УДК 528.525.73.522.92

Д. И. МАСЛИЧ, Л. С. ХИЖАК,
И. И. ДИДУХ, Н. Д. ЙОСИПЧУК

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОГО ПОТОКА НА ПУТИ ВИЗИРНОГО ЛУЧА ПО МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИМ И ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ ИЗМЕРЕНИЯМ

Как было показано в работе *, уравнение световой кривой включает коэффициент турбулентности и может быть представлено в виде ряда

* *Маслич Д. И., Хижак Л. С., Дидух И. И., Йосипчук Н. Д.* Определение коэффициента турбулентности по результатам измерения метеоэлементов и зенитных расстояний. — В кн.: Тез. докл. Второго совещания по атмосферной оптике. Томск, 1980.

$$z(x) = z(0) + \frac{z'(0)}{1!}x + \cdots + \frac{z^{(x)}(0)}{n!} + \cdots, \tag{1}$$

коэффициенты которого зависят от коэффициента турбулентности $a(z)$. Если предположить, что коэффициент турбулентности может быть представлен в виде

$$a(z) = a_1 z + a_2; \quad a_1,\ a_2 - \text{const}, \tag{2}$$

то, удерживая только три члена ряда (1), для отношения a_1/a_2 получено следующее выражение:

$$a_1/a_2 = \frac{1}{B}\left[3\,\frac{2z(x) - 2z'(0)\,x - z''(0)\,x^2}{z'(0)\,z''(0)\,x^3} - \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)\right], \tag{3}$$

где

$$A_{k0} = \frac{g\mu - kRT_0'}{RT_0},\ (k = 1, 2, \cdots,), \quad B = \frac{RT_0'}{g\mu - RT_0'}. \tag{4}$$

Здесь g — ускорение силы тяжести, μ — масса поля, R — газовая постоянная, T_0 — температура среды, T_0' — градиент температуры, n — показатель преломления, равный

$$n = 1 + c\rho, \tag{5}$$

где c — постоянная, зависящая от длины волны, ρ — плотность среды; n_0' — производная от n и z, вычисленная в точке $z = 0$.

Учитывая в (1) четыре члена, для определения a_1/a_2 получаем квадратное уравнение

$$c_2\beta^2 + c_1\beta + c_0 = 0, \tag{6}$$

где

$$c_2 = -\frac{2Bz^{1^2}\,z^{1^2}(0)\,z''(0)\,x^4}{24};$$

$$c_1 = \frac{Bz''(0)\,x^3}{6}\left\{z'(0) + \left[z''(0) + 2\left(A_{10} + A_{20} + 3\frac{n_0'}{n_0}\right)z'^2(0)\right]\frac{x}{4}\right\};$$

$$c_0 = xz'(0) + \frac{z''(0)\,x^2}{2} + \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z'(0)\,z''(0)\,x^3}{6} +$$

$$+ \left\{A_{20}\left(A_{30} + 3\frac{n_0'}{n}\right)z'^2(0) + \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)z''(0)\right\}\frac{z''(0)\,x^4}{24} - z(x);$$

$$\beta = a_1/a_2.$$

И, наконец, ограничиваясь пятью членами ряда (1), для отношения a_1/a_2 получаем уравнение вида

$$b_2\beta^3 + b_2\beta^2 + b_1\beta + b_0 = 0, \tag{7}$$

где

$$b_3 = \frac{Bz'^3(0)\,z''(0)\,x^5}{120};$$

$$b_2 = \frac{Bz'(0)\,z''(0)\,x^4}{24}\left[\frac{(B-6)\,z''(0)\,x}{5} + \frac{n_0'}{n_0}(3B-2) - \right.$$

$$\left. - 2\,(4A_{20} + A_{30})\frac{z'(0)\,x}{5} - 2z'(0)\right];$$

$$b_1 = B\left[1 + \left(2\,(A_{10} + A_{20}) + 3\frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z'(0)\,x}{4} + \right.$$

$$+ \left(2\,(A_{10}A_{20} + 3A_{20}^2) + \frac{n_0'}{n_0}(8A_{10} + 14A_{20})\right)\frac{z'^2(0)\,x^2}{20} +$$

$$\left. + \left(6A_{10} + 8A_{20} + 11\frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z''(0)\,x^2}{20}\right] \times$$

$$\times \frac{z'(0)\,z''(0)\,x^3}{6} + B\frac{z''(0)\,x^4}{24};$$

$$b_0 = -z(x) + z'(0)\,x + \frac{z''(0)\,x^2}{2} + \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)\times$$

$$\times \frac{z'(0)\,z''(0)\,x^3}{6} + \left(A_{20}A_{30} + 3A_{20}\frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z'^2(0)\,z''(0)\,x^4}{24} +$$

$$+ \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z''^2(0)\,x^4}{24} + \left(A_{20}A_{30}A_{40} + \frac{n_0'}{n_0}(4A_{20}A_{30} + 3A_{20}^2)\right)\times$$

$$\times \frac{z'^3(0)\,z''(0)\,x^5}{120} + (3A_{20}A_{30} + A_{20}^2) + 11\frac{n_0'}{n_0}\times$$

$$\times \left(A_{20} + \frac{n_0'}{n_0}\right)\frac{z'(0)\,z''(0)\,x^5}{120}.$$

Аналогично, ограничиваясь k членами ряда, для этого отношения получаем уравнение k второй степени.

Ввиду того, что значение коэффициента турбулентности определяется в точках световой кривой, величина его будет зависеть от точности приближения световой кривой к ряду (1), т. е. будет меняться с изменением количества членов этого ряда.

Теоретические выкладки были проверены на результатах специально поставленных экспериментальных исследований, выполненных в 1980 г. над асфальтом. Во время этих исследований производились измерения температуры на четырех высотах, давления и влажности на одной высоте (0,3 м над подстилающей поверхностью) и зенитных расстояний на две визирные цели. Начало координат совпадало с фокусом трубы теодолита, ось oz была направлена по отвесной линии в точке измерения зенитного расстояния, а ось ox — перпендикулярна к ней. В этой системе координаты визирных целей были следующими: для верхней визирной цели $x = 544{,}605$ и

$z=7{,}410$ м, а для нижней — $x=544{,}605$, и $z=6{,}903$ м. Результаты вычисления отношения для двух указанных выше визирных целей приведены в таблице.

Результаты вычисления отношений для визирных целей

№ п/п	T	T'	z	ξ	p	a_1/a_2
1	292,82	−0,46	7,410	89°14′50,0″	$0{,}99190\cdot10^5$	0,420
2	293,46	−0,38	»	89 14 41,2	$0{,}99000\cdot10^5$	0,412
3	294,52	−0,29	»	89 14 42,0	$0{,}99010\cdot10^5$	0,400
4	294,84	−0,46	»	89 14 50,3	$0{,}99100\cdot10^5$	0,420
5	286,58	−0,61	»	89 14 26,2	$0{,}99050\cdot10^5$	0,426
6	288,02	−0,16	7,410	89 14 32,4	$0{,}98420\cdot10^5$	0,366
7	288,40	−0,11	»	89 14 32,4	$0{,}98420\cdot10^5$	0,337
8	288,52	−0,22	»	89 14 36,5	$0{,}98420\cdot10^5$	0,386
9	289,06	−0,11	»	89 14 22,0	$0{,}98420\cdot10^5$	0,336
10	289,56	−0,11	»	89 14 21,4	$0{,}98420\cdot10^5$	0,334
11	289,89	−0,18	»	89 14 36,5	$0{,}98420\cdot10^5$	0,374
12	290,13	−0,18	»	89 14 26,2	$0{,}98420\cdot10^5$	0,372
13	290,76	−0,29	»	89 14 46,9	$0{,}98480\cdot10^5$	0,401
14	291,34	−0,19	»	89 14 50,2	$0{,}98410\cdot10^5$	0,379
15	292,82	−0,46	6,903	89 17 36,0	$0{,}99190\cdot10^5$	0,450
16	293,46	−0,38	»	89 18 14,2	$0{,}99000\cdot10^5$	0,444
17	294,52	−0,29	»	89 18 06,6	$0{,}99010\cdot10^5$	0,436
18	294,84	−0,46	»	89 18 18,1	$0{,}99100\cdot10^5$	0,458
19	286,58	−0,61	»	89 17 44,6	$0{,}99050\cdot10^5$	0,467
20	288,02	−0,16	»	89 17 53,3	$0{,}98420\cdot10^5$	0,399
21	288,40	−0,11	»	89 17 46,5	$0{,}98420\cdot10^5$	0,369
22	288,52	−0,22	»	89 18 00,5	$0{,}98420\cdot10^5$	0,416
23	289,06	−0,11	»	89 17 43,2	$0{,}98420\cdot10^5$	0,366
24	289,56	−0,11	»	89 17 47,8	$0{,}98420\cdot10^5$	0,365
25	289,89	−0,18	»	89 18 06,8	$0{,}98420\cdot10^5$	0,406
26	290,13	−0,18	»	89 17 47,4	$0{,}98420\cdot10^5$	0,403
27	290,76	−0,29	»	89 18 11,1	$0{,}98480\cdot10^5$	0,432
28	291,34	−0,19	»	89 18 22,6	$0{,}98410\cdot10^5$	0,411

Во втором столбце этой таблицы приведены значения абсолютной температуры T, в третьем — градиента температуры (T'), в четвертом — значение координаты z верхней и нижней визирных целей, в пятом — измеренные значения зенитных расстояний (ξ), в шестом — давление (P) и в седьмом — отношения a_1/a_2. Значение отношения a_1/a_2 было получено из решения уравнения первой степени относительно a_1/a_2, т. е. уравнения (3), что соответствует представлению световой кривой тремя членами ряда Тейлора.

Уравнения высших порядков относительно a_1/a_2 — не решались, так как члены ряда Тейлора, которыми представлялись уравнения световой кривой выше третьего порядка, практически для данных результатов эксперимента равны нулю.

Анализируя результаты, приведенные в таблице, не трудно заметить, что, во-первых, с увеличением высоты визирной цели отношение a_1/a_2 уменьшается. Во-вторых, это отношение очень сильно зависит от градиента температуры: чем меньше градиент, тем больше отношение. Если принять, что коэффициент турбулентности в точке измерения зенитных расстояний, т. е. при $z=0$, равен 0,3, то $a_2=0{,}3$ м^2/сек в случае предположения о линейности изменения коэффициента турбулентности с высотой. Тогда, приняв, что среднее значение отношения $a_1/a_2=0{,}4$, получим $a_1=0{,}12$ м/сек^2. Таким образом, в данном случае мы имеем скорость передачи тепловой энергии турбулентным потоком. В настоящее время производятся дальнейшие исследования закономерностей изменения этого отношения при различных условиях.

Статья поступила в редколлегию 19. 05. 81