



DOI: <https://doi.org/10.15688/jvolsu11.2016.4.6>

УДК 551.509.32

ББК 26.233

ИССЛЕДОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВЛИЯНИЯ УВЛАЖНЕНИЯ АЭРОЗОЛЯ НА ВИДИМОСТЬ В АЭРОПОРТАХ

Татьяна Григорьевна Анодина

Доктор технических наук, профессор, председатель,
Межгосударственный авиационный комитет
mak@mak.ru
ул. Большая Ордынка, 22/2/1, 119017 г. Москва, Российская Федерация

Ибрагим Шаиг оглы Магеррамов

Аспирант,
Национальное аэрокосмическое агентство
imaharramov@hotmail.com
ул. С.С. Ахундова, 1, AZ 1106 г. Баку, Республика Азербайджан

Аннотация. Условия низкой видимости вызывают множество проблем в таких сферах человеческой деятельности, как воздушный транспорт и функционирование аэропортов. Увеличение размера аэрозольных частиц, имеющих в атмосфере, приводит к повышению коэффициента ослабления и ухудшению видимости. Для оценки гигроскопичности аэрозоля используется коэффициент гигроскопического роста, зависящий от диаметра аэрозольных частиц и от относительной влажности. Предложен общий параметр гигроскопичности многомодового аэрозоля, являющийся средневзвешенной величиной концентрации частиц всех мод. В качестве весовых коэффициентов используются параметры гигроскопичности мод.

Задача исследования формулируется следующим образом: при постоянстве некоторых функциональных показателей вычислить вид зависимости показателя гигроскопичности от диаметра частиц.

Физический смысл рассматриваемой оптимизационной задачи заключается в нахождении указанной зависимости, при которой для ухудшения видимости потребовалось бы минимальное количество влаги. Найдено условие, при выполнении которого может произойти максимально возможное ухудшение видимости по причине увлажнения аэрозоля.

Ключевые слова: аэрозоль, относительная влажность, видимость, гигроскопичность, оптимизация.

Хорошо известно [2; 3; 5; 8; 10], что условия низкой видимости вызывают множество проблем в таких сферах человеческой деятельности, как воздушный транспорт и функционирование аэропортов. Согласно [2] имеется значительная разница между такими показателями, как види-

мость и предел видимости. Предел видимости является функцией коэффициента ослабления атмосферы, альbedo, угла обзора цели, а также порогового контраста наблюдателя при осуществлении наблюдений. Согласно [2] предел видимости определяется по формуле

$$VR = \frac{1}{k_{ex}} \cdot \ln \frac{|C|}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где C – контраст между целью на горизонте и ее фоном; k_{ex} – коэффициент ослабления атмосферы; ε – пороговый контраст наблюдателя.

Согласно [2], используя известную формулу Кошмидера и формулу (1), можно получить следующее соотношение:

$$k_{ex}(\text{км}^{-1}) = \frac{3}{VIS(\text{км})}. \quad (2)$$

Как отмечается в работе [3], во многих экономически развивающихся странах, в том числе в Китае, низкая видимость часто вызвана появлением дымки, возникающей либо из-за сильного аэрозольного загрязнения атмосферы, либо вследствие эффекта гигроскопического роста аэрозоля. При этом точно установлено, что увеличение размера аэрозольных частиц приводит к увеличению коэффициента ослабления и ухудшению видимости [1; 7; 9; 11; 13].

Для оценки гигроскопичности аэрозоля часто используется такой показатель, как коэффициент гигроскопического роста $f(D_p, RH)$, определяемый как

$$f(D_p, RH) = \frac{D_p(RH)}{D_{p, dry}}, \quad (3)$$

где $D_p(RH)$ и $D_{p, dry}$ – диаметры частиц, находящихся во влажных и сухих условиях соответственно [4; 6; 10; 12]. Если рассматривается многомодовый аэрозоль, то общий параметр гигроскопичности многомодового аэрозоля может быть вычислен как

$$k(D_p) = \frac{\sum_{i=1}^4 k_i \cdot N_i(D_p)}{\sum_{i=1}^4 N_i(D_p)}, \quad (4)$$

где k_i – параметр гигроскопичности $i = 1$ моды; $N_i(D_p)$ – концентрация частиц i -й моды.

Согласно работе [10] при заданной величине относительной влажности RH фактор гигроскопического роста и показатель k находятся в следующем соотношении:

$$RH = \frac{f^3 - 1}{f^3 - (1 - k)} \cdot \exp\left(\frac{4\sigma \cdot M}{R \cdot T \cdot D_p \cdot f}\right), \quad (5)$$

где σ – поверхностная напряженность на границе раствор – воздух; M – молекулярный вес воды; R – универсальная постоянная газа; T – температура; D_p – диаметр сухой частицы; f – коэффициент гигроскопического роста аэрозоля.

Задача исследования формулируется следующим образом: при постоянстве показателей f, σ, M, R, T какой вид функциональной зависимости

$$k = f(D_p) \quad (6)$$

мог бы обеспечить минимальную величину интегрального значения RH_{in} , определяемого по формуле

$$RH = \int_0^{D_{p,m}} \frac{C-1}{C+k(D_p)-1} \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) dD_p, \quad (7)$$

где $C_1 = f; A = \frac{4\sigma \cdot M}{R \cdot T \cdot f}$,

при ограничительном условии

$$\int_0^{D_{p,m}} k(D_p) dD_p = C_2, \quad (8)$$

где $C_2 = \text{const}$.

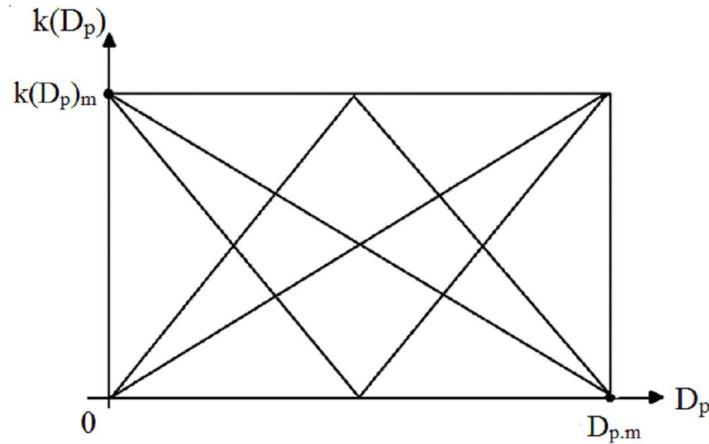
С учетом выражений (7) и (8) можно составить полный функционал безусловной вариационной оптимизации

$$RH_{in} = \int_0^{D_{p,m}} \frac{C_1-1}{C_1+k(D_p)-1} \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) dD_p + \lambda \int_0^{D_{p,m}} k(D_p) dD_p, \quad (9)$$

где λ – множитель Лагранжа.

Заметим, что физический смысл рассматриваемой оптимизационной задачи заключается в нахождении такой функции зависимости k от D_p , при которой для ухудшения видимости потребовалось бы минимальное количество влаги. Смысл ограничения (8) заключается в сужении рассматриваемого класса возможных функций, удовлетворяющих условию (8) (см. рисунок).

Согласно методу Эйлера для решения сформулированной оптимизационной задачи (9) должно быть вычислено условие



Графики некоторых непрерывных и кусочно-непрерывных функций, удовлетворяющих условию (8)

$$F_1 = \frac{d \left\{ \frac{C_1 - 1}{C_1 + k(D_p) - 1} \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) + \lambda \cdot k(D_p) \right\}}{dk(D_p)} = 0. \quad (10)$$

С учетом выражения (10) имеем

$$\frac{-C_1 - 1}{[C_1 + k(D_p) - 1]^2} \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) + \lambda = 0. \quad (11)$$

Из выражения (11) находим

$$k(D_p) = C_1 - \sqrt{\frac{(C_1 - 1) \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right)}{\lambda}}. \quad (12)$$

С учетом выражений (8) и (12) нетрудно получить следующее выражение для вычисления значения λ

$$\lambda = \lambda_0 = \frac{\left[\int_0^{D_{p,m}} \sqrt{(C_1 - 1) \exp\left(\frac{A}{D_p}\right)} dD_p \right]^2}{[(C_1 - 1)D_{p,m} - C_1]^2}. \quad (13)$$

С учетом выражений (11) и (13) получаем

$$k(D_p) = C_1 - 1 - \sqrt{\frac{\exp\left(\frac{A}{D_p}\right) \cdot (C_1 - 1)}{\lambda_0}}. \quad (14)$$

Как видно из выражения (13), λ_0 является положительной величиной. Следовательно, оптимальной функцией $k = k(D_p)$, приводящей функционал (9) к экстремальному значению, является растущая функция аргумента D_p .

Для исследования вопроса о том, является ли вычисленный экстремум минимумом или максимумом, вычислим вторую производную по формуле

$$F_2 = \frac{d^2 \left\{ \frac{C_1 - 1}{C_1 + k(D_p) - 1} \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) + \lambda \cdot k(D_p) \right\}}{d(k(D_p))^2}. \quad (15)$$

Из условия (15) с учетом $C_1 = f$ находим

$$F_2 = \frac{(f - 1) \exp\left(\frac{A}{D_p}\right)}{[C_1 - k(D_p) - 1]^2} + \frac{(f - 1) \cdot \exp\left(\frac{A}{D_p}\right) \cdot \frac{A}{D_p^2}}{[C_1 - k(D_p) - 1]^2}. \quad (16)$$

Из выражения (3) ясно, что $f > 1$. С учетом этого можно заключить, что F_2 является всегда положительной величиной. Следовательно, при условии (14) RH_{in} достигает минимальной величины, то есть при соблюдении условия (14) полное увлажнение определяет максимально возможное ухудшение видимости по причине увлажнения аэрозоля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A new experimental approach to study the hygroscopic and optical properties of aerosol: application to ammonium sulfate particles / C. Denjean, P. Formenti, B. Picquet-Varrault [et. al.] // Atmospheric Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 7. – P.183–197.
2. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain / J. Chen, C. S. Zhao, N. Ma [et al.] // Atmos. Chem. Phys. – 2012. – Vol. 12. – P.4935–4950.
3. Emissions from an International Airport Increase Number Concentrations 4-fold at 10 km

Downwind / N. Hudda, T. Gould, K. Hartin [et al.] // *Environmental Science & Technology*. – 2014. – № 48. – P. 6628–6635.

4. Evaluation of aerosol distribution and optical depth in the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory coupled model CM2.1 for present climate / P. Ginoux, L. W. Horowitz, V. Ramaswamy [et al.] // *Journal of geophysical research*. – 2006. – Vol. 111. – DOI: 10.1029/2005JD006707.

5. Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols / C. Rojo, X. Vancassel, P. Mirabel // *Fuel*. – 2015. – Vol. 144. – P. 335–341.

6. Impact of relative humidity and water soluble constituents of PM_{2.5} on visibility impairment in Beijing, China / J. Chen, Sh. Qiu, J. Sjang [et al.] // *Aerosol and Air Quality Research*. – 2014. – Vol. 14. – P. 260–268.

7. Mali, R. R. Visibility measurement technique and its application in aviation services at international airports in India / R. R. Mali, R. D. Vashistha. – Electronic text data. – Mode of access: [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOPublications/IOM-82-TECO-2005/Posters/P1\(08\)_India_2_Mali.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOPublications/IOM-82-TECO-2005/Posters/P1(08)_India_2_Mali.pdf). – Title from screen.

8. Mukherjee, A. A study of aerosol properties based on observations of particulate matter from the U.S. Embassy in Beijing, China / A. Mukherjee, D. W. Toohey // *Earth's Future*. – 2016. – № 4. – DOI: 10.1002/2016EF000367.

9. Nwofor, O. K. Seasonal levels of meteorological visibility at Port-Harcourt Nigeria and possible links to aerosol loading and humidification / O. K. Nwofor // *The Pacific Journal of Science and Technology*. – 2010. – Vol. 11, № 2. – P. 544–551.

10. Petters, M. D. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity / M. D. Petters, S. M. Kreidenweis // *Atmos. Chem. Phys.* – 2007. – Vol. 7. – P. 1961–1971. – DOI: 10.5194/acp-7-1961-2007.

11. Singh, A. Influence of aerosol composition on visibility in megacity / A. Singh, S. Dey // *Atmospheric Environment*. – 2012. – Vol. 62. – P. 367–373.

12. The impacts of aerosol loading, composition and water uptake on aerosol extinction variability in the Baltimore–Washington, D.C. region / A. J. Beyersdorf, L. D. Ziemba, G. Chen [et al.] // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2016. – Vol. 16. – P. 1003–1015.

13. Zhang, Q. H. The challenge of improving visibility in Beijing / Q. H. Zhang, J. P. Zhang, H. W. Xue // *Atmos. Chem. Phys.* – 2010. – Vol. 10. – P. 7821–7827.

REFERENCES

1. Denjean C., Formenti P., Picquet-Varrault B., et al. A new experimental approach to study the hygroscopic and optical properties of aerosol: application to ammonium sulfate particles.

Atmospheric Measurement Techniques, 2014, no. 7, pp. 183–197.

2. Chen J., Zhao C.S., Ma N., et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain. *Atmos. Chem. Phys.*, 2012, no. 12, pp. 4935–4950.

3. Hudda N., Gould T., Hartin K., et al. Emissions from an International Airport Increase Number Concentrations 4-fold at 10 km Downwind. *Environmental Science & Technology*, 2014, no. 48, pp. 6628–6635.

4. Ginoux P., Horowitz L.W., Ramaswamy V., et al. Evaluation of aerosol distribution and optical depth in the Geophysical Fluid Dynamics Laboratory coupled model CM2.1 for present climate. *Journal of geophysical research*, 2006, no. 111, D22210. DOI: 10.1029/2005JD006707.

5. Rojo C., Vancassel X., Mirabel P., et al. Impact of alternative jet fuels on aircraft-induced aerosols. *Fuel*, 2015, no. 144, pp. 335–341.

6. Chen J., Qiu Sh., Sjang J., et al. Impact of Relative Humidity and Water Soluble Constituents of PM_{2.5} on Visibility Impairment in Beijing, China. *Aerosol and Air Quality Research*, 2014, no. 14, pp. 260–268.

7. Mali R.R., Vashistha R.D. *Visibility Measurement technique and Its Application in Aviation Services at International Airports in India*. Available at: [https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOPublications/IOM-82-TECO-2005/Posters/P1\(08\)_India_2_Mali.pdf](https://www.wmo.int/pages/prog/www/IMOPublications/IOM-82-TECO-2005/Posters/P1(08)_India_2_Mali.pdf).

8. Mukherjee A., Toohey D.W. A study of aerosol properties based on observations of particulate matter from the U.S. Embassy in Beijing, China. *Earth's Future*, 2016, no. 4. DOI: 10.1002/2016EF000367.

9. Nwofor O.K. Seasonal levels of meteorological visibility at Port-Harcourt Nigeria and possible links to aerosol loading and humidification. *The Pacific Journal of Science and Technology*, 2010, vol. 11, no. 2. Available at: <http://www.akamaiuniversity.us/PJST.htm>.

10. Petters M.D., Kreidenweis S.M. A single parameter representation of hygroscopic growth and cloud condensation nucleus activity. *Atmos. Chem. Phys.*, 2007, no. 7, pp. 1961–1971. DOI: 10.5194/acp-7-1961-2007.

11. Singh A., Dey S. Influence of aerosol composition on visibility in megacity Delhi. *Atmospheric Environment*, 2012, no. 62, pp. 367–373.

12. Beyersdorf A.J., Ziemba L.D., Chen G., et al. The impacts of aerosol loading, composition and water uptake on aerosol extinction variability in the Baltimore–Washington, D.C. region. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, no. 16, pp. 1003–1015.

13. Zhang Q.H., Zhang J.P. Xue H.W. The challenge of improving visibility in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.*, 2010, no. 10, pp. 7821–7827.

**STUDY OF AEROSOL HUMIDIFICATION IMPACT
ON VISIBILITY IN AIRPORTS**

Tatyana Grigoryevna Anodina

Doctor of Technical Sciences, Professor, Chairman,
Intergovernmental Aviation Committee
mak@mak.ru
Bolshaya Ordynka St., 22/2/1, 119017 Moscow, Russian Federation

Ibragim Shaig ogly Maharramov

Postgraduate Student,
National Aerospace Agency
imaharramov@hotmail.com
S.S. Akhundova St., 1, AZ 1106 Baku, Republic of Azerbaijan

Abstract. The low visibility leads to many problems in such spheres of human activity as air transport and functioning of airports. Increase of aerosol particles in atmosphere causes the increase of extinction coefficient and low visibility. To estimate the hygroscopicity of aerosol, the coefficient of hygroscopic increase which depends on diameter of aerosol particles and the relative humidity is used. The general parameter of multimode aerosol hygroscopicity is suggested which is determined as averaged weighted value of concentrations of all modes of aerosol particles. The parameters of hygroscopicity are used as the weight coefficients. The research task is formulated as follows. Upon the constancy of some functional parameters the dependence of hygroscopicity parameters on particle diameter should be found. The physical meaning of the considered optimization task is that the worst dependence of hygroscopicity parameter on particles diameter should be calculated, upon which the minimum amount of water worsening the visibility would be needed. The authors suggest the condition which can cause maximum possible worsening of visibility due to aerosol humidification.

Key words: aerosol, relative humidity, visibility, hygroscopicity, optimization.