

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.

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

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

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

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

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

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

где N – суммарная счетная концентрация частиц; r_0 – медианный радиус распределения $f(r)$ и ν – полуширина распределения с преобладанием аккумулятивной аэрозольной фракции с размерами 0,1–1 мкм и модальным радиусом $r_m = 0,16$ –0,21 мкм . Что касается комплексного показателя дымового аэрозоля ($m = n - i\chi$), то его действительная часть, (показатель преломления) в расчетах задавалась в пределах $n = 1,41$ –1,51, а мнимая часть, характеризующая поглощательную способность дымового аэрозоля, задавалась не более 0,005 ($\chi \leq 0,005$). Для обводненного дымового аэрозоля $\chi \approx 0,2$ –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, м²/с.

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

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

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

где h – высота пограничного слоя атмосферы; z_0 – параметр шероховатости подстилающей поверхности; S_c – мощность площадного источника дыма, мкг/(м²с).

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_θ , мощность площадного источника поступления дымового аэрозоля в приземный слой будем определять при $z=z_0$ по формуле [2]

$$S_c = -(gS_\theta)^{\frac{1}{3}} \lambda_\theta^{-1} z_0^{\frac{4}{3}} \frac{\partial C}{\partial z}, \quad (7)$$

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.: Гидрометеиздат , 1979. - 135 с.