

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ ОКЕАНА

УДК 551.465.15

DOI: 10.22449/0233-7584-2018-4-329-342

Экспериментальная оценка скорости диссипации турбулентной энергии в подповерхностном слое моря в штормовых условиях

А. М. Чухарев*, А. Г. Зубов, О. И. Павленко

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

**E-mail: alexchukh@mail.ru*

Поступила в редакцию 10.01.2018 г., после доработки – 04.04.2018 г.

На основе экспериментальных данных о приповерхностной турбулентности сделана оценка скорости диссипации турбулентной энергии, обусловленной обрушивающимися поверхностными волнами. Исследования выполнялись на океанографической платформе в прибрежной зоне Черного моря специализированным измерительным комплексом «Сигма-1». Из общего массива для анализа данных были выбраны гидрометеорологические ситуации с большой скоростью ветра и значительным количеством обрушивающихся волн. Расчет скорости диссипации турбулентной энергии на единицу объема ε проводился по спектрам пульсаций скорости на основании гипотез Колмогорова об инерционном интервале спектра турбулентности. Скорость диссипации на единицу площади поверхности моря рассчитывалась интегрированием по глубине величин ε , определенных на всех горизонтах измерений с экстраполяцией до поверхности и до дна. Результаты, полученные по экспериментальным данным, сопоставлялись с расчетами потерь энергии волн на обрушения по модели Филлипа (1985 г.). Рассчитанные величины параметра обрушений b в предположении о его модельной зависимости от волнового числа отличаются от оценок других авторов в меньшую сторону. Во втором способе расчета предполагалось постоянство параметра обрушений в каждом отдельном эксперименте и отсутствие его зависимости от волнового числа. Найденные значения b имеют умеренный разброс и также оказались меньше оценок (в пределах одного порядка величины), имеющихся в литературе. Значения b в этом случае удовлетворительно аппроксимируются константой $b_c \approx 1,31 \cdot 10^{-4}$. Расхождения с другими источниками могли быть обусловлены иными характеристиками волнения и разными методами оценки скорости диссипации.

Ключевые слова: обрушение волн, морская турбулентность, диссипация турбулентной энергии, натурные измерения.

Благодарности: работа выполнена в рамках государственного задания №0827-2018-0003 при финансовой поддержке РФФИ, проект №16-05-00664.

Для цитирования: Чухарев А. М., Зубов А. Г., Павленко О. И. Экспериментальная оценка скорости диссипации турбулентной энергии в подповерхностном слое моря в штормовых условиях // Морской гидрофизический журнал. Т. 34, № 4. С. 329–342. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-329-342

Experimental Estimation of the Turbulent Energy Dissipation Rate in the Sea Subsurface Layer at Storm Conditions

A. M. Chukharev*, A. G. Zubov, O. I. Pavlenko

Marine Hydrophysical Institute, Russian Academy of Sciences, Sevastopol, Russia

**e-mail: alexchukh@mail.ru*

Rate of the turbulent energy dissipation arising due to the breaking surface waves is estimated based on the experimental data on near-surface turbulence. The studies were carried out on the oceanographic platform in the Black Sea coastal zone by the specialized measuring complex "Sigma-1". To analyze the data, specific hydrometeorological conditions including high wind speed and significant number of breaking waves were chosen from the total

© Чухарев А. М., Зубов А. Г., Павленко О. И., 2018

data array. The turbulent energy dissipation rate per unit of volume ε is calculated using the spectra of velocity fluctuations based on the Kolmogorov hypotheses on the inertial-range spectrum of turbulence. The dissipation rate per unit of area of the sea surface is calculated by the over depth integrating the values of ε defined on all the measurement horizons with their extrapolation up to the surface and bottom. The results provided by the experimental data are compared to the wave energy losses due to breaking calculated by the Phillips model (1985). The values of the breaking parameter b calculated under the assumption on its model dependence upon the wave number are smaller than the estimates obtained by the other authors. The second method of calculation implies an assumption that the breaking parameter is constant in every single experiment and does not depend on the wave number. The obtained values of b are of moderate spread and also smaller (within one order of magnitude) than the estimates obtained by the other authors. In this case the values of b are satisfactorily approximated by the constant $b_c \approx 1.31 \cdot 10^{-4}$. Discrepancy between the obtained results and those in the other sources can be conditioned by the differing waves' characteristics and methods for estimating the dissipation rate.

Keywords: breaking waves, marine turbulence, turbulent energy dissipation, field measurements.

Acknowledgements: the investigation is carried out within the framework of the state task № 0827-2018-0003 at financial support of RFFI, project № 16-05-00664.

For citation: Chukharev, A.M., Zubov, A.G. and Pavlenko, O.I., 2018. Experimental estimation of the turbulent energy dissipation rate in the sea subsurface layer at storm conditions. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*, [e-journal] 34(4), pp. 329-342. doi:10.22449/0233-7584-2018-4-329-342 (in Russian).

Введение

Многообразие процессов и сложные взаимосвязи между ними в сопряженных слоях океана и атмосферы являются причиной того факта, что надежная параметризация взаимодействия двух сред при различных гидрометеорологических условиях еще далека от завершения. Турбулентность в приповерхностном слое моря оказывает значительное влияние на перераспределение потоков тепла, импульса, различных растворенных веществ. Большая изменчивость внешних условий и зависимость интенсивности турбулентного обмена от множества факторов являются препятствием для построения точных количественных соотношений, которые позволили бы с уверенностью рассчитать турбулентные потоки вблизи поверхности. Различные механизмы генерации турбулентности, существующие в верхнем слое океана, дают разный вклад в турбулентный обмен в зависимости от гидрометеорологической ситуации.

В работе [1] отмечается, что обрушение поверхностных волн – один из наиболее мощных источников турбулентности в верхнем слое океана. Этот существенно нелинейный процесс является основным механизмом сбрасывания энергии волн, который ограничивает их рост, при этом часть энергии волны трансформируется непосредственно в энергию турбулентности и дрейфового течения.

На глубокой воде обычно различают ныряющие и скользящие буруны. В первом случае обрушивающаяся часть жидкости падает на передний склон волны на некотором расстоянии от гребня, во втором жидкость скатывается по переднему склону, образуя характерный «барашек». Скользящие буруны могут терять до 10% от основной энергии волны, переходящей в турбулентность и взвешивание пузырьков воздуха, эта величина возрастает до 25% или более для ныряющих бурунов [2].

Различными авторами предлагались разные критерии обрушения волн:

- кинематические, которые учитывают фазовую скорость волны и скорости частиц [3];
- геометрические, основанные на изменении профиля волны в процессе ее развития [2];

– динамические, где рассматриваются такие характеристики волны, как ускорение гребня, скорость роста импульса и энергии, а также эволюция энергии высших гармоник [2, 4].

Возможные механизмы, приводящие к обрушениям волн в открытом океане, классифицированы в работе [5]. К ним относятся межволновое взаимодействие, конвергенция энергии, взаимодействие волн и течений и другие. Предполагается, что в зависимости от условий возникновения обрушений их динамика может отличаться, но исследований в этом направлении пока не проводилось, и в настоящей работе эти аспекты не рассматриваются.

В зависимости от доминирующего механизма генерации турбулентности в приповерхностном слое распределение энергии турбулентности по глубине будет различным. В настоящее время наиболее объективной характеристикой интенсивности турбулентности считается скорость диссипации турбулентной энергии ε , величину которой можно определить экспериментально на основе прямых измерений турбулентных пульсаций. По этой причине обычно проводится сравнение с теоретическими оценками именно величины ε . Она определяется как

$$\varepsilon = \frac{\nu}{2} \overline{\left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right)^2},$$

где ν – кинематическая вязкость; u' – пульсации скорости, $i, j = 1, 2, 3$.

В работах [6, 7] глубина проникновения обрушивающейся части волн разных типов оценивалась с привлечением теории турбулентных струй. Было определено, что эта глубина находится в пределах $3-4h$, где h – средняя высота волн.

Одними из наиболее цитируемых исследований о повышенной диссипации турбулентной кинетической энергии вблизи поверхности моря являются работы [8–10]. В них показано, что уровни диссипации превосходят те, которые дает аналогия пристеночного слоя на глубинах, меньших $10H_s$. Авторы [8] аппроксимировали свои данные кривой

$$\frac{\varepsilon H_s \rho_w}{F_{TD}} = 0,3 \left(\frac{z}{H_s} \right)^{-2}, \quad (1)$$

где H_s – высота значительных волн; ρ_w – плотность воды; F_{TD} – приток энергии от ветра; глубина z отсчитывается от среднего уровня морской поверхности. От поверхности до глубины $0,6H_s$ предполагался слой с постоянной величиной диссипации. Эта глубина была установлена исходя из того, что диссипация, интегрированная по всему водному столбу, равнялась притоку энергии от ветра. На основании этих исследований наиболее реалистичной до недавнего времени считалась трехслойная схема распределения диссипации: в самом верхнем слое ε примерно постоянна и определяется воздействием обрушивающихся волн, ниже находится промежуточный слой, или слой переноса, где $\varepsilon \sim z^{-2}$, и еще ниже зависимость ε от глубины становится аналогичной пристеночному слою: $\varepsilon \sim z^{-1}$ [6]. Глубина верхней зоны $z_b \approx 0,6H_s$,

здесь теряется примерно половина всей диссипируемой энергии, глубина зоны переноса $8,3 < z_t / H_s < 13$.

Ряд экспериментальных исследований, проведенных в последние годы в Скриппсовском институте океанографии (*Scripps Institution of Oceanography, California, USA*), дает существенный вклад в изучение особенностей турбулентности, обусловленных влиянием обрушивающихся поверхностных волн. В работах [11–13] и других рассмотрены различные аспекты волновых обрушений, сделаны экспериментальные оценки параметров, характеризующих потери энергии волны и трансформацию этой энергии в турбулентность. Из результатов этих работ также следует, что вблизи поверхности моря наблюдаются повышенные значения энергии турбулентности.

В отличие от [8] и [10] в [13] масштабирование диссипации проводилось с использованием волновой диссипации F_{ds} , которая определяется как

$$F_{ds} = \rho_w g \int S_{ds}(k, \theta) k dk d\theta, \quad (2)$$

где S_{ds} – диссипируемая часть энергии в волновом спектре; k – волновое число; θ – угол направления распространения волн. Решение использовать F_{ds} вместо F_{TD} обусловлено тем, что F_{ds} является более точной мерой потерь энергии волновым полем при больших значениях возраста волн c_p / u_* , которые наблюдались при проведении экспериментов, описанных в [13]. При невысоких значениях $c_p / u_* = 13–29$ (в этом диапазоне проводились эксперименты [8, 10]) величины F_{ds} и F_{TD} оказались близкими [13]. При глубинах $z/H_s > 0,6$ измеренные профили диссипации в работе [13] приблизительно соответствовали зависимости z^{-2} , найденной в [10]. Однако разброс был значительный, и в измерениях [13] величины ε оказались ниже, чем в [10], по крайней мере на глубинах $O(H_s)$. Это, видимо, объясняется разными системами отсчета, так как в [13] глубина отсчитывалась от мгновенной поверхности. На глубинах выше $0,6H_s$ результаты [13] показали изменение профиля диссипации как z^{-1} . Это не противоречит данным [8, 10], так как измерения в этой области глубин не проводились. Недавние исследования также не показали постоянной величины ε , предполагаемой в [8, 10]. В работе [14] был определен профиль диссипации z^{-1} в диапазоне глубин $0,3H_s – 2H_s$. Однако полученная зависимость не соответствовала классической пристеночной аналогии

$$\varepsilon_{wl} = \frac{u_{*w}^3}{\kappa z}, \quad (3)$$

а превосходила ее в 5–20 раз. Здесь κ – постоянная Кармана; u_{*w} – динамическая скорость (скорость трения) в воде. В [14] было найдено, что наибольшее отношение $\varepsilon/\varepsilon_{wl}$ наблюдалось при слабых ветрах, наименьшее – при сильных.

Несмотря на заметные успехи в изучении сложного явления обрушений волн, пока не существует общепринятых методов расчета энергии турбулентности, обусловленной влиянием обрушений. Остается не до конца выясненным и вопрос о величинах параметров в формулах для расчета характеристик обрушивающихся волн [15].

Целью настоящей работы является экспериментальная оценка скорости диссипации турбулентной энергии под обрушивающимися волнами, определение параметра обрушений в модели Филлипса [15] и сопоставление с оценками других авторов, также берущих за основу эту модель.

Теоретическая модель

В фундаментальной работе Филлипса [15], посвященной спектральному описанию ветровых волн и статистических характеристик обрушений, был введен размерный параметр для оценки интенсивности обрушений $\Lambda(c)dc$, который представляет собой длину обрушивающегося фронта на единицу площади поверхности моря в диапазоне фазовых скоростей волн от c до $c+dc$:

$$L = \int \Lambda(c)dc, \quad (4)$$

здесь L – общая длина обрушивающихся фронтов на единицу поверхности моря. В единицу времени доля морской поверхности, занятая проходящими обрушивающимися фронтами, определяется через первый момент $\Lambda(c)$ [15]:

$$R = \int c\Lambda(c)dc. \quad (5)$$

При этом оценка средней скорости потери энергии буруном со скоростями от c до $c+dc$ на единицу площади определяется через пятый момент по формуле [15]:

$$\varepsilon_s(c)dc = bg^{-1}c^5\Lambda(c)dc, \quad (6)$$

где $\varepsilon_s(c)dc$ – средняя скорость потери энергии на единицу площади; b – безразмерный параметр, характеризующий интенсивность обрушений; g – ускорение свободного падения. Филлипс считал b константой, но в лабораторных экспериментах [16, 17], а также на основании натуральных измерений [11] было показано, что b не является постоянной величиной и, более того, меняется в диапазоне до трех порядков величины. На основании описанных в [11] специализированных экспериментов была предложена модельная формула зависимости этого параметра от волнового числа:

$$b(k) = A_1[B(k)^{1/2} - B_T^{1/2}]^{5/2}, \quad (7)$$

где A_1 и B_T – константы; $B(k)$ – азимутально-интегрированный спектр насыщения поверхностных волн, введенный Филлипсом [15]:

$$B(k) = \int F(\mathbf{k})k^4 d\theta,$$

здесь \mathbf{k} – волновой вектор; $F(\mathbf{k})$ – пространственный спектр волнения. Волновой спектр по направлениям и волновым числам определяется как

$$\langle \eta^2 \rangle = \int F(k, \theta)kdkd\theta,$$

где η – смещение поверхности от равновесного положения, угловые скобки – осреднение по пространству. Расчет спектра насыщения проводится по соотношению [11]:

$$B(k) = a_k^2 k^2 \frac{k}{\delta k}, \quad (8)$$

где a_k – спектральная компонента волнения для данного волнового числа k ; δk – спектральное разрешение.

Учитывая дисперсионное соотношение для гравитационных волн на глубокой воде $\omega^2 = gk$ и выражение для фазовой скорости $c^2 = g/k$, в зависимости (7) можно перейти к шкале фазовой скорости c .

В работе [12] на основе натуральных экспериментов был определен вид функции $\Lambda(c)$. Для $c > c_p$ это распределение описывается степенной функцией от фазовой скорости волн и зависит также от высоты волнения и фазовой скорости спектрального пика:

$$\Lambda(c)c_p^3 g^{-1} \left(\frac{c_p}{u_{*w}} \right)^{0.5} = 0,05 \hat{c}_p^{-6}, \quad (9)$$

$$\hat{c}_p = \left(\frac{c}{\sqrt{gH_s}} \right) \left(\frac{gH_s}{c_p^2} \right)^{0.1}, \quad (10)$$

где $H_s = 4\sigma$ – высота значительных волн (σ – стандартное отклонение морской поверхности от равновесного положения); c_p – фазовая скорость спектрального пика волнения. Динамическая скорость рассчитывается через скорость ветра:

$$u_{*w} = \left(\frac{\rho_a C_D}{\rho_w} \right)^{1/2} V_{10}.$$

Здесь ρ_a и ρ_w – плотность воздуха и воды соответственно; C_D – коэффициент сопротивления поверхности, обычно определяемый по эмпирической формуле

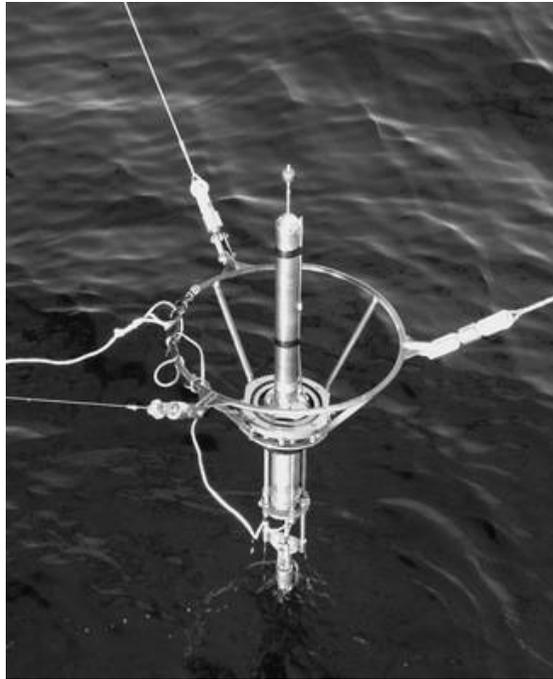
$$C_D = 0,001(0,75 + 0,067V_{10}).$$

Через V_{10} обозначена скорость ветра на высоте 10 м.

Таким образом, с помощью описанных модельных и эмпирических соотношений мы можем оценить поток энергии от обрушивающихся волн в (6) и сопоставить с нашими экспериментальными данными об интенсивности турбулентности в приповерхностном слое.

Натурные измерения

На протяжении ряда лет сотрудниками отдела турбулентности Морского гидрофизического института (МГИ) РАН проводились натурные измерения турбулентных характеристик в приповерхностном слое моря, в том числе в штормовых условиях, при наличии обрушивающихся волн. Измерения осуществлялись на стационарной океанографической платформе Черноморского гидрофизического полигона РАН в пгт Качивели (Крым). Использовался позиционный вариант измерительного комплекса «Сигма-1» [18], общий вид которого показан на рис 1.



Р и с. 1. Общий вид позиционного варианта измерительного комплекса «Сигма-1»
Fig. 1. General view of positional variant of the measuring complex "Sigma-1"

Конструкция корпуса и специально разработанная система позиционирования [19] позволяют фиксировать прибор на выбранном горизонте от поверхности до глубины ~20 м, сводя к минимуму его собственные колебания. При этом вся система утяжеляется грузом, расположенным ниже прибора на расстоянии 4 м, чтобы исключить его влияние на измерения. В состав измерительного комплекса входит блок контроля положения, который регистрирует собственные движения прибора. Это дает возможность специальной обработкой удалять из записей паразитные колебания, которых механически полностью избежать не удастся [20]. Измерительный комплекс с помощью кабеля связи соединен с бортовым приемным устройством, регистрация и накопление полученной информации осуществляется персональным компьютером в реальном времени. Прибор отнесен в мористую сторону от платформы, что устраняет влияние опор на область измерения, т. е. обеспечивается получение данных в естественной среде. Согласно специально проведенным исследованиям, характеристики волнения в районе платформы можно считать соответствующими условиям открытого моря при течении и волнении, идущих из определенного азимутального сектора [21].

Скорость диссипации турбулентной энергии ϵ рассчитывалась по методу, предложенному в [22] и описанному также в [1]. При этом искажения, вносимые в измеряемый сигнал волнением и колебаниями прибора, не оказывают существенного влияния на результат. Таким же способом определялась скорость диссипации в [23]. Метод разработан с учетом гипотезы Колмогорова об инерционном интервале спектра турбулентности, в соответствии

с этой гипотезой спектральная плотность пульсаций скорости может быть представлена в виде

$$E(k) = \varepsilon^{1/4} \nu^{5/4} F(\lambda),$$

где $F(\lambda)$ – универсальная функция (модельный спектр); $\lambda = k / (\varepsilon^{1/4} \nu^{-3/4})$ – безразмерное волновое число. Скорость диссипации определялась из условия наилучшего совпадения экспериментальных и модельных спектров, кинематическая вязкость рассчитывалась по измеренным температуре и солёности, в качестве модельного использовался спектр Насмита [24]. Измеренные величины пульсаций скорости сначала обрабатывались медианным фильтром, по ним рассчитывался частотный спектр, который затем пересчитывался в спектр волновых чисел по гипотезе «замороженной турбулентности» Гэйлора: $U_d = \omega/k$, где U_d – скорость переноса турбулентных вихрей через датчик; ω – угловая частота. В качестве переносной скорости бралась средняя скорость основного течения. Для сопоставления использовались значения ε , рассчитанные по пульсациям вертикальной скорости, так как она наименее подвержена влиянию собственных колебаний прибора.

Для анализа из всего массива данных были выбраны штормовые условия с развитым волнением и большим количеством обрушивающихся волн, которые преимущественно относились к скользящему типу. Основные гидрометеорологические условия в этих экспериментах приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

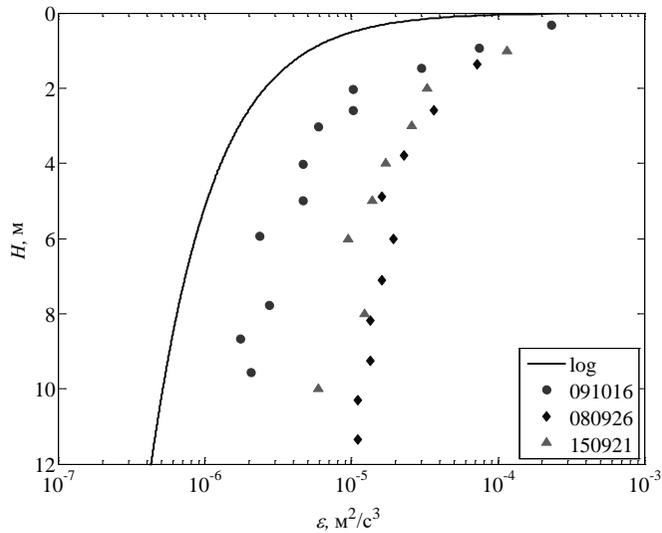
Table 1

Основные гидрометеорологические условия при натурных измерениях, выбранных для анализа
Basic hydrometeorological conditions during the field measurements chosen for analysis

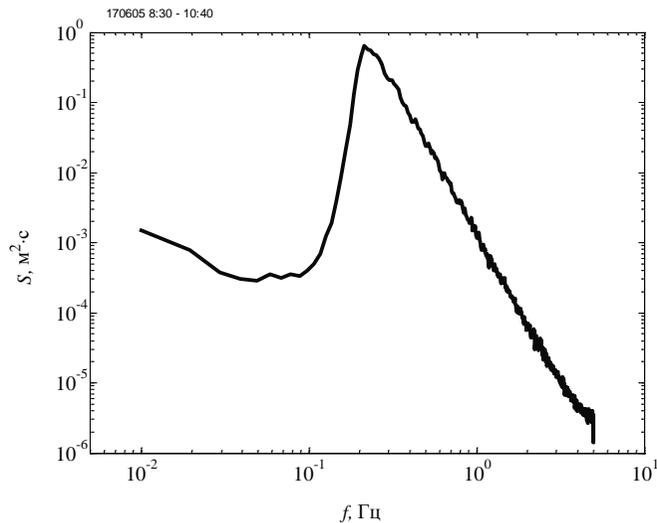
Дата/Date	Местное время/ Local time	V_{10} , м/с/м/s	H_s , м/m	V_{10}/c_p	f_p , Гц/Hz
26.09.2008	14:43–17:01	15,4	1,6	1,58	0,16
27.09.2008	10:51–13:09	6,4	1,6	0,66	0,16
14.10.2009	09:45–11:43	13,4	1,16	1,37	0,16
16.10.2009	10:57–13:31	9,8	0,58	1,38	0,22
09.10.2013	16:17–18:01	8,1	0,5	0,33	1,71
15.10.2013	16:44–18:05	7,5	0,31	2,16	0,45
16.10.2013	15:11–16:25	6,9	0,59	0,86	0,195
17.10.2013	11:14–12:28	9,2	0,85	1,24	0,21
21.09.2015	12:28–14:04	6,3	0,26	0,65	0,16
24.09.2015	09:02–11:13	9,9	0,46	1,33	0,21
04.06.2017	10:59–12:52	11	0,72	1,83	0,26
05.06.2017	08:30–10:41	16	1,16	2,15	0,21

П р и м е ч а н и е: V_{10} , м/с – скорость ветра на горизонте 10 м; H_s , м – высота значительных волн; V_{10}/c_p – обратный возраст волн; f_p , Гц – частота спектрального пика волнения.

N o t e: V_{10} , m/s is the wind speed on the 10 m horizon; H_s , m is height of significant waves, V_{10}/c_p is the reverse age of waves; f_p , Hz is the spectral peak frequency of waves.



Р и с. 2. Примеры полученных в разных экспериментах значений скорости диссипации турбулентной энергии при наличии обрушений и теоретическая зависимость (3) для данных 091016
F i g. 2. Examples of the values (resulted from various experiments) of the turbulent energy dissipation rate at presence of wave breaking and theoretical dependence (3) for the data 091016



Р и с. 3. Характерный спектр поверхностных волн в штормовых условиях. Данные от 05.06.2017 г.
F i g. 3. Characteristic spectrum of surface waves at storm conditions. Data of 05.06.2017

Скорость ветра и параметры волнения регистрировались сотрудниками отдела дистанционных методов исследования МГИ с помощью собственных измерительных средств (метеоконкомплекс *Davis 6152EU* и струнный волнограф), полученные данные были нам любезно предоставлены.

В большинстве экспериментов при наличии обрушивающихся волн скорость диссипации определялась начиная с горизонта 0,5–1 м до глубины 10 м с шагом 0,5–1 м. Для сопоставления с рассчитанными по модели Филморской ГИДРОФИЗИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ том 34 № 4 2018

липа значениями потерь энергии обрушивающейся волны на единицу площади полученное в экспериментах распределение ε интегрировалось по глубине, затем вычиталась величина ε , обусловленная генерацией сдвигом скорости дрейфового течения и рассчитанная по формуле (3). Здесь мы предполагаем, что подавляющая часть энергии, теряемой волной, диссипирует на глубинах до 10 м. Генерацией турбулентности нелинейными эффектами волнового движения в данном случае пренебрегаем. Экстраполяция зависимости ε на слой от верхней точки измерений до поверхности осуществлялась в предположении ее соответствия в этом слое закону $\varepsilon \sim z^{-1}$ [13]. В качестве нулевой поверхности здесь бралась величина $z_b = 2\pi/k_b \approx 0,05$ м, где k_b – волновое число самых коротких обрушивающихся волн [25].

Т а б л и ц а 2
T a b l e 2

Источники ошибок при экспериментальной оценке скорости диссипации турбулентной энергии
Sources of the errors arising at experimental estimating the turbulent energy dissipation rate

Источники ошибок/ Sources of the errors	Величина относительной ошибки, %/ Value of a relative error, %	Методы устранения (уменьшения)/Methods of elimination (diminution)
Ошибка при расчете спектра вертикальных пульсаций скорости/ Error arising at calculating the spectrum of the velocity vertical pulsations	≤ 20	Уменьшение собственных вибраций прибора, увеличение числа степеней свободы при расчете спектра/ Decrease of a device intrinsic vibration, increase a number of degrees of freedom at calculating the spectrum
Ошибка при измерении скорости горизонтального течения/ Error arising at measuring the horizontal current velocity	≤ 10	Измерение независимыми методами (приборами)/ Measurements by independent methods (devices)
Диссипация турбулентной энергии выше и ниже области измерений / Turbulent energy dissipation above and below the measurement area	≤ 10	Увеличение глубины измерений, экстраполяция до поверхности и до дна/ Increase of measurements' depth, extrapolation up to the surface and up to the bottom
Ошибка экстраполяции скорости диссипации от верхнего горизонта измерений до поверхности моря/ Error in extrapolating the dissipation rate from the upper horizon of measurements up to the sea surface	≤ 5	Максимально возможное приближение измерений к поверхности/ Maximum possible approach of measurements to the surface

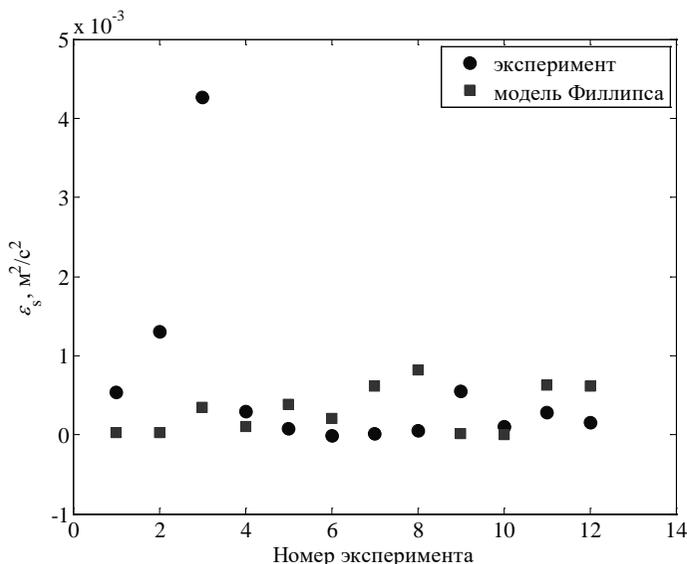
Пример распределения скорости диссипации по глубине для отдельных экспериментов показан на рис. 2, здесь же приведена рассчитанная зависимость ε от глубины в соответствии с моделью для пристеночного слоя по формуле (3). Типичный спектр волнения в штормовых условиях в районе стационарной океанографической платформы представлен на рис. 3.

Источники возможных ошибок при экспериментальном определении ε_s (диссипация на единицу поверхности после интегрирования по глубине) приведены в табл. 2.

Результаты и обсуждение

В первом способе расчета по модели Филлипса использовались приведенные выше формулы (6) – (10), при оценке параметра обрушений b в соответствии с моделью (7), предложенной в [11], брались константы $A_1 = 4,5$ и $B_T = 9,3 \cdot 10^{-4}$.

Расчеты скорости диссипации на единицу площади поверхности моря, проведенные по модели с учетом предложенных в [11] констант и способа расчета $b(k)$, показали, что для условий Черного моря эти константы и зависимость для $b(k)$, по-видимому, нуждаются в уточнении. В частности, при малых волновых числах значения b в (7) нередко становились отрицательными, в этих случаях расчет по модели (7) проводился для участка спектра, где $b > 0$. Возможно, это связано с различными условиями проведения экспериментов и другим характером волнения. Таким образом, предложенная модель (7) для b не является вполне универсальной. Также есть вероятность, что необходимо использовать несколько иную зависимость $\Lambda(c)$ вместо (9), (10), которая применялась в данном случае.



Р и с. 4. Скорость диссипации турбулентной энергии на единицу площади при обрушении волн. Номер точки на оси абсцисс соответствует номеру строки в табл. 1

F i g. 4. Turbulent energy dissipation rate per unit of area at wave breaking. The point number on the x-coordinate corresponds to the line number in Table 1

Оценки потерь энергии на единицу площади ε_s , определенные по экспериментальным данным и по модели, в целом оказались достаточно близкими, хотя отдельные экспериментальные величины могли отличаться от модельных и от большинства значений на 1–2 порядка (рис. 4), что, видимо, связано с конкретными физическими условиями, трудно поддающимися стандартной параметризацией.

При втором способе оценки параметра обрушений в модели Филлипса предполагалось постоянство b в формуле (6). Величина данного параметра определялась из условия соответствия модельных и экспериментальных значений скорости диссипации, результаты этих расчетов в зависимости от крутизны волн Ak_p показаны на рис. 5 (A – амплитуда волнения, k_p – волновое число спектрального пика). Как видно из рисунка, оценки b показывают умеренный разброс в пределах одного порядка, полученные величины можно аппроксимировать константой $b_c = 1,31 \cdot 10^{-4} \pm 4,84 \cdot 10^{-5}$.

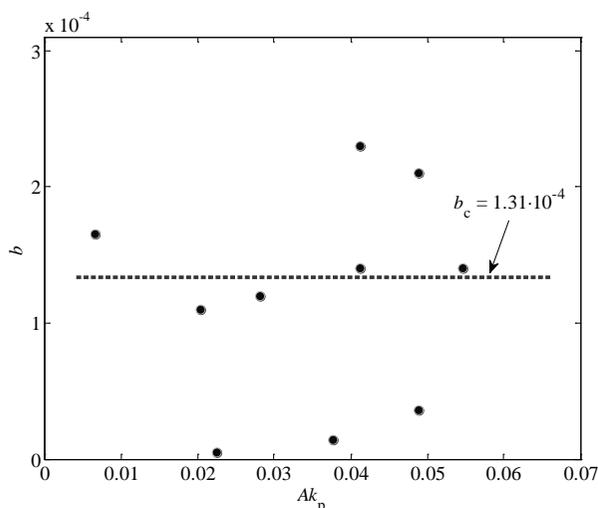


Рис. 5. Зависимость параметра обрушений от крутизны волны. Точки – найденные величины, b_c – аппроксимирующая константа

Fig. 5. Dependence of the breaking parameter on wave steepness. Points are the obtained values and b_c is the approximating constant

Следует отметить, что в большинстве случаев рассчитанные нами оценки b оказались меньше, чем в работах [11, 13]. Расхождения могут быть вызваны как отличающимся волнением, что влечет изменение функциональных зависимостей (7), (9), (10), так и систематическими погрешностями при определении скорости диссипации различными методами. Максимальная случайная ошибка в наших измерениях могла достигать 40–50%. Еще один не рассмотренный здесь фактор – трансформация энергии обрушившейся волны в скорость горизонтального течения – также может влиять на общую оценку ε_s . Помимо этого, в [13] учтена генерация турбулентности за счет микрообрушений, хотя и отмечается, что относительно большой вклад этого явления в общую диссипацию турбулентной энергии сосредоточен главным образом в тонком слое вблизи самой поверхности вследствие его малого масштаба.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод о возможности использования модели Филлипса для оценки притока энергии от обрушивающихся волн, но зависимость параметра обрушений b от волнового числа и от других характеристик волнения, а также вид функции $\Lambda(c)$ требуют дальнейшего исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Монин А. С., Озмидов Р. В. Океанская турбулентность. Л.: Гидрометеониздат, 1981. 320 с.
2. Rapp R. J., Melville W. K. Laboratory measurements of deep water breaking waves // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*. 1990. Vol. 331, iss. 1622. P. 735–800. <https://doi.org/10.1098/rsta.1990.0098>
3. Longuet-Higgins M. S. On wave breaking and the equilibrium spectrum of wind-generated waves // *Proceedings of the Royal Society of London A*. 1969. Vol. 310, iss. 1501. P. 151–159. doi:10.1098/rspa.1969.0069
4. Song J.-B., Banner M. L. On determining the onset and strength of breaking for deep water waves. Part I: Unforced Irrotational Wave Groups // *Journal of Physical Oceanography*. 2002. Vol. 32, no. 9. P. 2541–2558. <https://doi.org/10.1175/1520-0485-32.9.2541>
5. Nepf H. M., Wu C. H., Chan E. S. A comparison of two- and three-dimensional wave breaking // *Journal of Physical Oceanography*. 1998. Vol. 28, no. 7. P. 1496–1510. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1998\)028<1496:ACOTAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1998)028<1496:ACOTAT>2.0.CO;2)
6. Чухарев А. М. Влияние обрушивающихся поверхностных волн на турбулентный обмен. Нырляющие буруны // *Морской гидрофизический журнал*. 2000. № 1. С. 31–37.
7. Чухарев А. М., Котовициков Б. Б. Влияние обрушивающихся поверхностных волн на турбулентный обмен. Скользящие буруны // *Морской гидрофизический журнал*. 2000. № 3. С. 13–19.
8. Estimates of kinetic energy dissipation under breaking waves / E. A. Terray [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, no. 5. P. 792–807. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0792:EOKEDU>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0792:EOKEDU>2.0.CO;2)
9. Enhanced dissipation of kinetic energy beneath surface waves / Y. C. Agrawal [et al.] // *Nature*. 1992. Vol. 359. P. 219–220. <https://doi.org/10.1038/359219a0>
10. Oceanic turbulence dissipation measurements in SWADE / W. M. Drennan [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 1996. Vol. 26, no. 5. P. 808–815. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1996\)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1996)026<0808:OTDMIS>2.0.CO;2)
11. Romero L., Melville W. K., Kleiss J. M. Spectral energy dissipation due to surface wave breaking // *Journal of Physical Oceanography*. 2012. Vol. 42, no. 9. P. 1421–1444. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-11-072.1>
12. Sutherland P., Melville W. K. Field measurements and scaling of ocean surface wave-breaking statistics // *Geophysical Research Letters*. 2013. Vol. 40, iss. 12. P. 3074–3079. <https://doi.org/10.1002/grl.50584>
13. Sutherland P., Melville W. K. Field measurements of surface and near-surface turbulence in the presence of breaking waves // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, no. 4. P. 943–965. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-14-0133.1>
14. Gemmrich J. Strong turbulence in the wave crest region // *Journal of Physical Oceanography*. 2010. Vol. 40, no. 3. P. 583–595. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4179.1>
15. Phillips O. M. Spectral and statistical properties of the equilibrium range in wind-generated gravity waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 1985. Vol. 156. P. 505–531. <https://doi.org/10.1017/S0022112085002221>
16. Banner M. L., Peirson W. L. Wave breaking onset and strength for two-dimensional deep-water wave groups // *Journal of Fluid Mechanics*. 2007. Vol. 585. P. 93–115. <https://doi.org/10.1017/S0022112007006568>

17. *Drazen D. A., Melville W. K., Lenain L.* Inertial scaling of dissipation in unsteady breaking waves // *Journal of Fluid Mechanics*. 2008. Vol. 611. P. 307–332. <https://doi.org/10.1017/S0022112008002826>
18. Измерительный комплекс «Сигма-1» для исследования мелкомасштабных характеристик гидрофизических полей в верхнем слое моря / А. С. Самодуров [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 5. С. 60–71.
19. Измерительная система для исследования мелкомасштабной турбулентности в приповерхностном слое моря // Патент РФ 2549250 С1; № 2014151917/93; заявл. 18.12.2014; опубл. 20.04.2015. Бюл. № 11 / В. А. Барабаш, А. С. Самодуров, А. М. Чухарев. (RU). 8 с.
20. *Чухарев А. М.* Применение измерительного комплекса «Сигма-1» для исследования турбулентности на океанографической платформе // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексное использование ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2010. Вып. 21. С. 231–238.
21. Натурное исследование пространственной однородности метео- и волнографических параметров в прибрежной зоне. К проблеме калибровки РЛС БО «Сич-1М» как инструмента для получения скорости приводного ветра / В. А. Дулов [и др.] // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 3. С. 31–43.
22. *Stewart R. W., Grant H. L.* Determination of the rate of dissipation of turbulent energy near the sea surface in the presence of waves // *Journal of Geophysical Research*. 1962. Vol. 67, iss. 8. P. 3177–3180. <https://doi.org/10.1029/JZ067i008p03177>
23. *Soloviev A., Lucas R.* Observation of wave-enhanced turbulence in the near-surface layer of the ocean during TOGA COARE // *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2003. Vol. 50, iss. 3. P. 371–395. doi:10.1016/S0967-0637(03)00004-9
24. *Oakey N. S.* Determination of the rate of dissipation of turbulent energy from simultaneous temperature and velocity shear microstructure measurements // *Journal of Physical Oceanography*. 1982. Vol. 12, no. 3. P. 256–271. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1982\)012%3C0256:DOTROD%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1982)012%3C0256:DOTROD%3E2.0.CO;2)
25. On the vertical structure of wind-driven sea currents / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2008. Vol. 38, no. 10. P. 2121–2144. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>

Об авторах:

Чухарев Александр Михайлович, ведущий научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), доктор физико-математических наук, **ORCID: 0000-0003-1078-6425**, alexchukh@mail.ru

Зубов Анатолий Георгиевич, младший научный сотрудник, отдел турбулентности, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), sl4612@mail.ru

Павленко Ольга Ивановна, ведущий инженер-программист, отдел турбулентности, ФГБУН МГИ (299011, Россия, г. Севастополь, ул. Капитанская, д. 2), **SPIN-код: 9665-9290**, olpav@list.ru