

УДК 614.84

Андронников В.В., старший преподаватель  
Костылева Л.Н., преподаватель

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»  
г. Москва

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ДАЛЬНОСТИ ВИДИМОСТИ В УСЛОВИЯХ ЗАДЫМЛЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫМИ ВЫБРОСАМИ И ПРОДУКТАМИ ГОРЕНИЯ

В настоящее время проблема задымления территорий с интенсивной техногенной нагрузкой, а также возникновение пожаров на пожароопасных и пожаровзрывоопасных объектах существенно влияет на безопасность жизнедеятельности.

Опасными факторами этих явлений, воздействующими на людей и материальные ценности являются: пламя и искры; повышенная температура окружающей среды; пониженная концентрация кислорода; токсичные продукты горения и термического разложения; снижение видимости в дыму; тепловой поток.

Ограниченнная видимость существенно влияет на безопасность воздушного и дорожного движения. Поэтому одной из важных задач обеспечения безопасности жизнедеятельности является прогнозирование дальности видимости в условиях задымления промышленными дымами или продуктами горения.

Прогноз степени задымления больших промышленных регионов является весьма сложной задачей, так как видимость в этом случае зависит не только от наблюдаемых метеорологических условий, но и от пространственной концентрации дымов, их микрофизических и оптических характеристик. Эта многофакторная задача может быть решена с привлечением математических моделей.

Видимость в атмосфере представляет собой сложное психофизическое явление, обусловленное главным образом ослаблением светового потока молекулами воздуха, а также жидкими и твердыми частицами, находящимися во взвешенном состоянии в атмосфере.

Дальность видимости  $S_M$  определяется выражением

$$S_M(\lambda, z) = \frac{\ln \frac{1}{\varepsilon}}{\beta_t(\lambda, z, r)} , \quad (1)$$

где  $\beta_t(\lambda, z, r)$  – спектральный коэффициент аэрозольного ослабления частицами дисперсной задымленной среды,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\varepsilon$  – пороговая чувствительность человеческого глаза.

Показатель ослабления полидисперсного аэрозоля  $\beta_t(\lambda, z, r)$  в пределах пограничного слоя атмосферы будем рассчитывать в соответствии с пространственным распределением массовой концентрации, микрофизических и оптических характеристик дымового аэрозоля [1]

$$\beta_t(\lambda, r, z) = C(x, z) \frac{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 K_t(\rho, m) f(r) dr}{\frac{4}{3} \rho_a \int_{r_1}^{r_2} \pi r^3 f(r) dr}, \quad (2)$$

где  $C(x, z)$  – массовая концентрация дымов горения от площадного стационарного источника непрерывного действия,  $\text{мкг}/\text{м}^3$ ;  $r$  – радиус твердых частиц дыма,  $\text{мкм}$ ;  $K_t(\rho, m)$  – фактор эффективного ослабления излучения одной частицей;  $\rho = 2\pi r/\lambda$  – параметр Ми;  $m$  – комплексный показатель ослабления видимого света частицами дыма;  $\lambda$  – длина волны электромагнитного излучения видимого диапазона,  $\text{мкм}$ ;  $f(r)$  – функция распределения частиц по размерам;  $\rho_a$  – плотность частиц дымового аэрозоля,  $\text{г}/\text{см}^3$ .

Функцию распределения частиц дымового аэрозоля по размерам зададим логарифмически нормальным законом:

$$f(r) = N(2\pi)^{-0.5} (vr)^{-1} \exp\left[-\ln^2(r/r_0)/2v^2\right] \quad (3)$$

где  $N$  – суммарная счетная концентрация частиц;  $r_0$  – медианный радиус распределения  $f(r)$  и  $v$  – полуширина распределения) с преобладанием аккумулятивной аэрозольной фракции с размерами 0,1–1  $\text{мкм}$  и модальным радиусом  $r_m = 0,16\text{--}0,21 \text{ мкм}$ . Что касается комплексного показателя дымового аэрозоля ( $m = n - i\chi$ ), то его действительная часть, (показатель преломления) в расчетах задавалась в пределах  $n = 1,41\text{--}1,51$ , а мнимая часть, характеризующая поглощающую способность дымового аэрозоля, задавалась не более 0,005 ( $\chi \leq 0,005$ ). Для обводненного дымового аэрозоля  $\chi \approx 0,2\text{--}0,3$ .

Задача решается в декартовой прямоугольной системе координат. Вертикальные профили концентрации дымового аэрозоля  $C(x, z)$  определяются из численного решения полуэмпирического уравнения турбулентной диффузии:

$$u \frac{\partial C}{\partial x} + (w - W_g) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} k \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (4)$$

где  $u$ ,  $w$  – соответственно горизонтальная и вертикальная составляющие скорости ветра, м /с;  $W_g$  – скорость гравитационного осаждения аэрозоля, м/с;  $k$  – коэффициент турбулентности,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Уравнение (4) решается методом прогонки при следующих граничных условиях:

$$C(x, z) = 0, \quad z = h; \quad (5)$$

$$k \frac{\partial C}{\partial z} = Sc, \quad z = z_0. \quad (6)$$

где  $h$  – высота пограничного слоя атмосферы;  $z_0$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности;  $Sc$  – мощность площадного источника дыма,  $\text{мкг}/(\text{м}^2\text{с})$ .

В приземном слое распределение частиц субмикронного дымового аэрозоля по размерам подчиняется логнормальному закону с модальным радиусом  $r_m=0.15-0.20$  мкм и, следовательно, скорость осаждения таких частиц примерно близка к нулю. Поэтому данную примесь можно считать невесомой.

Мощность площадного источника дымового аэрозоля будем определять вблизи поверхности земли, т.е. на уровне  $z=z_0$ , где  $z_0$  – параметр шероховатости подстилающей поверхности.

Зная измеренные значения концентрации  $C$  на двух уровнях в приземном слое и величину турбулентного потока тепла  $S_\theta$ , мощность площадного источника поступления дымового аэрозоля в приземный слой будем определять при  $z=z_0$  по формуле [2]

$$S_c = -(g S_\theta)^{\frac{1}{3}} \lambda_\theta^{-1} Z_0^{\frac{4}{3}} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (7)$$

где  $S_c$  – мощность площадного дымового аэрозоля, образовавшегося при горении.

На основе выше приведенных соотношений был разработан алгоритм решения задачи и проведены численные эксперименты по выявлению влияния концентрации дымового аэрозоля, его микрофизических, оптических характеристик и влажности воздуха на дальность видимости в приземном слое атмосферы. Основные полученные результаты сводятся к следующему:

а) выявлено существенное влияние модального радиуса частиц дымового аэрозоля на коэффициент ослабления.

С ростом модального радиуса частиц в два раза при неизменной массовой концентрации дымового аэрозоля дальность видимости увеличивается примерно в два раза. Этот факт объясняется уменьшением счетной концентрации частиц, а, следовательно, и геометрического сечения частиц, что приводит к уменьшению коэффициента ослабления света;

б) учет вертикальных градиентов температуры и влажности воздуха в уравнении баланса турбулентной энергии приводит к значительному изменению пространственной концентрации дымового аэрозоля.

При учете только вертикальных градиентов температуры воздуха характерны более высокие значения концентрации дымов в нижней части пограничного слоя атмосферы (ПСА). Напротив, при учете только вертикальных градиентов влажности, значения концентрации дымов в нижнем слое ПСА уменьшаются (примерно вдвое) по сравнению с условием, когда учитывается только градиенты температуры.

В случае, когда одновременно учитываются вертикальные градиенты температуры и влажности воздуха концентрация дымов в ПСА уменьшается, но в целом, она выше по сравнению с условием, когда градиенты температуры и влажности воздуха не учитываются. Этот факт объясняется изменением энергии и коэффициента турбулентности с высотой в зависимости от величины градиентов температуры и влажности воздуха в приземном слое атмосферы;

в) выявлено значительное влияние относительной влажности воздуха на коэффициент ослабления.

С увеличением относительной влажности от 40 до 80 % дальность видимости уменьшается примерно на 10–40 %. Это связано с обводнением аэрозольных частиц и изменения их оптических констант, то есть с изменением  $n$  и  $x$ , при этом коэффициент ослабления увеличивается также на 10–40 %.

Таким образом, численные эксперименты, проведенные с использованием ПЭВМ, показали, что предложенная модель дальности видимости в условиях задымления пограничного слоя атмосферы продуктами горения имеет большие возможности. Если в качестве входных параметров модели ПСА использовать вертикальные профили составляющих скорости ветра, коэффициента турбулентности, температуры и влажности воздуха, то на выходе можно получать прогностические значения пространственной концентрации дымов и метеорологической дальности видимости.

### Список литературы

1. Зуев В. Е., Креков Г. М. Оптические модели атмосферы. - Л.: Гидрометиздат, 1986. - 620 с.

- 
2. Вагер Б. Н., Надежина Е. Д. Пограничный слой атмосферы в  
условиях горизонтальной неоднородности. - Л.: Гидрометеоиздат , 1979.  
- 135 с.