ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛУЧШЕННОГО СПОСОБА ЗАМЫКАНИЯ УРАВНЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

Н.Н. Безуглова, Ю.А. Суковатов, К.Ю. Суковатов

Работа посвящена численным расчетам структуры горизонтально-неоднородного пограничного слоя атмосферы. Для замыкания системы уравнений, описывающих атмосферную турбулентность, предлагается использовать модель Лама и Брэмхорста. Проведенные численные расчеты по предлагаемой модели пограничного слоя атмосферы показали хорошее соответствие с имеющимися в литературе расчетами и экспериментальными данными.

Большое число научных и прикладных задач требует расчета вертикальных профилей метеорологических элементов и параметров пограничного слоя атмосферы (ПСА), определяющих метеорологические процессы, происходящие в нем, а также процессы переноса примесей и аэрозоля. Особую сложность представляет собой решение задач горизонтально-неоднородного ПСА. Существующие модели пограничного слоя предполагают выделение приземного подслоя. В этом случае упрощается численное решение системы уравнений ПСА, так как численно уравнения решаются только для той части слоя, где скорость меняется медленно. Для нижней части атмосферы, где наблюдается резкое изменение скорости ветра, предлагается аналитическое решение, основанное на использовании теории подобия Монина-Обухова и эмпирических функций Бюзингера, однако при этом невозможно полностью учесть влияние изменяющихся свойств подстилающей поверхности на структуру ПСА.

Известно несколько моделей учета влияния поверхности на гидродинамическое течение, которые не используют пристенные функции. Наиболее совпадают с экспериментальными данными модели Лаундера и Шарма, Лама и Брэмхорста, Чена [1]. В настоящей работе для моделирования пограничного слоя атмосферы используется метод замыкания системы уравнений турбулентности Лама и Брэмхорста.

Модель Лама и Брэмхорста [2] представляет собой улучшенную $k-\varepsilon$ модель, описывающую гидродинамическую турбулентность. Уравнения обычной $k-\varepsilon$ модели турбулентности работают только на некотором удалении от подстилающей поверхности. На расстояниях вблизи поверхности используются эмпирические пристенные функции. Эти функции, по-видимому, неприменимы для трехмерного течения, неоднородной подстилающей поверхности, нестационарных потоков и поверхностей, где происходит тепло- и влагообмен. В случае расхождения измерений и результатов расчетов трудно решить имеет ли оно место из-за несовершенства применяемого метода или из-за неприменимости в данном случае стандартных пристенных функций.

Модель Лама и Брэмхорста не использует пристенные функции и позволяет производить численный расчет вплоть до подстилающей поверхности. Наш особый интерес к этой модели вызван тем, что в их формулировке уравнения для энергии турбулентности и диссипации турбулентной энергии не содержат добавочных членов, в отличие от всех других подобных моделей, а также эта модель сравнительно легко допускает обобщение для трехмерного случая. В настоящей работе произведены расчеты вертикальных профилей характеристик, в том числе перенос примеси, горизонтально неоднородного пограничного слоя атмосферы на основе модели Лама и Брэмхорста.

Модель Лама и Брэмхорста предназначена для расчетов вблизи стенки. Можно использовать эту модель для расчетов структуры горизонтально-неоднородного пограничного слоя атмосферы, если учесть силу Кориолиса и силы плавучести [3,4]. Кроме того, необходимо добавить уравнения для переноса тепла, влаги и пассивной примеси. Полученная модель применима на любых расстояниях от подстилающей поверхности. Описанная выше модель горизонтально-неоднородного ПСА имеет вид:

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_u}\right)\frac{\partial u}{\partial z}\right]-w\frac{\partial u}{\partial z}-u\frac{\partial u}{\partial x}+mv=0\,, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_v}\right)\frac{\partial v}{\partial z}\right]-w\frac{\partial v}{\partial z}-u\frac{\partial v}{\partial x}-m(u-1)=0\,, \quad (2)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\,, \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_b}\right)\frac{\partial b}{\partial z}\right]-w\frac{\partial b}{\partial z}-u\frac{\partial b}{\partial x}+ k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2-\beta\frac{\partial\theta}{\partial z}-\beta_1\frac{\partial q}{\partial z}\right]-\varepsilon=0\,, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right]-w\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}-u\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+c_{\varepsilon 1}f_1\frac{\varepsilon}{b} k\left[\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2-\beta\frac{\partial\theta}{\partial z}-\beta_1\frac{\partial q}{\partial z}\right]- -c_{\varepsilon 2}f_2\frac{\varepsilon^2}{b}=0\,, \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial \theta}{\partial z}\right]-w\frac{\partial \theta}{\partial z}-u\frac{\partial \theta}{\partial x}=0\,, \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial q}{\partial z}\right]-w\frac{\partial q}{\partial z}-u\frac{\partial q}{\partial x}=0\,, \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial z}\left[\left(\nu+\frac{k}{\delta}\right)\frac{\partial e}{\partial z}\right]-w\frac{\partial e}{\partial z}-u\frac{\partial e}{\partial x}=0\,, \quad (8)$$

$$k=c_\mu f_\mu b_2/\varepsilon\,, \quad (9)$$

$$R_T=b^2/\nu\varepsilon\,, \quad (10)$$

$$R_z=(\sqrt{b}\,)z/\nu\,, \quad (11)$$

$$f_\mu=\left[1-\exp(-0{,}0165R_z)\right]^2\left(1+\frac{20{,}5}{R_T}\right), \quad (12)$$

$$f_1=1+\left(\frac{0{,}05}{f_\mu}\right)^3, \quad (13)$$

$$f_2=1-\exp\left(-R_T^2\right), \quad (14)$$

где c_μ, $c_{\varepsilon 1,}$ $c_{\varepsilon 2,}$ δ, δ_ε - эмпирические константы, ν -молекулярная кинематическая вязкость, b –кинетическая энергия турбулентности, ε - скорость диссипации турбулентной энергии в тепло, k - коэффициент турбулентного обмена , u, v, w - компоненты скорости, θ - потенциальная температура, q - влажность, e - концентрация примеси, x, z - горизонтальная и вертикальная координаты, G - скорость геострофического ветра. Модель сформулирована в безразмерных переменных, определенных по следующим формулам:

$$z_n=z/h,\quad x_n=x/h,\quad u_n=u/G,\quad v_n=v/G,$$
$$w_n=w/G,\quad q_n=q/q_h,\quad b_n=b/G^2,$$
$$\theta_n=(\theta-\theta_0)/(\theta_h-\theta_0),\quad \varepsilon_n=\varepsilon h/G^3,$$
$$k_n=k/Gh.$$

где h - высота погранслоя, q_h - влажность на верхней границе погранслоя, θ_0 и θ_h - потенциальные температуры внизу и вверху. Для упрощения записи индекс n у безразмерных переменных в уравнениях (1-9) опущен. Согласно [3,4] безразмерные коэффициенты в уравнениях (1-9) составляют: $m=fh/G$, где $f=2\omega_p\sin\varphi$ - параметр Кориолиса, $\beta=gh(\theta_h-\theta_0)/T_aG^2$, $\beta_1=0{,}61gq_hh/G^2$. По координате y среда предполагается однородной.

Граничные условия:

$$z=z_1\quad u=v=w=0,\quad b=0,\quad \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}=0$$

$$z=1\quad u=1,\quad \frac{\partial b}{\partial z}=0,\quad \frac{\partial\varepsilon}{\partial z}=0\,.$$

Нами были проведены численные расчеты по упрощенной модели (1-9) с целью сравнения полученных результатов с данными по распределению кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации энергии турбулентности в пограничном слое атмосферы, приведенными в [3]. Для дискретизации уравнений (1,9) по вертикальной координате использовалась чисто неявная разностная схема с «направленными разностями» [5].

На рисунках 1-3 представлены результаты численных расчетов вертикального распределения примеси, кинетической энергии турбулентности, скорости диссипации энергии турбулентности в тепло.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛУЧШЕННОГО СПОСОБА ЗАМЫКАНИЯ УРАВНЕНИЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ

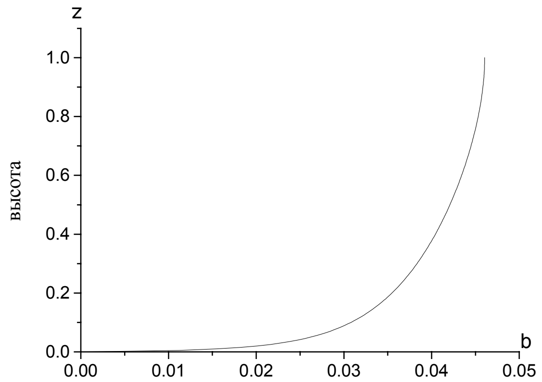

Рис. 1. Вертикальный профиль энергии турбулентности

На рис. 1. представлено вертикальное распределение энергии турбулентности b в ПСА. При расчетах использовались нормированные величины. Энергия турбулентности b нормирована на G^2, вертикальная координата на высоту пограничного слоя h. Наблюдается хорошее соответствие рассчитанного профиля с экспериментальными данными по распределению энергии турбулентности, приведенными в [3].

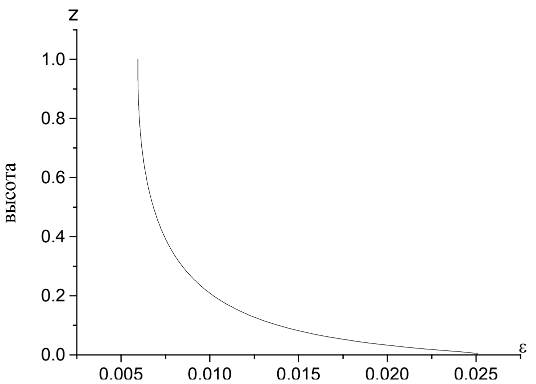

Рис 2. Вертикальный профиль скорости диссипации энергии турбулентности в тепло

На рис.2 приведено рассчитанное распределение по высоте скорости диссипации энергии турбулентности ε. Скорость диссипации энергии турбулентности нормирована на G^3 / h. Рассчитанный профиль скорости диссипации энергии турбулентности также хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в [3].

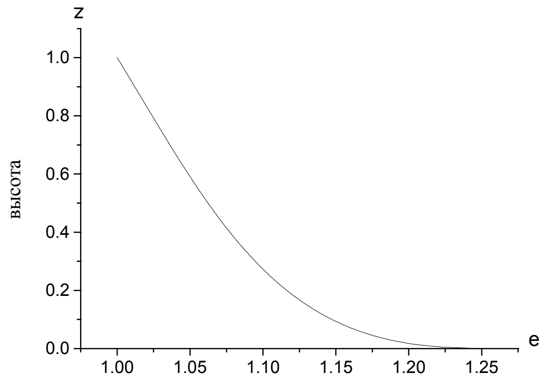

Рис. 3. Вертикальный профиль распределения примеси

На рис.3 приведены расчеты распределения пассивной примеси по высоте погранслоя. Это соответствие показывает, что можно применять полную описанную выше модель турбулентности (1-9) для расчетов параметров горизонтально-неоднородного ПСА, что и предполагается сделать в дальнейшем. Возможны два варианта расчетов структуры горизонтально-неоднородного ПСА. Можно учитывать горизонтальную неоднородность по методу Вагера-Надежиной, см. [3,5]. Второй подход к решению уравнений (1-9) заключается в том, что в этих уравнениях восстанавливаются производные по времени и решается нестационарная задача динамики горизонтально-неоднородного ПСА известным методом прямых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. C. Patel, W. Rodi, G. Scheuerer. Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows: A Review. AIAA J., 1985, T.23, N9, p. 1308-1319.

2. C.K.G. Lam, K. Bremhorst. A Modified Form of the $k-\varepsilon$ Model for Predicting Wall Turbulence, Journal of Fluids Engineering, September, 1981, vol. 103, p.456-460.

3. Вагер Б.Г., Надежина Е.Д. Пограничный слой атмосферы в условиях горизонтальной неоднородности. Л., Гидрометеоиздат, 1979, 134с.

4.Братсерт У.Х. Испарение в атмосферу. Л. Гидрометеоиздат, 1985. - 278с.

5. Н.Н. Безуглова. Влияние горизонтально-неоднородной подсти лающей поверхности на структуру пограничного слоя атмосферы. / Дисс. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Барнаул, 2002.