся возможности контактных измерений распределения давления. Для ее тестирования также использовались результаты расчетов DNS.

В рамках выполнения проекта организовано сотрудничество между ведущими группами Германии, Франции, США, проводящими исследование процессов взаимодействия атмосферы и гидросферы в пограничных слоях.

2. Методом прямого численного моделирования исследованы комплексные процессы обмена импульсом и теплом в атмосферном погранслое над водной поверхностью с учетом стратификации воздуха и в присутствии капиллярной ряби и капель брызг. Обнаружен ранее неизвестный режим флуктуаций в воздушном потоке, реализующийся вблизи достаточно крутых поверхностных волн при сильной устойчивой стратификации воздуха. Для различных видов спектров мелкомасштабной ряби поверхностных волн показано, что мгновенные распределения скорости ветра характеризуются присутствием точек отрыва воздушного потока от водной поверхности, в то время как осредненные поля являются безотрывными. Разработан алгоритм и проведено прямое численное моделирование турбулентного воздушного погранслоя, несущего мелкодисперсные капли, над взволнованной водной поверхностью с учетом обмена импульсом между воздухом и каплями. Показано, что воздействие капель на поток существенным образом зависит как от механизма их инжекции, так и от отношения скорости гравитационного оседания капель к скорости трения и их массовой концентрации.

3. Проведена разработка моделей турбулентного переноса в планетарных пограничных слоях основанная на теоретическом анализе уравнений баланса для моментов второго порядка в приближении Буссинеска, учитывающая анизотропию и взаимную трансформацию кинетической и потенциальной энергии турбулентных флуктуаций. Разработана оптимальная версия новой теории замыкания в условиях сильно-устойчивой стратификации. Сформулирован универсальный критерий турбулентно-ламинарного перехода в турбулентных атмосферных потоках с устойчивой стратификацией. Разработана теория конвективной турбулентности с учетом "анархической" турбулентности и самоорганизующихся конвективных структур. Разработана теория замыкания турбулентных потоков, порождаемых слиянием мелкомасштабных термиков для приповерхностного сдвигового подслоя конвективного ППС.

4. Осуществлена адаптация модели WAVEWATCH III к условиям внутренних водоемов средних размеров на примере Горьковского водохранилища, состоявшая из модификации функции источника, спектрального интервала, диапазона разгонов и модели

нелинейности. Получена оценка чувствительности модели к различным параметризациям ветровой накачки и к различным комбинациям коэффициентов, входящих в схему нелинейности.

Проведена верификация модели на основе сопоставления с данными наблюдений. Произведено моделирование типичных сценариев развития волнения, которые были верифицированы на основе сопоставления расчетов с данными одновременных натуральных наблюдений параметров приводного пограничного слоя и 3-х мерных спектров волнения.

Для исследования эффективности использования моделей приповерхностного слоя атмосферы реализована адаптация модели Weather Research and Forecasting (WRF) к условиям Горьковского водохранилища. В адаптированной модели WRF была исследована эффективность использования моделей приповерхностного слоя атмосферы. Расчеты поля скорости ветра над акваторией водоема были реализованы с подключением различных параметризаций. Результаты расчетов сравнивались с натурными измерениями на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда. Перспективным направлением дальнейшей работы является использование MYJ совместно с вихреразрешающим моделированием WRF LES.

Также проведена ассимиляция данных в расчетную модель WRF из базы, накопленной в результате натуральных измерений профиля ветра на акватории Горьковского водохранилища с использованием автономной плавучей станции на базе океанографической вехи Фруда. Исследована эффективность алгоритмов усвоения данных измерений параметров приводного слоя атмосферы, применяемых в модели WRF-ARW, для прогноза ветра и волнения. Усвоение данных измерений параметров приводного слоя атмосферы в модели WRF-ARW реализовано при помощи «целевого анализа» OBSGRID с использованием стандартной схемы Крессмана, что способствовало повышению точности прогноза ветра и волнения.

Создан прототип модели микроклимата локальной погоды природного ландшафта, содержащего внутренний водоем среднего размера, на примере территории, содержащей и окружающей Горьковское водохранилище, на базе проекта адаптированной модели WRF для прогноза атмосферных параметров и модели WAVEWATCH III для прогноза волнения.

На английском

1. On the basis of a combination of results of field and laboratory experiments, an improved bulk-formula is proposed for the aerodynamic drag coefficient from the equivalent wind speed. There are two ranges for wind speed, up to 27 m / s and more in which different dependencies are used. It was demonstrated that despite the strong differences in real conditions and wind-wave flumes, the nonmonotonic dependence in the speed range obtained in the range of less than 12 m / s almost on the basis of full-scale measurements well describes the results of laboratory

measurements up to 27 m / s, when a tendency to saturation. At the same time, a strong breaking of the waves begins on the surface with the formation of foam and spray. In contrast, the heat exchange coefficient is practically independent of the wind speed just before the start of the spray generation, and then a strong growth begins to occur. Parameterizations for the surface drag coefficient and heat transfer coefficient are suggested. A study of the influence of foam on the process of pulse exchange and parameters of the roughness of the excited surface showed that it leads to a decrease in the amplitudes and slopes of waves compared to pure water over the entire range of the investigated velocities, the momentum transfer coefficient being increased in comparison with pure water, wind speeds. A modified technique for PIV measurements of velocity fields has been developed and detailed measurements of the air flow characteristics over regularly breaking quasi-two-dimensional were carried out. According to the measurement data, the fields of mean velocity and turbulent stress were obtained, which allowed developing a technique for determining the pressure field by integrating the equations of the Navier-Stokes equations averaged over turbulent fluctuations. This technique significantly exceeds the available capabilities of contact measurements of pressure distribution. To test it, we also used the results of DNS calculations.

As part of the project, cooperation has been organized between the leading groups of Germany, France, and the United States to carry out research on the interaction between the atmosphere and the hydrosphere in the boundary layers.

2. Complex turbulent heat and momentum exchange processes in the atmospheric boundary layer over water surface including the effects of capillary ripples and spume drops have been investigated by direct numerical simulation (DNS). The DNS results reveal a new, previously unknown regime of turbulent fluctuations in the air flow in the vicinity of sufficiently steep surface waves under strong stable stratification of the air. The results obtained for different spectra of small-scale ripples imposed on the surface wave show that instantaneous distributions of wind velocity are characterized by the presence of the points of air-flow separation from the water surface whereas mean velocity field remains non-separating. A numerical algorithm has been developed for DNS of turbulent air boundary flow laden with droplets over waved water surface taking into account the momentum exchange between the drops and carrier air. DNS results show that the impact of drops on the air flow strongly depends on the drops injection mechanism and the ratio of drops gravitational settling velocity and air friction velocity, and the drops mass fraction.

3. The development of models of turbulent transport in planetary boundary layers based on a theoretical analysis of the balance equations for second-order moments in the Boussinesq approximation taking into account the anisotropy and mutual transformation of the kinetic and potential energy of turbulent fluctuations is carried out. An optimal version of the new closure model was developed in conditions of strong-stable stratification. A universal criterion for turbulent-laminar transition in turbulent atmospheric flows with stable stratification is formulated. The theory of convective turbulence and convective PBL has been developed taking into account "anarchic" turbulence and self-organizing convective structures. The theory of closure of turbulent flows, generated by the fusion of small-scale thermals for the near-surface shear sublayer of convective PBL, is developed.

4. The adjusting of the WAVEWATCH III model to the conditions of the middle-sized inland waters on the example of the Gorky reservoir is implemented. The adaptation consists of a modification of the source term, spectral range, and the model of nonlinearity. An estimate of the model sensitivity to various parameterizations of wind input, and various combinations of nonlinear parameters is performed.

Verification of the model is made on the basis of a comparison with observational data. The modeling of typical scenarios of wave regime is carried out. It has been verified on the basis of a comparison of calculations with the data of simultaneous field observations of the surface boundary layer parameters and of the 3-D wave spectra.

To study the efficiency of using surface atmospheric models, the Weather Research and Forecasting (WRF) model was adjusted to the conditions of the Gorky reservoir. In the adapted WRF model, the efficiency of using surface layer models was investigated. Simulation of the wind speed field over the water area of the reservoir was realized with various parameterizations. The results of the simulation were compared with field measurements in the Gorky reservoir using an autonomous floating oceanographic Froude buoy. A perspective direction for further research is the use of MYJ together with the WRF LES simulation.

The data accumulated from the full-scale measurements of the wind profile in the Gorky reservoir using an autonomous floating oceanographic Froude buoy was assimilated into the WRF model. The efficiency of the algorithms for the assimilating the measurement data of the surface layer atmospheric parameters used in the WRF-ARW model is studied for the implementation to wind and wave forecasts. The assimilation of the surface layer atmospheric measurements parameters in the WRF-ARW model was realized using the "objective analysis" OBSGRID using the standard Cressman scheme, which results in an increase in the accuracy of the wind and wave forecast.

A prototype of the microclimate model for the local weather of a natural landscape containing an inland medium-sized reservoir was created, using the example of a territory containing and surrounding Gorky reservoir based on the project of the adapted WRF model for the wind forecast and the WAVEWATCH III model for wave forecasting.

5. Возможность практического использования результатов проекта в экономике и социальной сфере (при наличии, в том числе формирование научных и технологических заделов, обеспечивающих экономический рост и социальное развитие Российской Федерации, создание новой или усовершенствование производимой продукции (товаров, работ, услуг), создание новых или усовершенствование применяемых технологий)

Основным направлением дальнейшего практического применения полученных результатов является их использование для развития моделей численного прогноза погоды и климата высокого разрешения, т.е. моделей микроклимата и персональной окружающей среды. В этом могут быть заинтересованы различные отечественные компании и научно-исследовательские организации, государственные структуры, специализирующиеся в различных областях:

1) В первую очередь, связанные с прогнозированием метеорологической, гидрологической и экологической обстановки: подразделения Федеральной службы по

гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды РФ: Яндекс, European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), National Center Atmospheric Research NCAR.

- 2) Занимающиеся развитием добычи полезных ископаемых на шельфе
- 3) Специализирующиеся в области развития альтернативной энергетики в прибрежной зоне (ветровая и волновая энергетика)
- 4) Обеспечивающие водный транспорт, как морской, так и по внутренним водоемам.
- 5) Передовые сельскохозяйственные предприятия.

Также потенциальными потребителями научно-методических разработок, полученных в ходе исследования, являются ВУЗы, готовящие специалистов по специальностям метеорология и гидрология, физика атмосферы и гидросферы, океанология (РГГМУ, МГУ, СПбГУ, ННГУ, и.т.д.).