УДК 551.510 Л. Р. Бекирова¹, Х. С. Халилова², И. Г. Абдуррахманова³

Оценка экстремальных свойств генерации аэрозоля в береговой зоне под воздействием ветра

¹Азербайджанский государственный университет нефты и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика ² Национальная академия авиации, г. Баку, Азербайджанская Республика ³ Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку, Азербайджанская Республика

e-mail: asadzade@rambler.ru

Аннотация. Статья посвящена сравнительной оценке известных моделей возникновения морского аэрозоля в береговой зоне по признаку появления экстремума в кривой распределения аэрозольного потока по радиусу сгенерированных частей. Рассмотрены балансная модель Смита и модель береговой транспортировки аэрозоля (САТ). Указанные модели охватывает как континентальный, так и морской прибрежный аэрозоль, где введена эмпирическая функция источника аэрозоля, которая позволяет исследовать распределение частиц по размерам с учетом влияния ветра.

Эта функция представлена в виде аддитивной комбинации рапсределений соответствующих потоков частиц по размерам радиуса возникших по механизмам лопанию пузырьков и ударения волн о берег. Применительно к балансовой модели получено аналитическое выражение для вычисления скорости ветра при которой поток аэрозольных частиц определенного радиуса имеет максимум. Также показано, что максимум кривой распределения потока аэрозоля по радиусам смещается при изменении скорости ветра. Показано экспериментальное подтверждение этого факта применительно к модели САТ.

Ключевые слова: аэрозоль, генерация, скорость ветра, распределение, модель.

Введение

Как отмечается в работе [1], в береговых зонах, где происходит непосредственное соприкосновение атмосферы и поверхности океана, функция распределения морского аэрозоля по размерам зависит от условий погоды, и в особенности от скорости ветра. Ветер создает турбулентные воздушные потоки над морем, и в конечном счете вознукшие при этом аэрозольные частицы содействуют переносу тепла и влаги над морской поверхностью [2,3]. Известная модель, динамики аэрозоля (MADE) позволяет изучить связь между динамикой аэрозоля и метеорологическими параметрами [4]. Как отмечается в [5], динамика аэрозоля включает такие процессы, как коагуляция, конденсационный рост; ньюклеация, перенос массы. При этом обнаруживается некоторая связь между моделями качества воздуха и моделями динамики аэрозоля.

Согласно [6], наиболее часто используются следующие модели функции источника аэрозольных частиц: (а) модель Монахена [7]; (б) модель Смита [8].

Согласно модели Монахена функция источника аэрозольных частиц опеделяется выражением

$$\frac{dF}{dr} = 1,37U_{10}^{3,41} \cdot r^{-3}(1+0,057r^{1,05}) \times 10^{1,19\exp(-B^2)}$$
(1)
где: U_{10} -скорость ветра в м сек⁻¹ на высоте 10м; $B = \frac{(0,386-\log r)}{0.650}$

Вместе с тем, согласно [6] модель (1) плохо зареномендовала себя на практике.

В отличие от модели (1), модель Смита учитывает как пузырьковый механизм образования морского аэрозоля, так и волновой механизм. В дальнейшем, в работе [6] была предложена модель распространения берегового аэрозоля (САТ) с функцией источника, в которой особо учитывался механизм образования морского аэрозоля в береговых зонах. Сравнение указанных трех моделей показано на рис. 1.



Рис. 1. Графики зависимости $\frac{dF}{dr}$ от радиуса аэрозольных частиц, для трех моделей: Цифрами указаны: 1-модель Монахена; 2-модель Смита; 3-модель, предложенная в работе [6]

Модель САТ охватывает как континентальный, так и морской прибрежный аэрозоль, где введена эмпирическая функция источника аэрозоля, которая позволяет исследовать распределение частиц по размерам с учетом влияния ветра и состава аэрозоля. Вместе с тем в данной модели не рассмотрены такие вопросы, как определение скоростей ветра, при которых происходит максимальная генерация аэрозольных частиц определенных размеров.

Предлагаемый метод

Отметим, что в модели САТ береговой аэрозоль рассматривается как внешняя смесь континентального аэрозоля и частиц морских бризгов, состоящего из хлорида натрия. Имеется ввиду, что частицы морского аэрозоля возникают изза ударения волн о берег, за счет диссигации волновой энергии. Согласно работе [7], морской аэрозоль возникает при скорости ветра выше 9 м/сек из-за механического разложения верхней части морских волн под воздействием порывов ветра. Поверхностный поток морского аэрозоля, т.е. количество частиц, сгенерированных на единичной площади поверхности моря за единицу времени характеризуется функцией источника аэрозольных частиц. В работе [8] была предложена функция источника морского аэрозоля, составленная на основе проведенных натурных измерений с учетом процессов генерации и удаления аэрозольных частиц возникающих по механизму лопания пузырков и ударения волн о берег. Указанная функция источника морского аэрозоля имеет вид:

$$\frac{dF}{dr_{80}} = \sum_{i=1,2} A_i \exp\left[-f_i (\ln\frac{r_{80}}{r_{0i}})^2\right]$$
(2)

где: f_i , r_{0i} -постоянные величины (f_1 =3,1; f_2 =3,3; r_{01} =2,1 мкм; r_{02} =9,2 мкм); r_{80} -радиус аэрозольной частицы при относительной влажности равной 80%; A_i -коэффициенты, зависящие от скорости ветра, где:

$$\log A_1 = 0,0676U + 2,43 \tag{3}$$

$$\log A_2 = 0,959U^{\frac{1}{2}} - 1,476 \tag{4}$$

где: -скорость ветра.

В уравнении (1) $\frac{dF}{dr_{80}}$ измеряется в м⁻²мкм⁻¹сек⁻¹, *U* измеряется в м/сек. Оно действительно для аэрозольных частиц радиусом до 20 мкм при относительной влажности 80%.

Целью проводимого исследования является определение тех значений ветра при которых сгенерированный поток аэрозоля определенных размеров достигает максимума. Для получения общих выражений формулы (3) и (4) перепишем в виде

$$\log A_1 = a_1 U + a_2 \tag{5}$$

$$\log A_2 = a_3 \sqrt{U} - a_4 \tag{6}$$

Из (5) получим

$$A_{1} = a_{5} \cdot \exp(a_{1}U + a_{2}) \tag{7}$$

$$A_2 = a_5 \cdot \exp(a_3\sqrt{U} - a_4) \tag{8}$$

где: a_5 -постоянная изменения основания логарифмирования. Далее, обозначив $\frac{dF}{a_5 dr_{80}} = F_1$, из выражений (1),(6),(7) получим

$$F_1 = exp\left[a_1U + a_2 - f_1 \cdot (\ln\frac{r_{80}}{r_{01}})^2\right] + exp\left[a_3\sqrt{U} - a_4 - f_2(\ln\frac{r_{80}}{r_{02}})^2\right]$$
(9)

Так как нас интересует значение ветра при котором функция $F = f(r_{80})$ достигает экстремума, то примем $F_1 = 0$. В этом случае из (9) получаем

$$exp\left[a_1U + a_2 - f_1 \cdot \left(\ln\frac{r_{80}}{r_{01}}\right)^2 + a_3\sqrt{U} - a_4 - f_2\left(\ln\frac{r_{80}}{r_{02}}\right)^2\right] = 1 \quad (10)$$

Из (10) получим

$$a_1 U + a_3 \sqrt{U} + C = 0 \tag{11}$$

где:

$$C = a_2 - f_1 \cdot \left(\ln \frac{r_{80}}{r_{01}} \right)^2 - a_4 - f_2 \left(\ln \frac{r_{80}}{r_{02}} \right)^2 \tag{12}$$

Для решения уравнения (11), его приведем к виду

$$U + \frac{a_3}{a_1}\sqrt{U} + \frac{c}{a_1} = 0 \tag{13}$$

Осуществим замену переменных

$$\sqrt{U} = x \tag{14}$$

С учетом (14) уравнение (13) запишем в виде

$$x^2 + \frac{a_3}{a_1}x + \frac{c}{a_1} = 0 \tag{15}$$

Решение (15) имеет вид

$$x = -\frac{a_3}{2a_1} + \sqrt{\frac{a_3^2}{4a_1^2} - \frac{c}{a_1}}$$
(16)

С учетом (14) и (16) получим

$$U = \left(-\frac{a_3}{2a_1} + \sqrt{\frac{a_3^2}{4a_1^2} - \frac{c}{a_1}}\right)^2 \tag{17}$$

С учетом следующих оценок: $a_3 = 0,96$; $a_1 = 0,068$; $f_1 = 3,1$; $f_2 = 3,3$; $a_4 = 1,48$; $r_{01} = 2,1$ мкм; $r_{02} = 9,2$ мкм. Выражение (17) выразим как

$$U = \left(-\frac{0.96}{2 \cdot 0.068} + \sqrt{\frac{0.96^2}{4(0.068)^2} - \frac{C}{0.068}}\right)^2 \tag{18}$$

При этом с определяется как

Оценка экстремальных свойств генерации аэрозоля в береговой зоне под воздействием ветра

$$C = 2,43 - 3,1 \cdot \left(\ln \frac{r_{80}}{2,1} \right)^2 - 1,48 - 3,3 \left(\ln \frac{r_{80}}{9,2} \right)^2$$
(19)

Как видно из вышеизложенного существует величина скорости ветра U при которой поток аэрозольных частиц с диаметром r_{80} достигает максимума.

Следует отметить, что вышеуказанный теоретический вывод хорошо согласуется с результатами эксперименталльных исследований, проведенных в [6]. На рис. 2 преведены графики зависимости dN/dlogr от радиуса аэрозольных частиц в логарифмическом масштабе для модели Смита и модели САТ.



Рис. 2. Графики зависимости *dN/dlogr* от *r* для модели Смита и модели САТ. Кругами и треугольниками показаны данные, полученные по модели смита

Как видно из графиков, приведенных на рис. 2 наличие максимума dN/dlogr подтверждается для обеих моделей. В то же время смещение этого максимума в зависимости от скорости ветра четко прослеживается только для модели САТ.

Выводы

Сформулирован и решен вопрос об определении скорости ветра, при которой генерируется максимальное количество аэрозольных частиц в береговой зоне. Анализ существующих моделей Монахена, Смита а также модели САТ показал, что указанный максимум вычисляется аналитически в модели Смита. Полученное решение показало, что значение искомой величины скорости ветра зависит от радиуса аэрозольных частиц, генерация которых при указанной скорости достигает максимума. Приведено экспериментальное подтверждение указанного эффекта применительно к модели САТ.

Литература

- Zielinski T. Studies of Aerosol Physical Properties in Coastal Areas// Aerosol Science and Technology. American Association for Aerosol Research. 38:513-524. 2004. doi:10.1080/02786820490466738.
- 2. Leeuw G., Neele F., Hill M., Smith M., Vignati E. Production of sea spray aerosol in the surf zone// J. Geophys. Res. 105:29397-29409. 2000.
- 3. Vignati E., Leeuw G., Borkowicz R. Aerosol transport in the coastal environmental and effects on extinction// Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 3433:21-30. 1998.
- 4. Ingmar J., Heinz H., Memmesheimer M., Ebel A., Francis S., Shankar U. Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications// Atmospheric Environment Vol. 32. No 17. Pp. 2981-2999. 1998.
- 5. Zhang Y., Seigneur C., Seinfeld J., Jacobson M., Binkowski F. Simulation of aerosol dynamics: a comparative review of algorithms used in air quality models// Aerosol Science and Technology. 31:487-514. 1999.
- Vignati E., Leeuw G., Berkowicz R. Modeling coastal aerosol transport and effects of surf-produced aerosols on processes in the marine atmospheric boundary layer// Journal of Geophysical Research. Vol. 106. No 17. Pp. 20,225-20,238. September 16. 2001.
- 7. Monahan E. C., OMuircheartaigh I. G. Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface. Int. J. Remote Sens. 7. 627-642. 1986.
- 8. Smith M. H., Park P. M., Consterdine I. E. Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea. Q. J. R. Meteorol. Soc. 119. 809-824. 1993.
- 9. Эльсгольц Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление// М. Наука. 1974. 432 с.

| L. R. Bekirova ¹ , H. S. Khalilova ² , I. G. Abdurrakhmanov ³ | Evaluation of the extreme properties of aerosol generation in the coastal zone under the influence of wind |
|--|---|
| | ¹ Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Republic of Azerbaijan ² National Academy of Aviation, Baku, Republic of Azerbaijan ³ National Aerospace Agency, Baku, Republic of Azerbaijan <i>e-mail: asadzade@rambler.ru</i> |

Abstract. The article is devoted to a comparative assessment of known models of the occurrence of marine aerosol in the coastal zone on the basis of the appearance of an extremum in the distribution curve of the aerosol flow along the radius of the generated parts. The Smith balance model and the onshore aerosol Transportation (CAT) model are considered. These models cover both continental and marine coastal aerosol, where an empirical aerosol source function is introduced, which allows us to study the particle size distribution taking into account the influence of wind.

This function is presented in the form of an additive combination of the distributions of the corresponding particle flows by the size of the radius arising from

the mechanisms of bubble bursting and waves hitting the shore. In relation to the balance model, an analytical expression is obtained for calculating the wind speed at which the flow of aerosol particles of a certain radius has a maximum. It is also shown that the maximum of the aerosol flow distribution curve along the radii shifts when the wind speed changes. Experimental confirmation of this fact is shown in relation to the CAT model.

Keywords: aerosol, generation, wind speed, distribution, model.

References

- Zielinski T. Studies of Aerosol Physical Properties in Coastal Areas// Aerosol Science and Technology. American Association for Aerosol Research. 38:513-524. 2004. doi:10.1080/02786820490466738. (in English)
- 2. Leeuw G., Neele F., Hill M., Smith M., Vignati E. Production of sea spray aerosol in the surf zone// J. Geophys. Res. 105:29397-29409. 2000. (in English)
- 3. Vignati E., Leeuw G., Borkowicz R. Aerosol transport in the coastal environmental and effects on extinction// Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng. 3433:21-30. 1998. (in English)
- 4. Ingmar J., Heinz H., Memmesheimer M., Ebel A., Francis S., Shankar U. Modal aerosol dynamics model for Europe: development and first applications// Atmospheric Environment Vol. 32. No 17. Pp. 2981-2999. 1998. (in English)
- 5. Zhang Y., Seigneur C., Seinfeld J., Jacobson M., Binkowski F. Simulation of aerosol dynamics: a comparative review of algorithms used in air quality models// Aerosol Science and Technology. 31:487-514. 1999. (in English)
- Vignati E., Leeuw G., Berkowicz R. Modeling coastal aerosol transport and effects of surf-produced aerosols on processes in the marine atmospheric boundary layer// Journal of Geophysical Research. Vol. 106. No 17. Pp. 20,225-20,238. September 16. 2001. (in English)
- 7. Monahan E. C., OMuircheartaigh I. G. Whitecaps and the passive remote sensing of the ocean surface. Int. J. Remote Sens. 7. 627-642. 1986. (in English)
- 8. Smith M. H., Park P. M., Consterdine I. E. Marine aerosol concentrations and estimated fluxes over the sea. Q. J. R. Meteorol. Soc. 119. 809-824. 1993. (in English)
- 9. El'sgol'c L. E. Differencial'nye uravneniya i variacionnoe ischislenie// M. Nauka. 1974. 432 s. (in Russian)

Поступила в редакцию 10.12.2022 г