

Приложение

Модели турбулентности, использовавшиеся для сопоставления с предложенной нестационарной моделью

1. В модели, предложенной в работе [4], предполагается, что турбулентность под поверхностью океана аналогична турбулентности у твердой стенки. Скорость диссипации турбулентной энергии в этом случае рассчитывается в соответствии с формулой

$$\varepsilon = u_*^3 / \kappa z,$$

где $u_* = \sqrt{\tau / \rho}$ – динамическая скорость в воде; κ – постоянная Кармана; z – глубина. Однако для применения такой аналогии, как отмечается в [4], необходимо правильно выбрать нулевую поверхность – фильтровать мелкие нерегулярные волны, а также правильно усреднять измеренные величины, чтобы получить структуру среднего течения, аналогичную турбулентному пограничному слою у плоской пластины. Часто эту модель называют логарифмической (по закону изменения скорости в турбулентном потоке вблизи твердой границы).

2. Одна из самых известных моделей турбулентности в приповерхностном слое разработана в работе [5], в которой для замыкания системы уравнений применяется гипотеза Прандтля о пути смещения. Эта модель показывает хорошее соответствие как натурным, так и лабораторным экспериментам [18, 19], причем результаты существенно зависели от величины параметра шероховатости z_0 и выбора масштаба турбулентности l . Слой у самой поверхности с повышенной скоростью диссипации трактовался как следствие потока турбулентной энергии от волн через поверхность.

В этой модели скорость диссипации и кинетическая энергия турбулентности определяются следующим образом:

$$\varepsilon = q^3 / Bl, \quad k = \frac{q^2}{2},$$

где q – масштаб скорости; l – масштаб длины; $B = 16,6$ – константа; $l = \kappa(z + z_0)$, z – глубина, z_0 – параметр шероховатости в воде, κ – постоянная Кармана. В модели получены как асимптотические аналитические решения, так и численные. Аналитически скорость диссипации выражается следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_{sh} + \varepsilon_{vv} = \frac{u_*^3}{B\kappa(z + z_0)} \left[\left(\frac{B}{S_M} \right)^{\frac{3}{4}} + \alpha \left(\frac{3B}{S_q} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{z_0}{z_0 + z} \right)^n \right], \quad n = \left(\frac{3}{k^2 B S_q} \right)^{\frac{1}{2}} = 2,4,$$
$$S_M = 0,39, \quad S_q = 0,2.$$

К настоящему времени эта модель является наиболее распространенной для описания турбулентности вблизи поверхности моря и часто используется для сопоставления с натурными и лабораторными экспериментами.

3. В модели Кудрявцева и соавторов [6] в качестве источников турбулентной энергии в самом верхнем слое моря принимаются сдвиг скорости и обрушение волн, в том числе и микрообрушения. Обрушение рассматривается как объемный источник энергии и импульса, зависящий от спектрального состава

поверхностных волн. В уравнении баланса турбулентной энергии диффузией предлагается пренебречь. В отличие от модели из работы [5] параметр шероховатости z_0 в поверхностном слое в эту модель не входит. Численные расчеты по ней показали вполне удовлетворительное согласие с экспериментальными результатами из работы [20].

4. Многомасштабная модель турбулентности, разработанная автором [7], основана на разделении спектра турбулентности на участки, в которых генерация турбулентности происходит разными механизмами. Для каждого из участков составляется соответствующая система уравнений, основанная на k - ε модели. В качестве источников турбулентности рассматриваются сдвиг скорости дрейфового течения, нелинейные эффекты поверхностных волн и их обрушения. Для последних двух механизмов генерации предложены оригинальные параметризации. Предполагается также существование турбулентной диффузии волновой кинетической энергии. Модель показывает хорошее соответствие в широком диапазоне гидрометеорологических условий как собственным натурным данным, так и полученным другими авторами. Преимущество данной модели, по сравнению с другими аналогичными моделями, особенно наглядно проявляется в штормовых условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A global perspective on Langmuir turbulence in the ocean surface boundary layer / S. E. Belcher [et al.] // *Geophysical Research Letters*. 2012. Vol. 39, iss. 18. L18605. <https://doi.org/10.1029/2012GL052932>
2. Sullivan P. P., McWilliams J. C. Dynamics of winds and currents coupled to surface waves // *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2010. Vol. 42. P. 19–42. <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145541>
3. Csanady G. T. The free surface turbulent shear layer // *Journal of Physical Oceanography*. 1984. Vol. 14, iss. 2. P. 402–411. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1984\)014<0402:TFSTSL>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1984)014<0402:TFSTSL>2.0.CO;2)
4. Benilov A. Yu., Ly L. N. Modelling of surface waves breaking effects in the ocean upper layer // *Mathematical and Computer Modelling*. 2002. Vol. 35, iss. 1–2. P. 191–213. [https://doi.org/10.1016/S0895-7177\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S0895-7177(01)00159-5)
5. Craig P. D., Banner M. L. Modeling of wave-enhanced turbulence in the ocean surface layer // *Journal of Physical Oceanography*. 1994. Vol. 24, iss. 12. P. 2546–2559. [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(1994\)024<2546:MWETIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(1994)024<2546:MWETIT>2.0.CO;2)
6. On the vertical structure of wind-driven sea currents / V. Kudryavtsev [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2008. Vol. 38, iss. 10. P. 2121–2144. <https://doi.org/10.1175/2008JPO3883.1>
7. Chukharev A. M. Multitime scale model of turbulence in the sea surface layer // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2013. Vol. 49, iss. 4. P. 439–449. <https://doi.org/10.1134/S0001433813040026>
8. Langmuir turbulence and surface heating in the ocean surface boundary layer / B. Pearson [et al.] // *Journal of Physical Oceanography*. 2015. Vol. 45, iss. 12. P. 2897–2911. <https://doi.org/10.1175/JPO-D-15-0018.1>
9. Biases in structure functions from observations of submesoscale flows / J. Pearson [et al.] // *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 2020. Vol. 125, iss. 6. e2019JC015769. <https://doi.org/10.1029/2019JC015769>
10. 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. <https://doi.org/10.1007/s11110-006-0005-1>
11. Астафьева Н. М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // *Успехи физических наук*. 1996. Т. 166, № 11. С. 1145–1170. <https://doi.org/10.3367/UFNR.0166.199611a.1145>