ЛАБОРАТОРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕНА ИМПУЛЬСОМ И ТЕПЛОМ ПРИ ВЕТРОВОЛНОВОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ УСЛОВИЙ, ВКЛЮЧАЯ ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ (УРАГАНЫ И ШТОРМА)

Сергеев Д.А.¹, Вдовин М.И.¹, Троицкая Ю.И.¹

¹ *Институт прикладной физики РАН, 603950, Нижний Новгород, Ульянова, д. 46, e-mail: sergeev4758@gmail.com*

The report is devoted to the investigations of the influence of surface roughness and spray on the momentum and heat exchange between atmosphere and ocean including severe conditions on the base of laboratory modeling on the Thermostratified Wind-Wave Tank IAP RAS.

Турбулентные потоки импульса и тепла на поверхности моря определяют обмен энергией и импульсом между атмосферой и океаном. Эти величины являются важной составной частью моделей циркуляции атмосферы и океана, которые представляют собой один из основных инструментов климатических исследований, прогнозирования погоды, моделирования процессов в пограничных слоях и т.д. На масштабе пограничного слоя они являются ключевыми параметрами, которые определяют генерацию волн и формирование верхнего перемешанного слоя океана.

При численном моделировании климата и погоды турбулентные потоки импульса и тепла между атмосферой и океаном количественно выражаются через «балк»-формулы, которые связывают их со средними метеорологическими величинами, измеренными на стандартной высоте 10 м (скоростью ветра U_{10} , перепадом температур $\Delta T_{10} = T_{10} - T_0$ между воздухом и водой), используя определения коэффициентов обмена: C_T – импульсом (коэффициент сопротивления), C_H – теплом (см. [1]).

Исследования обмена импульсом в широком диапазоне условий, в том числе при сильных ветрах, выполнялись во многих экспериментальных исследованиях. К настоящему времени можно считать достоверно установленным факт тенденции насыщения аэродинамического сопротивления при превышении порогового значения U_{10} около 25–27 м/с (см. [2]). После превышения этого порога коэффициент сопротивления практически перестает расти с ростом скорости ветра. Это связывают в первую очередь с влиянием обрушений волн, образованием пены

и началом генерации брызг. Экспериментальные данные о зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра характеризуются более значительным разбросом, чем для импульса [1, 3, 4].

Целью настоящего исследования является изучение влияния волнения на поверхности воды на обмен импульсом и теплом в приводном пограничном слое воздуха. Сложность подобного исследования связана с тем, что волны возбуждаются ветром, и трудно отличить вклад в теплоперенос, вызванный волновыми возмущениями, от влияния особенностей турбулентного переноса, определяемого скоростью ветра. Главным отличием настоящего исследования от предшествующих экспериментальных работ и натурных наблюдений, перечисленных выше, является применение искусственного, независимого от скорости ветра управления параметрами волнения. В связи с этим удалось оценить вклады ветра и волнения в коэффициенты передачи тепла и импульса, а также в температурную шероховатость.

Была выполнена серия экспериментов на Ветро-волновом канале Термостратифицированном бассейне (ВВТСБ) ИПФ РАН по изучению процессов обмена импульсом и теплом в устойчиво температурностратифицированном турбулентном пограничном слое воздушного потока над взволнованной поверхностью. Эксперименты были проведены в широком диапазоне скоростей ветра и параметров шероховатости (волн), включая экстремальные с интенсивным обрушением волн и образованием брызг. Для создания температурной стратификации приводного слоя ветра, воздух, поступающий в канал, нагревался до 30–40 градусов (в зависимости от скорости воздушного потока). Температура поверхности воды при этом в ходе всех экспериментов поддерживалась постоянной – около 15°C. Исследования проводились в широком диапазоне скоростей ветра. Максимальная скорость на оси канала от 8,8 м/с до 19 м/с, что соответствовало эквивалентной скорости 10–36 м/с. Особенностью настоящего эксперимента являлось наличие возможности изменения характера поверхностного волнения независимо от скорости ветрового потока в канале. Для этого вдоль всего канала была натянута полиэтиленовая москитная сетка толщиной 0,25 мм и ячейкой 1,6×1,6 мм. Эта сетка не влияла на теплообмен, зато характеристики поверхностного волнения менялись в зависимости от уровня положения сетки. Одновременные измерения профилей скорости и температуры воздуха в рабочей секции канала (на расстоянии 6,5 м от входа в канал) проводилось при помощи трубки Пито вместе дифманометром и пленочным термоанемометром. Оба датчика были закреплены на вертикальном сканирующем

устройстве. Для измерения температуры поверхностного слоя воды в рабочей секции находился специальный датчик температуры. Параметры волнения измерялись с помощью трехканального струнного волнографа. Для получения 3D спектров (частота, модуль волнового числа, направление) применялся FDM метод. Для контроля параметров брызг был использован специальный косвенный метод, основанный на эффекте сильного падения сигнала с термоанемометра в рабочей секции. На основе интегрального анализа сигнала были получены оценки параметра, характеризующего поток брызг на уровне значительной высоты волнения.

Рис. 1. Схема эксперимента на ВВТСБ (все размеры в см.): 1) корпус ветроволнового канала, 2) стойки канала, 3) система формирования воздушного потока, 4) термоанемометр для контроля параметров воздушного потока на входе в канал, 5) мелкоячеистая пластиковая сетка натянутая под поверхностью, 6) волногаситель, 7) трубка Пито на сканирующем устройстве, 8) термоанемометр вместе с Пито, 9) 3-хканальный струнный волнограф, 10) датчик измерения температуры поверхности воды.

Были получены профили средней скорости и температуры в рабочей секции канала (для дальнейшей обработки из температурных профилей была вычтена температура поверхностного водного слоя). В безразмерных переменных, связанных с максимумом скорости и температуры и толщиной погранслоя, дефекты профилей демонстрируют автомодельный характер. Поэтому, в соответствии с «законом следа», использовалась параболическая аппроксимация следной части профилей. По данной аппроксимации были определены значения величин скорости трения, температурной шероховатости и констант в автомодельных зависимостях и доверительные интервалы их

определения. Пользуясь ими, по логарифмической части профилей были получены эквивалентная скорость ветра U_{10} и разница температуры ΔT_{10} . В итоге были вычислены значения коэффициентов C_D и C_T . Построены зависимости коэффициентов от параметров воздушного потока и характеристик волнения.

Было показано, что C_D растет при увеличении скорости ветра и крутизны волнения как при наличии брызг в потоке, так и до начала их генерации. Температурная шероховатость остается постоянной до условий появления брызг, а коэффициент теплообмена C_T в этом случае растет только за счет того, что он является комбинацией C_D и температурной шероховатости. Оба коэффициента продемонстрировали высокую корреляцию с параметром характеризующим поток брызг (более 0.75) при их присутствии в потоке. Таким образом, можно сделать вывод, что генерация брызг приводит к увеличению как C_D , так и C_T . Однако для теплообмена брызги играют решающую роль, т.к. в отличие от обмена импульсом, как было показано, он не зависит от формы подстилающей поверхности.

Работа выполнена при поддержке проектов РФФИ 18-05-00265, 17-05-00703, 16-55-52022 и РНФ 14-17-00667 (выполнялась обработка данных).

ЛИТЕРАТУРА

1. Fairall C.W., Bradley E.F., Hare J.E., Grachev A.A., and Edson J.B. Bulk parameterization of air-sea fluxes: updates and verification for the COARE algorithm // J. Climate. 2003. Vol.16. No. 4. P. 571–591.
2. Troitskaya Yu. I., Sergeev D.A., Kandaurov A.A., Baidakov G.A., Vdovin M.A., and Kazakov V.I. Laboratory and theoretical modeling of air-sea momentum transfer under severe wind conditions // JGR. 2012. Vol. 117. C00J21. 13 p.
3. Ocampo-Torres F.J., Donelan M.A., Merzi N., and Jia F. Laboratory measurements of mass transfer of carbon dioxide and water vapour for smooth and rough flow conditions // Tellus. Ser. B. 1994. Vol. 46. P. 16–32.
4. Drennan W.M., Zhang J., French J.R., McCormick C., and Black P. G. Turbulent fluxes in the hurricane boundary layer. Part II: Latent heat flux // J. Atmos. Sci. 2007. Vol. 64. P. 1103–1115.