

В.В. Татаринов, О.В. Базарский, Е.В. Шпилёва, А.А. Томилов

МОДЕЛЬ РАССЕЙЯНИЯ БЕНЗ(А)ПИРЕНА В АТМОСФЕРЕ И ОЦЕНКА СКОРОСТИ ЕГО СУХОГО И ВЛАЖНОГО ОСАЖДЕНИЯ

V.V. Tatarinov, O.V. Bazarский, E.V. Shpileva, A.A. Tomilov

THE MODEL OF BENZOPIRENE ATMOSPHERE DISPERSION AND THE EVALUATION OF ITS DRY AND WET PRECIPITATION SPEED

Рассмотрен механизм образования мелкодисперсных частиц бенз(а)пирена в отработавших газах авиационных и автомобильных двигателей, предложена модель их сухого осаждения в атмосфере. Экспериментально изучено загрязнение углеводородами и бенз(а)пиреном почв аэродрома за счет сухого осаждения, показано существенное увеличение концентрации бенз(а)пирена вблизи водоемов за счет мокрого осаждения его частиц.

Ключевые слова: отработавшие газы, бенз(а)пирен, авиационные двигатели, автомобильные двигатели, сухое осаждение, влажное осаждение.

The article presents a new mechanism of benzopirene micro dispersion particles formation in the exhausted gases of air-craft and automobile engines. The model of their dry atmospheric precipitation is offered. The benzopirene and hydrocarbon pollution of aerodrome soils caused by their dry precipitation is experimentally explored. The considerable increase of benzopirene concentration in the vicinity of water basins resulting from its wet precipitation is demonstrated.

Key words: exhausted gases, benzopirene, air-craft engines, automobile engines, dry precipitation, wet precipitation.

Введение

Бенз(а)пирен, образующийся при высокотемпературном пиролизе топлива, является сильнейшим канцерогеном и наиболее опасным поллютантом, содержащемся в отработавших газах. Процесс образования бенз(а)пирена в отработавших газах автомобильных и авиационных двигателей имеет свои особенности, зависящие от вида используемого топлива. Автомобильные и авиационные бензины дают незначительное количество бенз(а)пирена, и в дальнейшем исключаются из рассмотрения. В более тяжелых фракциях — дизельном топливе и авиационном керосине содержатся полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), которые за счет циклогидрогенизации при высоких температурах образуют бенз(а)пирен [4]. В дизтопливе содержание ароматических углеводородов больше, чем в авиационном керосине, но температура пиролиза в последнем более высокая. Поэтому бенз(а)пирен будет присутствовать в отработавших газах как дизельных автомобильных двигателей, так и реактивных авиационных двигателей.

При температуре большей 176°C бенз(а)пирен присутствует в отработавших газах в газообразной форме с молярной массой $\mu = 252$ г/моль и радиусом молекул порядка $2 \cdot 10^{-9}$ м. При температуре $t \leq 176^{\circ}\text{C}$ наблюдается сублимация бенз(а)пирена и его переход в твердое состояние с плотностью $\rho = 1375$ кг/м³ и радиусом частиц порядка 0,1 мкм. С водой частицы бенз(а)пирена образуют коллоидные растворы [4].

В молекулярно-дисперсном состоянии бенз(а)пирен может находиться кратковременно в ничтожно малых количествах. Твердые частицы выпадают из воздуха. Особенно интенсивно это выпадение наблюдается с осадками либо в районах с повышенной влажностью, где частицы бенз(а)пирена являются центрами конденсации водяного пара.

Таким образом, твердые частицы бенз(а)пирена образуются в факеле дизельных автомобильных и реактивных авиационных двигателей. Однако математической модели их рассеяния в атмосфере не существует, несмотря на чрезвычайно высокую экологическую опасность поллютанта. Разработка модели рассеяния частиц бенз(а)пирена в атмосфере и оценка метеорологических условий, способствующих их усиленному накоплению в почве, и являются целью данной работы.

Модель рассеяния частиц бенз(а)пирена в атмосфере

В факеле отработавших газов автомобильного или авиационного двигателя наблюдается кратковременное превышение температуры газов над температурой окружающей среды и турбулентные движения частиц. Эти процессы приводят к поднятию и стабилизации аэрозольного облака [3].

В основу математической модели положено уравнение движения аэрозольных частиц в вязкой воздушной среде. Обтекание частицы средой после стабилизации аэрозольного облака считается ламинарным. На падающую частицу действуют две противоположно направленные силы: сила тяжести mg ; сила вязкого трения Стокса $6\pi\eta Rv$, где η — коэффициент динамической вязкости воздуха; R — радиус частицы; v — скорость ее сухого движения. В первый момент времени частица будет падать с ускорением. При этом увеличивается скорость ее падения v и сила сопротивления Стокса. Когда сила Стокса уравновесит силу тяжести частица начнет падать равномерно.

Запишем второй закон Ньютона для падающей частицы:

$$ma = mg - 6\pi\eta Rv, \quad (1)$$

где a — ускорение частицы.

Считая частицу сферической, ее массу можно записать:

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi R^3, \quad (2)$$

где ρ — плотность частицы.

Подставив (2) в (1) получаем дифференциальное уравнение движения частицы в вязкой среде:

$$\frac{dv}{dt} + bv = g, \quad (3)$$

где $b = 9\eta/2\rho R^2$ (1/с) — характеристический параметр движения частицы.

Решение уравнения (3) по схеме Бернулли имеет следующий вид:

$$v = \frac{g}{b}(1 - e^{-bt}) = v_0(1 - e^{-bt}), \quad (4)$$

где $v_0 = g/b$ — скорость равномерного движения частицы.

Характеристический параметр определяет время $\tau = 1/b$, за которое частица достигает скорости движения равной $0,63 v_0$.

Ускорение частицы получаем путем дифференцирования уравнения (4):

$$a = \frac{dv}{dt} = ge^{-bt}. \quad (5)$$

Тогда за время $t = 1/b$ ускорение частицы уменьшается до величины $g/e = 3,6$ м/с².

За время, равное $3/b$ ускорение частицы уменьшается в 20 раз до $0,49$ м/с². По истечению времени $t_0 = 3\tau$ можно считать, что частица падает равномерно со скоростью $v_0 = g/b$.

Расстояние, проходимое частицей за время падения, получаем путем интегрирования уравнения (4):

$$H = \frac{g}{b} \left(t + \frac{e^{-bt}}{b} \right), \quad (6)$$

где $H_0 = v_0 t$ — расстояние пройденное за счет равномерного падения; $H_a = v_0 e^{-bt}/b$ — расстояние пройденное за счет ускоренного падения.

Проанализируем полученное решение. Для нормальных условий $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с. Приняв $\rho = 1375$ кг/м³ и $R = 10^{-7}$ м, получаем характеристический параметр $b = 6 \cdot 10^6$ 1/с. В этом случае время достижения скорости равномерного падения $t_p = 4,8 \cdot 10^{-6}$ с и $H_a \rightarrow 0$, т.е. твердые частицы бенз(а)пирена с момента образования падают практически равномерно.

Высота облака загрязняющих веществ определяется турбулентностью факела и температурой отработавших газов. Экспериментальные измерения показали, что для реактивного двигателя значительная турбулентность атмосферы наблюдается до высот $H_0 \approx 10$ м, для дизельного — порядка $1,5$ м [2]. Скорость сухого осаждения частиц бенз(а)пирена $v_0 \approx 10^{-5}$ м/с. Тогда время t_0 выпадения частиц из аэрозольного облака реактивного двигателя порядка 300 ч, а для автомобильного порядка 43 ч. Т.е. время жизни бенз(а)пирена в атмосфере достаточно большое, а за счет ветрового переноса его миграция от источника может быть очень значительной, ограниченной местными метеоусловиями.

Влияние метеоусловий на рассеяние и осаждение частиц бенз(а)пирена

На аэродроме основным источником бенз(а)пирена является площадка технической подготовки полетов. Здесь происходит заправка самолетов, предполетная подготовка и проверка работы двигателей у газоотбойников. В плановом режиме работают двигатели двух самолетов. Измерения, проведенные на площадке подготовки полетов, показали превышение предельно-допустимой концентрации (ПДК) оксида углерода в шесть раз. Этот факт свидетельствует о неполном сгорании топлива в форсажном режиме работы двигателей. Эти условия благоприятны и для образования бенз(а)пирена. Почвы вокруг площадки являются депонирующей средой, которые могут накапливать углеводороды и бенз(а)пирен при многолетней эксплуатации аэродрома.

Измерения загрязнения почвы, проводимые вблизи площадки на расстоянии 20 м от ее края, показали превышение концентрации нефтепродуктов над фоновыми значениями в пять с половиной раз. Следов бенз(а)пирена обнаружено не было. Этот факт объясняется длительным временем жизни мелкодисперсных частиц бенз(а)пирена в атмосфере и его ветровым рассеянием на значительной территории.

В районе аэродрома повторяемость преобладающего направления ветра сильно меняется от месяца к месяцу и от сезона к сезону. Также изменчива повторяемость штилей, максимум которых — в июле (22,1 %), минимум в — декабре (5,8 %) [1].

Максимальные скорости ветра (20 м/с), в основном, наблюдаются в теплый период года южного и северо-западного направлений 1–2 раза в течение 5 лет (в июле, сентябре). Такие сильные ветры, как правило, наблюдаются при прохождении холодных фронтов в сопровождении кучево-дождевой облачности с грозами. Следует отметить, что еще реже, примерно 1 раз в 10 лет, может наблюдаться ветер со скоростью 30 м/с и более.

Преобладающее направление ветра в течение года весьма неустойчиво: если в январе преобладают южные и юго-западные ветры, то в феврале — восточного направления, уже в марте-апреле — юго-восточные ветры, в мае — южные, июне-июле — северо-западные, в августе — северные ветры с восточной и западной составляющими, сентябре-октябре — от юго-западного до северо-западного, в ноябре — южные с восточной и западной составляющими, в декабре — южные, юго-западные и северо-западные ветры [1].

Поскольку почва является депонирующей средой, то на ее загрязнение оказывает влияние многолетняя повторяемость направлений и скоростей ветра. По результатам пятилетних наблюдений при общем количестве выборки 38853 случая получено, что по 12 румбам минимальная и максимальная повторяемость направлений ветра различаются незначительно.

Основной вклад вносит скорость ветра, повторяемость которой для аэродрома «Воронеж-Б» приведена в табл. 1.

Таблица 1

U , м/с	0	1–2	3–5	6–7	8–10	> 10
P	0,135	0,144	0,482	0,159	0,067	0,013

Средняя многолетняя скорость ветра: $\langle U \rangle = \sum U_i P_i = 3,78$ м/с.

На площадке подготовки полетов сухое осаждение частиц бенз(а)пирена наблюдается при штиле и слабом переменном ветре. Годовая повторяемость этих явлений не велика $P = 0,135$, поэтому концентрация бенз(а)пирена вблизи площадки подготовки полетов незначительна. Основная масса бенз(а)пирена рассеивается в атмосфере за счет ветрового переноса. Приняв среднемноголетнюю скорость ветра по румбам равную $\langle U \rangle = 3,78$ м/с, можно оценить дальность миграции частиц бенз(а)пирена $r = \langle U \rangle t_0$, где t_0 — время сухого осаждения частиц. Площадь рассеяния $S = \pi r^2$ очень велика. Поэтому сухое осаждение частиц бенз(а)пирена не является экологически опасным.

Скорость осаждения бенз(а)пирена существенно увеличивается при повышенной влажности воздуха вблизи водоемов, когда частицы бенз(а)пирена становятся центрами конденсации водяного пара.

Для проверки этой гипотезы были изучены пробы почвы на бенз(а)пирен у пруда в парке «Динамо», над которым на высоте 10 м проходит автомобильная развязка с интенсивным движением. Расстояние от развязки до пруда 760 м. Пробы почвы взяты в четырех точках по лучу «развязка—пруд». Содержание бенз(а)пирена в пробах приведено в табл. 2.

Таблица 2

Содержание бенз(а)пирена в пробах

№ пробы	Содержание, мг/кг	Категория загрязнений (СанПиН 2.1.7.1287-03)
1	0,01	норма
2	0,05	опасная
3	0,14	чрезвычайно опасная
4	0,21	чрезвычайно опасная
ПДК	0,02	-

Точка 1 находилась непосредственно у развязки. Точка 2, ближайшая от развязки, находилась на расстоянии 100 м от пруда и 560 м от развязки. Непосредственно у пруда находилась точка 3. За прудом, на луче, на расстоянии 1060 м находилась точка 4. Видно, что сухое осаждение частиц бенз(а)пирена вблизи развязки незначительное. В точке 2 концентрация бенз(а)пирена в почве увеличивается до уровня 2,5 ПДК, что можно объяснить увеличением влажности воздуха за счет пруда. В точке 3 непосредственно у пруда концентрация продолжает увеличиваться до уровня семи ПДК. Десятикратное превышение ПДК наблюдается в точке 4, где в максимальной степени сказывается влияние пруда после прохождения над ним частиц бенз(а)пирена и наблюдается влажное осаждение частиц. На расстоянии 2,5 км по лучу бенз(а)пирен в почве не обнаруживался, т.е. все образовавшиеся капельки воды с частицами бенз(а)пирена были вымыты ранее.

Выводы

1. Время сухого осаждения частиц бенз(а)пирена порядка 30 ч на метр высоты стационарного аэрозольного облака. Радиус их рассеяния достаточно велик и сухое

осаждение от авиационных и автомобильных двигателей не представляет существенной экологической опасности для атмосферы и почвы.

2. В условиях повышенной влажности скорость осаждения частиц бенз(а)пирена существенно возрастает. Такие условия наблюдаются вблизи водоемов: рек, прудов и водохранилищ. Особая опасность заключена в том, что эти зоны являются рекреационными. Концентрация бенз(а)пирена в этих зонах может значительно превышать ПДК и он может попадать в организм человека как непосредственно через органы дыхания при пылеобразовании, так и опосредовано через трофические цепи.
3. Высокая скорость влажного осаждения бенз(а)пирена позволяет использовать этот факт для защиты окружающей среды от сосредоточенных источников бенз(а)пирена на площадках подготовки полетов, где одновременно работают авиационные и дизельные автомобильные двигатели.

Литература

1. Авиационно-климатическое описание аэродрома «Воронеж-Б», вып. 2. — Воронеж, 2010. *Aviatsionno-klimaticheskoe opisanie aerodroma «Voronezh-B», vyp. 2. — Voronezh, 2010.*
2. Родюков И.С. Геологическая оценка приземного слоя атмосферы на территории аэродромного комплекса. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геогр. наук. — Воронеж: ВВВАИУ, 2005. — 28 с. *Rodyukov I.S. Geologicheskaya otsenka prizemnogo sloya atmosfery na territorii aerodromnogo kompleksa. Avtoref. dis. na soisk. uchen. stepeni kand. geogr. nauk. — Voronezh: VVVAIU, 2005. — 28 s.*
3. Мазуров Г.И., Акселевич В.И. Воздушные вихри и завихрения в природе, быту и технике. // Метеоспектр, 2010, № 3, с. 164–170. *Mazurov G.I., Akselevich V.I. Vozdushnye vikhri i zavikhreniya v prirode, bytu i tekhnike. // Meteospekt, 2010, № 3, s. 164–170.*
4. Химическая энциклопедия. В 5-и тт., т. 1. / Гл. ред. Кнунянц И.Л. — М.: Советская энциклопедия, 1988. — 623 с. *Khimicheskaya entsiklopediya. V 5-i tt., t. 1. / Gl. red. Knunyants I.L. — M.: Sovetskaya entsiklopediya, 1988. — 623 s.*