© Полников В.Г., 2019, Океанологические исследования, 2019, Том 47, № 1, С. 97–99

УДК 551.466.3 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2019.47(1).29

МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ, ВЫЗВАННОГО ВЕТРОВЫМИ ВОЛНАМИ

Полников В.Г.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва,
Пыжевский пер., 3 119017, Россия
e-mail: polnikov@mail.ru
Статья поступила в редакцию 25.12.2018, одобрена к печати 30.01.2019

Задача работы заключается в получении формул для коэффициента вертикального перемешивания, вызванного ветровыми волнами. Для этого в уравнениях Навье-Стокса скорость течения разлагается на четыре составляющих: средний поток $\overline{U}_i$, волновое орбитальное движение $\tilde{u}_i$, турбулентные флуктуации течения $\tilde{u}_i'$, индуцированные волнами, и фоновые турбулентные флуктуации u_i' (i=1,2,3). При условии статистической независимости средних, орбитальных и турбулентных движений, указанное разложение позволяет разделить волновое напряжение $R_w = <\tilde{u}_j\tilde{u}_i> + <\tilde{u}_j'\tilde{u}_i'> + <\tilde{u}_j'u_i'> + <u_j'\tilde{u}_i'>$ и фоновое напряжение $R_b = <u_j'u_i'>$, в уравнениях Рейнольдса. С использованием потенциального приближения для орбитальных движений выражение для волнового напряжения упрощается до вида: $R_w = <\tilde{u}_j'u_i'> + <u_j'\tilde{u}_i'> \simeq 2<\tilde{u}_j'u_i'>$. Затем для замыкания R_w используется приближение Прандтля для фоновых турбулентных флуктуаций, приводящее к неявному выражению для индуцированной волнами функции вертикального перемешивания (турбулентной вязкости) вида $B_{v(1,3)} \approx 2<\tilde{u}_1'\lambda_3'>$ (λ_3' – длина перемешивания, присущая фоновой турбулентности).

Конечное выражение для B_v определяется с привлечением результатов автора (Polnikov, 2018) для турбулентной вязкости в зоне волнения, найденного ранее в рамках концепции трехслойной структуры интерфейса воздух–вода: приводный слой воздуха, зона волнения, верхний слой воды. Полагается, что турбулентная вязкость B_v в слое жидкости под волнами физически идентична таковой в слое волнения, K_{tw}, которая имеет вид: $K_{tw} = c_{tw}u_* a_{|z=0}$, где c_{tw} – безразмерный коэффициент порядка 10^{-2}, а u_* – есть скорость трения в воздухе (Polnikov, 2018).

Таким образом, явное выражение для функции перемешивания $B_v(a, u_*, z)$ является линейным по амплитуде волны $a(z)$ на глубине z и скорости трения u_* в воздухе: $B_v(z) \approx K_{tw}(z) \approx c_{tw} \cdot u_* a_0 \, exp(kz)$. Поскольку амплитуда волны экспоненциально убывает с глубиной, $a(z) \sim \exp(kz)$, найденный результат для $B_v(a)$ означает возможность усиления воздействия волн на вертикальное перемешивание по сравнению кубической зависимостью $B_v(a)$, полученной ранее в работе (Qiao et al., 2004).

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 18-05-00161.

Ключевые слова: турбулентность, напряжения Рейнольдса, вертикальное перемешивание, ветровые волны, интерфейс воздух–вода.

Литература

Polnikov V.G. Semi-phenomenological model for a wind-drift current. Manuscript. 2018. https://arxiv.org/abs/1804.07963

Qiao F., Yuan Y., Yang Y., Zheng Q., Xia C., and Ma J. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model // Geophys. Res. Lett. 2004. Vol. 31. L11303. DOI:10.1029/2004GL019824.

A MODEL OF THE VERTICAL MIXING INDUCED BY WIND WAVES

PolnikovV.G.

Obukhov Institute of Atmospheric Physics RAS, Moscow, 119017, Russia
e-mail: polnikov@mail.ru
Submitted 25.12.2018, accepted 30.01.2019

The task of the work is to obtain formulas for the vertical mixing coefficient induced by wind waves. For this aim, in the Navier-Stokes equations, the flow-velocity is decomposed into four components: mean flow $\bar{U}_i$, wave orbital motion $\tilde{u}_i$, turbulent flow-fluctuations induced by waves $\tilde{u}_i'$, and background turbulent fluctuations u_i' (i = 1,2,3). Provided that the average, orbital, and turbulent motions are statistically independent, this decomposition makes it possible to separate the wave stress $R_w = <\tilde{u}_j\tilde{u}_i> + <\tilde{u}_j'\tilde{u}_i'> + <\tilde{u}_j'u_i'> + <u_j'\tilde{u}_i'>$ and the background stress $R_b = <u_j'u_i'>$, in the Reynolds equations. Using the potential approximation for the orbital motions, the wave-stress expression is simplified to the form $R_w = <\tilde{u}_j'u_i'> + <u_j'\tilde{u}_i'> \simeq 2<\tilde{u}_j'u_i'>$. Then, to closure R_w, the Prandtl approximation for the background turbulent fluctuations is used, leading to an implicit expression for the wave-induced vertical mixing function (turbulent viscosity) of the form $B_{v(1,3)} \approx 2<\tilde{u}_1'\lambda_3'>$ (where λ_3' is the mixing length inherent to the background turbulence).

The final expression for B_v is determined by invoking the author's results (Polnikov, 2018) for the turbulent viscosity in the wave zone, previously found within the concept of the three-layer structure of the air-sea interface: boundary air layer, wave zone, upper water layer. It is believed that the turbulent viscosity B_v in the water layer under waves is physically identical to that in the wave zone, K_{tw}, which has the form $K_{tw} = c_{tw}u_*a|_{z=0}$, where c_{tw} is a dimensionless coefficient of the order of 10^{-2}, and u_* is the friction velocity in the air (Polnikov, 2018).

Thus, the explicit expression for mixing function $B_v(a, u_*, z)$ is linear in the wave amplitude at depth z, $a(z)$, and the friction velocity in the air, u_*. Since the wave amplitude does exponentially decrease with depth z: $a(z) \sim \exp(kz)$, the result found for dependence $B_v(a)$ means that the effect of waves on the vertical mixing in the upper water layer can be enhanced compared to the cubic dependence $B_v(a)$, obtained earlier in (Qiao et al., 2004).

This work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project No. 18-05-00161.

Keywords: turbulence, Reynolds stresses, vertical mixing, wind waves, air-water interface.

References

Polnikov V.G. Semi-phenomenological model for a wind-drift current, Manuscript, 2018, https://arxiv.org/abs/1804.07963.

Qiao F., Yuan Y., Yang Y., Zheng Q., Xia C., and Ma J. Wave-induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, Vol. 31, L11303, doi:10.1029/2004GL019824.