

УДК 504.054:656

МЕТОДИКА РАСЧЕТА УРОВНЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ АВИАЦИОННЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ

Кулаков С.Ю., Базарский О.В.

ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», Воронеж, e-mail: kulsy7@mail.ru

В статье представлена методика определения уровня загрязнения атмосферы продуктами сгорания авиационного топлива, позволяющая уточнить существующие математические модели и повысить точность геоэкологической оценки загрязнения атмосферы аэродромов авиационными двигателями воздушных судов, отличающаяся тем, что авиационный источник загрязнения атмосферы представлен как совокупность точечных источников с соответствующими параметрами газодинамического образования. Полученные совокупности математических моделей могут быть применены для определения уровня загрязнения атмосферы авиационными двигателями вблизи ВС, где наблюдается наибольшее загрязнение атмосферы и работает обслуживающий авиационную технику летно-технический персонал. Они способны заменить проведение трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований. Представлены результаты апробации предложенной совокупности математических моделей, подтверждающие удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов. Разработанная совокупность моделей образует методику, позволяющую повысить точность оценки пространственного загрязнения атмосферы продуктами сгорания авиационного топлива.

Ключевые слова: Методика расчета, загрязнение атмосферы, геоэкологическая оценка, авиационный двигатель, газо-динамическое образование.

DESIGN PROCEDURE OF CONCENTRATION OF POLLUTING SUBSTANCES IN ATMOSPHERE IN THE CONDITIONS OF CARRYING OVER OF THE CLOUD FROM AVIATION ENGINES OF AIRCRAFTS

Kulakov S.Y., Bazarskiy O.V.

Air Force Education and Research Centre «The Zhukovsky and Gagarin Air Force Academy», Voronezh, e-mail: kulsy7@mail.ru

In article the technique of definition of level of pollution of atmosphere by products of combustion of aviation fuel allowing is presented to specify existing mathematical models and to raise accuracy of a geoeological estimation of pollution of atmosphere of airdromes aviation engines of aircrafts different that the aviation source of pollution of atmosphere is presented as set of dot sources with in corresponding parametres moving gas formations. The resulting set of mathematical models can be used to determine the level of air pollution from aircraft engines near the Sun, where there are the greatest air pollution, and works serving aeronautical engineering flight technician. They are capable of holding replace labor-intensive and expensive experimental studies. The results of testing the proposed set of mathematical models confirm satisfactory agreement between the calculated and experimental results. Developed a set of models forms a technique to improve the accuracy of the spatial assessment of air pollution by combustion products of aviation fuel.

Keywords: Design procedure, air pollution, geoeological estimation, the aviation engine, moving gas formations.

Воздушные суда (ВС) оказывают отрицательное воздействие на окружающую среду. Последствия этих воздействий лежат в широком диапазоне: от выброса авиационными двигателями продуктов сгорания в атмосферу до разрушения сложившихся биогеоценозов. Ввиду этого, при определении границ санитарно-защитной зоны аэродрома, важен корректный, надежный и хорошо обоснованный метод расчета концентрации вредных веществ в атмосферном воздухе, которые присутствуют в отработавших газах авиационных двигателей.

В настоящее время нет общепринятой методики оценки возможного загрязнения приземного слоя воздуха на территории аэродромов. Это связано с трудностями точного количественного определения величин выбросов загрязняющих веществ (ЗВ) авиационными двигателями ВС и условий рас-

пространения облака в приземном слое воздуха (ПСВ) [3]. ВС представляет собой пространственный источник загрязнения с переменной интенсивностью эмиссии вредных веществ и различной ориентацией направления эмиссии относительно ветра. Оно может быть как подвижным источником (на этапе руления и взлета-посадки), так и стационарным при технологических операциях опробования двигателей.

Кроме того, по сравнению с типичными промышленными источниками, параметры выхлопных газов авиадвигателей имеют гораздо более высокие значения. Например, для большинства современных авиадвигателей основные параметры выхлопной струи лежат в диапазоне [2]:

- температура выхлопных газов $T_r = (300 - 600)^\circ\text{C}$;
- скорость истечения выхлопных газов $u_r = (100 - 600) \text{ м/с}$.

Более высокий уровень температур выхлопных газов, по сравнению с температурой окружающего воздуха, обуславливает значительно больший градиент концентраций ЗВ. Скорость истечения выхлопных газов также в несколько раз превосходит скорости истечения газов из труб промышленных предприятий. Кроме этого, направление скорости истечения газов из сопла авиадвигателя практически параллельно земле, а размеры не позволяют считать источник точечным. Эти характерные особенности ВС

как источника ЗВ не позволяют при расчете уровня загрязнения атмосферного воздуха применить целый ряд общепринятых методик расчета концентраций загрязнителей от одиночных источников, таких как ОНД-86, модель Паскуилла-Гиффорда и др. [2].

Более точное описание механизмов переноса облака загрязняющих веществ (ЗВ) в атмосфере от авиационных двигателей дает разработанная Государственным научно-исследовательским институтом гражданской авиации модель [5]:

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q_t(t) \exp \left\{ - \left[\frac{(X-x')^2}{2\sigma_{x_0}^2 + 4K_x(t-t')} \right] - \left[\frac{(Y-y')^2}{2\sigma_{y_0}^2 + 4K_y(t-t')} \right] \right\}}{\sqrt{8\pi^3 [\sigma_{x_0}^2 + 2K_x(t-t')] [\sigma_{y_0}^2 + 2K_y(t-t')]}} \times \left\{ \frac{\exp \left\{ \frac{(z-z'-H)^2}{2\sigma_{z_0}^2 + 4K_z(t-t')} \right\} + \exp \left\{ \frac{(z+z'+H)^2}{2\sigma_{z_0}^2 + 4K_z(t-t')} \right\}}{\sqrt{\sigma_{z_0}^2 + 2K_z(t-t')}} \right\}, \quad (1)$$

где Q (г/с) – залповый выброс массы ЗВ за 1 секунду работы авиационных двигателей; σ_x , σ_y , σ_z – величины среднего квадратичного отклонения примеси ЗВ в момент начала воздействия атмосферной турбулентности; K_x , K_y , K_z – коэффициенты турбулентной диффузии; x , y , z – декартовы координаты источника; H – результирующий подъем оси струи над поверхностью.

К основным недостаткам модели (1) можно отнести то, что струя ЗВ моделируется точечным источником загрязнения атмосферы. Это значительно понижает прогностические возможности модели вблизи ВС именно на том участке, где наблюдаются

максимальное загрязнение атмосферы авиационными двигателями ВС. Кроме того, использование данной модели возможно лишь при условии совпадения направления ветра с осью струи авиационного двигателя.

Для повышения точности оценки уровня загрязнения атмосферы вблизи ВС предложено модифицировать модель (1) с учетом параметров газо-динамического образования (ГДО) реактивной струи авиационного двигателя. Для этого ГДО представим совокупностью точечных источников, расположенных на удалении до 100 метров от сопла авиационного двигателя с интервалом 10 метров по оси струи (рис. 1).

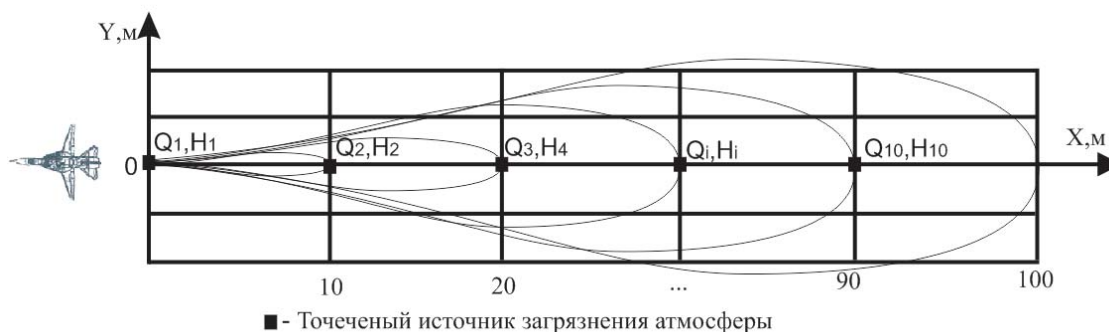


Рис. 1. Газодинамическое образование как совокупность точечных источников загрязнения атмосферы

Для определения условий выброса ЗВ каждым точечным источником определим дифференциальные характеристики факела авиационного двигателя. Так как время движения ГДО очень мало, то распространение ЗВ от авиационного двигателя может быть представлено как адиабатный процесс. При таком процессе объем ГДО i -го источника будет определяться следующим выражением:

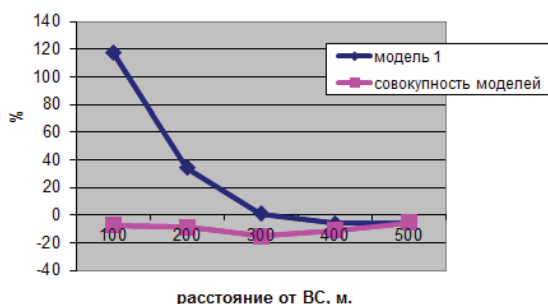
$$V_i = V_1^{0,4} \sqrt{T_1/T_i}, \quad (2)$$

где T_1 и V_1 – температура и объем ГДО первого источника, на срезе сопла авиационного двигателя; T_i – температура ГДО i -го источника.

$$c(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t) \exp \left\{ - \left[\frac{(x-x_i)^2}{2\sigma_{x0}^2 + 4K_x(t-t_i)} \right] - \left[\frac{y^2}{2\sigma_{y0}^2 + 4K_y(t-t_i)} \right] \right\}}{\sqrt{8\pi^3 [\sigma_{x0}^2 + 2K_x(t-t_i)] [\sigma_{y0}^2 + 2K_y(t-t_i)]}} \times \left\{ \exp \left\{ \frac{(z-H_i)^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4K_z(t-t_i)} \right\} + \exp \left\{ \frac{(z+H_i)^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4K_z(t-t_i)} \right\} \right\} \sqrt{\sigma_{z0}^2 + 2K_z(t-t_i)}, \quad (4)$$

Для оценки успешности предлагаемой совокупности моделей точечных источников, описывающих распределение концентрации оксида углерода (СО) на участке переноса облака ЗВ от авиационных двигателей, определены погрешности.

На рисунке 2 представлены относительные ошибки моделирования загрязнения атмосферы авиационными двигателями на участке 100-500 метров от источника моделью (1) и предложенной совокупностью моделей точечных источников (4). В качестве независимого материала при проведении оценки точности математических моделей использованы результаты экспериментальных исследований по определению уровня загрязнения атмосферы авиационными двигателями ВС на территории военного аэродрома г. Воронежа [4].



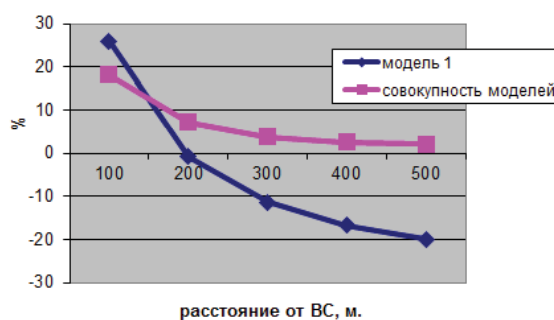
а) $u = 1$ м/с; $T_{атм} = 20^\circ\text{C}$; $K_{xy} = 0,6$; $K_z = 1,3$

Начальный подъем примеси i -го источника рассчитывается по формуле [6]:

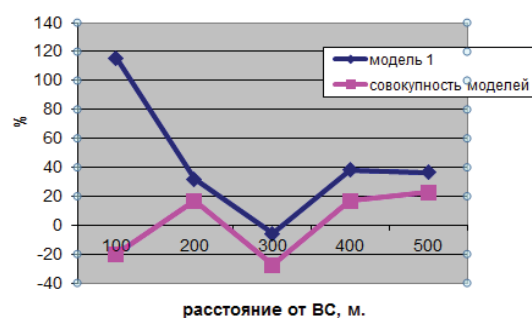
$$H_i = \frac{1,6gV_i\Delta T_i}{T_{атм}(v_i \pm u)^3}, \quad (3)$$

где v_i (м/с) – скорость ГДО i -го источника; u (м/с) – скорость ветра; $\Delta T_i = T_i - T_{атм}$.

С учетом сдвига источников по оси X значение уровня концентрации ЗВ на удалении, более 100 метров от авиационного двигателя будет определяться по принципу суперпозиции. Полученную модель в виде совокупности точечных источников можно представить в следующем виде:



б) $u = 2$ м/с; $T_{атм} = 20^\circ\text{C}$; $K_{xy} = 0,9$; $K_z = 1,5$



в) $u = 3$ м/с; $T_{атм} = 20^\circ\text{C}$; $K_{xy} = 1,5$; $K_z = 2$

Рис. 2. Относительные ошибки моделирования загрязнения ПСВ авиационными двигателями на участке 100-500 метров от источника при различных метеорологических условиях моделью 1 и предложенной совокупностью моделей точечных источников

Анализ графиков, представленных на рисунке 2, свидетельствует о том, что предложенная совокупность моделей точечных источников за счет учета пространственного распределения параметров ГДО реактивной струи авиационного двигателя позволила значительно повысить точность моделирования загрязнения ПСВ на удалении до 250 метров от ВС, где наблюдается максимальное загрязнение окружающей среды.

В случае несовпадения оси струи выхлопных газов авиационного двигателя с направлением ветра в атмосфере на нее действует переносная сила ветрового потока воздуха. Под действием ее перпендикулярной составляющей ось струи изгибается

в сторону от оси X. В результате этого максимальное расстояние, на которое струя может транспортировать примесь по оси X, зависит не только от параметров струи, но и от скорости ветра [1].

Для расширения границы применимости предложенной модели (4) при углах отклонения направления ветра от оси струи до $\psi \leq 90^\circ$ необходимо найти пространственное положение оси струи, решив систему дифференциальных уравнений с соответствующими начальными и граничными условиями. При этом значение осевой концентрации ЗВ на различной длине струи (L) может быть определено на основе выражения (4), модифицированном следующим образом:

$$c(L) = \sum_{i=1}^N \frac{Q_i(t) \exp\left\{-\left[\frac{(L-x_i)^2}{2\sigma_{x0}^2 + 4K_x(t-t_i)}\right]\right\}}{\sqrt{8\pi^3 [\sigma_{x0}^2 + 2K_x(t-t_i)] [\sigma_{y0}^2 + 2K_y(t-t_i)]}} \times \left\{ \exp\left\{\frac{(z-H_i)^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4K_z(t-t_i)}\right\} + \exp\left\{\frac{(z+H_i)^2}{2\sigma_{z0}^2 + 4K_z(t-t_i)}\right\} \right\} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sigma_{z0}^2 + 2K_z(t-t_i)}} \quad (5)$$

Концентрация примеси по сечению струи определяется по формуле [7]:

$$c(L, r) = c(L) \cdot \left(1 - \left(\frac{|r|}{0,25L}\right)^{1,5}\right)^{2R_r} \quad (6)$$

где $|r|$ – расстояние от оси факела; R_r – число Прандля.

Результаты моделирования загрязнения ПСВ авиационными двигателями ВС, при на-

личии перпендикулярной составляющей ветра, моделями (5, 6) представлены на рис. 3.

Из анализа рисунка 3 можно сделать вывод, что наибольшие ошибки при моделировании выражениями (5, 6) относительно результатов экспериментальных исследований наблюдаются на расстоянии до 80 метров по оси Y. При этом ошибки моделирования составляют не более 14% и являются допустимыми.

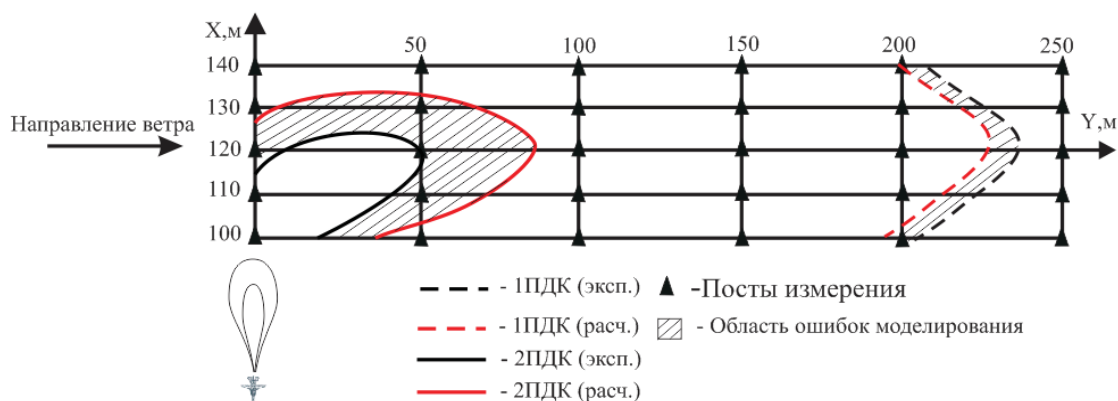


Рис. 3. Результаты моделирования загрязнения ПСВ ВС, при наличии перпендикулярной составляющей ветра, моделями (5, 6)

Таким образом, полученные совокупности математических моделей могут быть применены для определения уровня загрязнения атмосферы авиационными двигателями вблизи ВС, где наблюдаются наибольшее загрязнение атмосферы и работает обслуживающий авиационную технику летно-технический персонал. Они способны заменить проведение трудоемких и дорогостоящих экспериментальных исследований. Кроме того, расчет по полученным выражениям не требует решения сложных уравнений турбулентной диффузии и позволяет с высокой точностью определить уровень загрязнения ПСВ на протяжении всего исследуемого участка. Разработанная совокупность моделей образует методику позволяющую повысить точность оценки пространственного загрязнения атмосферы продуктами сгорания авиационного топлива.

Список литературы

1. Васильев В.П. Формирование источника загрязнения окружающей среды при выбросе примеси в атмосферу сверхзвуковой струей / В.П. Васильев, Е.С. Дмитриев // Сб. трудов ИПГ. – 1974. – № 29. – С. 67-73.
2. Карташев О.А. Анализ методик расчета выбросов загрязняющих веществ двигателями воздушных судов гражданской авиации / О.А. Картышев, В.В. Медведев // Научный вестник ГОСНИИ ГА. – 2011. – №1. – С. 102-108.
3. Кулаков С.Ю. К вопросу моделирования загрязнения атмосферного воздуха на территории военного объекта / С.Ю. Кулаков // Современные вопросы науки – XXI век: сборник научных статей по материалам VII Международной НПК. – Тамбов: Изд-во Тамбовского областного института ПКРО, 2011. – Вып. 7. – Ч.3. – С 81-83.
4. Кулаков С.Ю. Результаты экспериментальных исследований распространения загрязняющих веществ в атмос-

фере от двигателей воздушных судов / С.Ю. Кулаков // Естественные и технические науки. – М.: «Спутник +», – №61. – 2011. – С. 329-331.

5. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд. – Л.: Гидрометеоздат, 1985. – 272 с.

References

1. Vasiliev V.P. Formation source of environmental pollution due to the release contaminants into the atmosphere supersonic jet / V.P. Vasiliev, E.S. Dmitriev // Sat IPG works, 1974. – № 29. – P. 67-73.
2. Kartashov O.A. Analysis methods for calculating engine emissions civil aircraft / O.A. Kartashov, V.V. Medvedev // Scientific Bulletin of the Institute of Civil Aviation, 2011, № 1 – P. 102-108.
3. Kulakov S.Yu. On the issue of air pollution modeling at a military facility / Kulakov S.Yu. // Current Issues in Science – XXI Century: Collection of scientific articles based on the VII International CDD. – Tambov Univ Tambov Regional Institute ICDD, 2011. – Vol. 7. – P.3. – P. 81-83.
4. Kulakov S.Yu. Results of Experimental Research into Prevalence of Aircraft Engine Pollutants in Atmosphere / S.Yu. Kulakov // Natural and technical sciences. – M.: «Sputnik +», №61, 2011. – P. 329-331.
5. Berlyand M.E. Forecast and control of air pollution / M.E. Berlyand // Gidrometeoizdat, 1985. – P. 272.

Рецензенты:

Дорофеев В.В., д.г.н., профессор, профессор кафедры гидрометеорологического обеспечения ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж;
Козлов А.Т., д.б.н., профессор, заведующий кафедрой экологии и безопасности жизнедеятельности ВУНЦ ВВС «ВВА им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

Работа поступила в редакцию 29.07.2014.