

УДК 504.3.054

О. В. Базарский, Ж. Ю. Кочетова

Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнения грунтов приаэродромной территории

Загрязнение грунтов приаэродромных территорий обусловлено образованием и рассеиванием капель керосина при его неполном сгорании в форсажном режиме работы двигателя самолета. При постоянном воздействии на объекты окружающей среды даже небольших количеств несгоревшего топлива в течение десятилетий эксплуатации аэродромов (прежде всего военных) вклад этой составляющей в загрязнение грунтов становится не менее значимым, чем при аварийных сбросах. Описание каплеобразования керосина основано на том факте, что отработавшие газы авиационных двигателей и дренажных систем не могут конденсироваться, так как находятся при температурах выше критической температуры для керосина. В процессе конденсации они должны перейти в парообразное состояние. Охлаждение отработавших газов и конденсация паров керосина происходит в спутном следе самолета с высоким уровнем турбулентности потоков воздуха. В результате формируются газодинамические образования, имеющие различные массы, которые при достижении температуры конденсации превращаются в капли жидкого керосина. С учетом множества случайных процессов, возникающих при турбулентном охлаждении керосина, распределение капель по размерам является нормальным. Построенная математическая модель загрязнения грунтов территорий керосином между ближайшими приводными радиомаяками аэродрома показывает, что экологически опасное загрязнение наблюдается на расстоянии до 100 м от края взлетно-посадочной полосы. В ходе исследования грунтов приаэродромной территории аэродрома "Балтимор" (г. Воронеж) определено, что ближайший жилой район расположен на расстоянии 1,8 км от взлетно-посадочной полосы, где уровень загрязнения грунтов керосином определяется ниже его ПДК. В южном направлении от аэродрома на расстоянии 300–1500 м находится дачный поселок с преобладающим типом почвогрунтов – черноземом, в котором происходит накопление керосина; его ПДК в этом районе превышено в 4–12 раз. Получено достаточно полное совпадение расчетных и экспериментальных данных ($R = 0,81$), несмотря на то что в теоретических расчетах не были учтены изменения высоты полетов самолетов.

Ключевые слова: математическая модель, испарение капель, керосин, приаэродромная территория, загрязнение грунтов

Информация о статье: поступила в редакцию 09.02.2018; получена после доработки 18.10.2018

Введение

В связи с интенсификацией деятельности ракетодомов, военных и гражданских аэродромов возникает проблема оценки экологических рисков на приаэродромных территориях и необходимости их расчетного прогнозирования. Особую остроту проблеме добавляет тот факт, что в зону, прилегающую к районам распыления топлива, попадают сельскохозяйственные угодья, населенные пункты, рекреационные зоны. Приоритетным загрязнителем приаэродромных территорий и стартовых площадок ракет являются самолетные и ракетные керосины, относящиеся к 3-му классу опасности [1]. При их выбросах в атмосферу, помимо дробления и испарения капель, протекают такие сложные взаимосвязанные процессы, как химические превращения, диффузия, коагуляция и др. Токсичные компоненты рассеиваются в пространстве и в конечном итоге оседают на поверхность земли, проникают в низшие слои горизонтов, накапливаются на естественных геохимических барьерах грунтов.

Процессы падения капель топлива с больших высот при отделении частей ракет-носителей и при аварийном сбросе топлива в случае нештатной ситуации на борту самолета исследуются во многих работах [2–4]. Авторы при расчете гравитационного осаждения капель топлива используют зависимость для стационарной скорости их падения, полученной введением поправочного множителя в закон Стокса при пренебрежении архимедовой силой. Интересны работы [5; 6], в которых рассматривается падение не отдельных капель топлива, а их "ансамблей", при этом предполагается, что топливо из баков вытекает как дискретно (точечный сброс), так и непрерывно.

Однако остается мало изученным вопрос прогнозного моделирования загрязнения грунтов приаэродромной территории в результате рассеивания капель авиационного керосина при его неполном сгорании в форсажном режиме работы двигателя самолета. В процессе постоянного воздействия в течение десятилетий эксплуатации аэродромов (особенно военных) на объекты окружающей среды даже небольших количеств несгоревшего топлива вклад этой составляющей в загрязнения грунтов становится не менее значимым, чем при аварийных сбросах.

Материалы и методы

В ходе исследования применялись методы математического моделирования процессов образования и рассеяния капель керосина в атмосфере и загрязнения грунтов приаэродромных территорий с учетом фазового перехода газообразной керосиновой фракции при температуре ниже критической, определяющей дисперсность капель керосина, а также их пространственное рассеяние в результате упругих столкновений под действием ветра.

При апробации модели было исследовано загрязнение грунтов военного аэродрома и прилегающих к нему территорий с применением арбитражного гравиметрического метода, а также с помощью разработанного ранее датчика концентрации паров авиационного керосина, прошедшего апробацию в сертифицированной лаборатории [7].

Результаты и обсуждение

Прогностическая модель загрязнения приаэродромных территорий

Описание каплеобразования керосина при взлете самолета в форсажном режиме и посадке на малом газу основано на том факте, что отработавшие газы авиационных двигателей и дренажных систем имеют температуры $T \approx 800$ К и не могут конденсироваться, так как находятся при температурах выше критической температуры керосина $T_{кр} \approx 660$ К. В процессе конденсации они должны перейти в парообразное состояние при $T < T_{кр}$, а конденсация начинается при температуре $T_k \approx 550$ К. В работе [8] приведены температуры $T_{кр}$ и T_k для различных марок керосина. В наших расчетах используются усредненные значения, присущие различным маркам керосина, так как для описания процессов осаждения и накопления керосина в грунтах имеющиеся различия не существенны.

Охлаждение отработавших газов и конденсация паров керосина происходит в спутном следе самолета с высоким уровнем турбулентности потоков воздуха. В результате формируются газодинамические образования, имеющие различные массы, которые при достижении температуры конденсации превращаются в капли жидкого керосина.

Тепловая энергия Q_1 , выделяющаяся в процессе конденсации газодинамического образования с массой m_i , сообщает поверхностную энергию Q_2 капле керосина, стягивающей его в сферу радиусом R_i . Таким образом, $Q_1 = Q_2$. Тепловая энергия $Q_1 = m_i \lambda$, где m_i – все возможные массы газодинамических образований, кг, случайно сформировавшиеся в турбулентном спутном следе; $\lambda = 210$ кДж/кг – удельная теплота парообразования (конденсации) керосина; $Q_2 = \sigma s_i = 4\pi R_i^2 \sigma$, где $\sigma = 2,0 \cdot 10^{-3}$ Дж/м² – коэффициент поверхностного натяжения керосина; s_i – площадь поверхности i -го образования, м².

Приравняв эти выражения, можно получить радиус, м, капли керосина

$$R_i = (m_i \lambda / (4\pi \sigma))^{1/2}. \quad (1)$$

Каплеобразование прекращается, если сила тяжести, действующая на каплю, превосходит силу поверхностного натяжения, т. е. максимальный радиус капли керосина определяется условием $mg = 2\sigma\pi R_{\max}$:

$$\begin{aligned} 4/3\rho_k \pi R_{\max}^3 g &= 2\sigma\pi R_{\max}, \\ R_{\max} &= (3\sigma / (2\rho_k g))^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\rho_k = 630$ кг/м³ – плотность керосина при температуре, близкой к температуре конденсации.

Подставляя параметры каплеобразования в полученное выражение, можно найти максимально возможный радиус капли $R_{\max} = 700 \cdot 10^{-6}$ м = 700 мкм.

Минимальный радиус капли оценивается с использованием уравнения Смолуховского по методике, представленной в работе [9]. Молярная масса керосина $M_r = 155 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, тогда средняя масса одной молекулы $m_1 = M_r / N_A = 2,6 \cdot 10^{-25}$ кг, где N_A – число Авогадро. В турбулентных потоках коагуляция наблюдается при взаимодействии $\sim 10^9$ молекул капли, т. е. минимальная масса $m_{\min} = 2,6 \cdot 10^{-16}$ кг. Тогда минимальный радиус капли керосина $R_{\min} \approx 50 \cdot 10^{-6}$ м = 50 мкм в соответствии с выражением (1).

С учетом множества случайных процессов, возникающих при турбулентном охлаждении керосина, распределение капель по размерам можно считать нормальным и представить в виде диаграммы (рис. 1), где по оси абсцисс отложены средние радиусы капель градации R_i , а P_i – вероятность реализации каждой градации.

Скорость ускоренного осаждения частиц $v(t)$ для полученных значений радиусов капель керосина определяется по следующему выражению [10]:

$$v(t) = \frac{g(1 - e^{-bt})}{b}, \quad (3)$$

где $b = 9\eta / (2\rho_0 R_i^2)$ – параметр осаждения, c^{-1} ; $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости воздуха; $\rho_0 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³ – плотность охлажденной капли керосина; R_i – радиусы частиц керосина; $g = 9,8$ м/с² – ускорение силы тяжести.

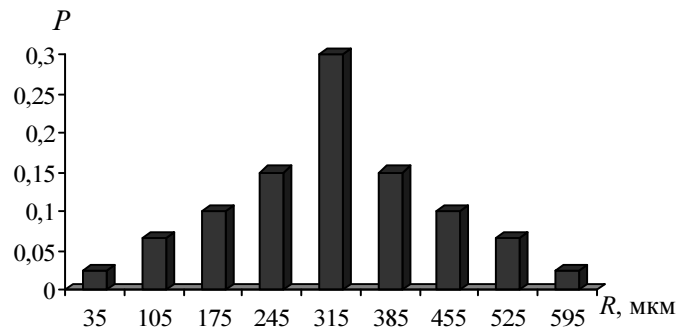


Рис. 1. Нормальное распределение капель керосина по радиусам
Fig. 1. The normal distribution of the kerosene drops by radii

Максимальные значения скоростей ограничены скоростями равномерного осаждения v_0 , когда сила тяжести уравновешивается силой сопротивления Стокса. Тогда $v_0 = g/b$. Значения v_0 указаны в таблице.

Таблица. Зависимость скорости равномерного осаждения капель керосина v_0 , времени осаждения t_R , скорости горизонтального разлета v_R , максимальной дальности разлета S_R и распределения масс выброшенного керосина по градам m_i от радиуса его капель R
Table. Dependence of the rate of uniform deposition of kerosene droplets v_0 , deposition time t_R , the rate of horizontal expansion v_R , the maximum range of expansion S_R and the distribution of the released kerosene mass in the ranks m_i on the radius of its droplets R

R , мкм	35	105	175	245	315	385	455	525	595
b , c^{-1}	90,0	10,6	3,60	1,83	1,11	0,743	0,532	0,400	0,311
v_0 , м/с	0,11	0,98	2,72	5,33	8,82	13,1	18,4	24,5	31,5
t_R , с	900	105	36	19	12	9	8	7	6
v_R , м/с	2,57	0,86	0,51	0,37	0,29	0,23	0,20	0,17	0,15
S_R , м	2313	90	18	7,0	3,5	2,1	1,6	1,2	0,9
m_i , кг	0,03	0,07	0,1	0,15	0,3	0,15	0,1	0,07	0,03

Ускорение частиц керосина рассчитывается по формуле

$$a = dv/dt = ge^{-bt}. \tag{4}$$

Минимальное значение ускорения падения частиц a_{\min} принимается равным $0,1$ м/с². В этом случае $v = 0,99v_0$, т. е. частица падает практически равномерно при $bt \geq 4,6$. Зависимость времени ускоренного осаждения частиц от радиуса капель керосина представлена на рис. 2. Капли с минимальным радиусом падают практически равномерно, а с максимальным – весь путь до поверхности земли проходят с ускорением.

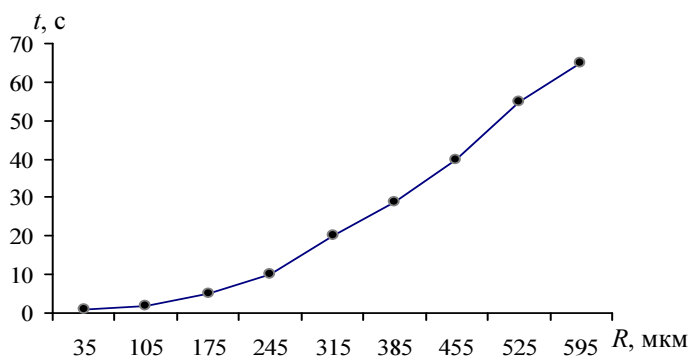


Рис. 2. Зависимость времени ускоренного осаждения частиц от радиуса капель керосина
Fig. 2. Dependence of the time of accelerated deposition of particles on the kerosene droplets' radius

Путь $H(t)$, проходимый частицей, можно рассчитать с учетом времени падения каплей керосина с различными радиусами посредством интегрирования выражения (3):

$$H = \frac{g}{b} \left[t + \frac{1}{b} e^{-bt} - \frac{1}{b} \right]. \quad (5)$$

Район между двумя близкими приводными радиомаяками аэродрома является приаэродромной территорией. Высоту самолета¹ над близкими приводными радиомаяками следует принять равной 100 м [11], поэтому $H_{\max} = 100$ м.

Время t_R осаждения каплей керосина с различными радиусами с высоты 100 м устанавливается по выражению (5). Значения t_R , определяющие наибольшую возможную дальность разлета каплей керосина, указаны в таблице, приведенной выше.

Скорость горизонтального разлета частиц керосина v_R за время осаждения t можно найти по известному выражению [10]:

$$v_R = \frac{v_{\perp}^2}{v_{\perp} + \frac{6\eta}{\rho_b R}} \left(1 - e^{-\frac{1,5}{\rho_b R} \frac{\rho_b v_{\perp}}{2} + \frac{3\eta}{R} t_R} \right), \quad (6)$$

где $v_{\perp} = 4$ м/с – среднегодовая скорость ветра, перпендикулярного взлетно-посадочной полосе на высоте 100 м [11]; $\rho_b = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных условиях; $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с – коэффициент динамической вязкости воздуха; t_R – время осаждения частиц керосина радиусом R_i с высоты H_{\max} .

Дальность разлета каплей керосина радиусом R_i перпендикулярно взлетно-посадочной полосе рассчитывается по формуле $S_R = v_R t_R$. Результаты расчетов приведены в таблице, приведенной выше.

Из таблицы следует, что крупнодисперсные капли керосина осаждаются вблизи границы взлетно-посадочной полосы на расстоянии до 3,5 м от ее края; среднедисперсные капли разлетаются на расстояние до 90 м; мелкодисперсные – на большие расстояния до 2,3 км.

Масса керосина, выброшенная с самолета на приаэродромную территорию, в i -й градации равна $m_i = P_i M$, где M – общая масса керосина, выброшенная на приаэродромную территорию; P_i – вероятность реализации i -й градации.

Верификация прогностической модели в ходе экспериментального исследования загрязнения грунтов аэродрома "Балтимор"

Для верификации разработанной модели было рассмотрено влияние выбросов самолетов Су-27 на загрязнение грунтов приаэродромной территории аэродрома "Балтимор", расположенного на окраине Воронежа [7; 12]. Ближайшая точка полевых наблюдений располагалась на расстоянии 100 м от края взлетно-посадочной полосы, далее пробы отобраны с шагом 300 м (рис. 3).

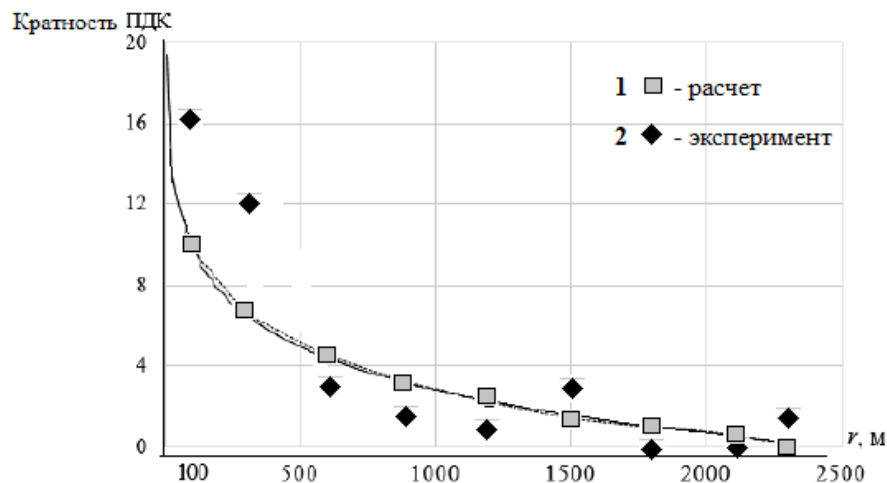


Рис. 3. Расчетное (1) и экспериментально установленное (2) содержание керосина в грунте в зависимости от расстояния от взлетно-посадочной полосы

Fig. 3. Calculated (1) and experimentally determined (2) kerosene content in soil depending on the distance from the runway

¹Авиационные правила АП-34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. М., 2003. 99 с.

Согласно нормативным документам² суммарные выбросы несгоревших углеводородов от двух двигателей в форсажном режиме при взлете самолета и его посадке на малом газу составляют $M \approx 1$ кг. Оценочное распределение выбросов керосина по градациям приведено в таблице, представленной выше.

Общая масса выброшенного керосина в каждой градации определена по формуле $m_{\Sigma i} = m_i T N$, где N – среднее число самолетовылетов в год; T – время эксплуатации аэродрома, годы. Так как высота самолета над аэродромом непрерывно изменяется, то целесообразно оценить загрязнения грунтов приаэродромных территорий керосином для трех групп частиц (мелко-, средне- и крупнодисперсных).

Для мелкодисперсных частиц площадь загрязнения равняется $S_1 L$, где $S_1 = 2313 - 90 = 2223$ м – дальность осаждения мелкодисперсных частиц от края полосы; $L = 2$ км – длина приаэродромной территории между ближними приводными радиомаяками вдоль полосы. Эта площадь составляет $4446 \cdot 10^3$ м². Для $N = 3000$ и $T = 50$ лет масса выброшенных мелкодисперсных частиц составляет $15 \cdot 10^3$ кг. Масса поверхностного слоя грунта толщиной 0,2 м и плотностью 1200 кг/м³ (чернозем) составляет $1067 \cdot 10^6$ кг. Тогда средняя концентрация керосина в грунтах, обусловленная разлетом мелкодисперсных частиц, составляет 13,8 мг/кг, что существенно ниже предельно допустимой концентрации керосина (ПДК = 100 мг/кг) для земель, используемых для нужд промышленности, транспорта, связи, обороны [1].

Для среднелдисперсных частиц $S_2 L = (90 - 7) \cdot 2000 = 166 \cdot 10^3$ м², а масса загрязненного грунта – $39840 \cdot 10^3$ кг. При тех же условиях средняя концентрация среднелдисперсных частиц составляет ~960 мг/кг, что соответствует 9,6 ПДК.

Для крупнодисперсных частиц $S_3 L = 3,5 \cdot 2000 = 7 \cdot 10^3$ м²; масса загрязненного грунта равна $1680 \cdot 10^3$ кг. Тогда концентрация крупнодисперсных частиц в грунте вблизи взлетно-посадочной полосы составляет 58032 мг/кг, что существенно превышает ПДК. Такое содержание керосина в грунтах в непосредственной близости к взлетно-посадочной полосе соответствует максимально загрязненному уровню и свидетельствует о кольматации грунта и накоплении нефтеуглеводородов на естественных геофизических барьерах. При этом саморегенерация грунтов считается невозможной, т. е. требуются специальные сложные и дорогостоящие мероприятия по их очистке.

Заключение

Разработанная прогностическая модель загрязнения грунтов приаэродромных территорий керосином показывает, что экологически опасное загрязнение наблюдается на расстоянии до 100 м от края взлетно-посадочной полосы. Ближайший жилой район должен находиться на расстоянии 1,8 км от взлетно-посадочной полосы, где уровень загрязнения грунтов керосином определяется ниже его ПДК.

Для верификации разработанной модели были проведены полевые исследования приаэродромной территории аэродрома "Балтимор". В южном направлении от аэродрома на расстоянии 300–1500 м расположен дачный поселок с преобладающим типом почвогрунтов – черноземом, в котором происходит накопление керосина (ПДК превышено в 4–12 раз). Получено достаточно полное совпадение расчетных и экспериментальных данных ($R^2 = 0,81$) даже без учета в теоретических расчетах изменения высоты полетов самолетов.

Библиографический список

1. Кочетова Ж. Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды : монография. Воронеж : ВУНЦ ВВС "ВВА", 2016. 204 с.
2. Мороков Ю. Н., Климова Е. Г., Ривин Г. С., Бородулин А. И., Десятков Б. М. [и др.]. Моделирование загрязнения поверхности земли ракетным топливом // Оптика атмосферы и океана. 2004. Т. 17, № 9. С. 769–773.
3. Климова Е. Г., Мороков Ю. Н., Ривин Г. С., Бородулин А. И., Десятков Б. М. [и др.]. Математическая оценка зон загрязнения поверхности земли ракетным топливом при падении отделяющихся частей ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2005. Т. 18, № 5–6. С. 525–529.
4. Прохоров А. В., Янов А. Ю. Модель негативного экологического влияния летательных аппаратов на селитебную зону в районе расположения аэропортов // Universum: Технические науки : электрон. научн. журн. 2014. № 7 (8). URL: <http://7universum.com/en/tech/archive/item/1465>.
5. Александров Э. Л. Поведение жидких ракетных топлив в атмосфере // Экологические проблемы и риски воздействий ракетно-космической техники на окружающую среду : справочное пособие / под общ. ред. В. В. Адушкина [и др.]. М. : АНКИЛ, 2000. 638 с.
6. Садовский А. П., Рапута В. Ф., Олькин С. Е., Зыков С. В., Резникова И. К. К вопросу об аэрозолировании гептила в районах падения отделяемых частей ракет-носителей // Оптика атмосферы и океана. 2000. Т. 13, № 6–7. С. 672–677.

²Авиационные правила АП-34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. М., 2003. 99 с.

7. Кочетова Ж. Ю., Кучменко Т. А., Базарский О. В. Экспресс-оценка загрязнения грунтов керосином по сигналам пьезосенсора на основе многослойных углеродных нанотрубок // Вестник Московского университета. Сер. 2. Химия. 2017. Т. 58, № 1. С. 28–35.

8. Дубовкин Н. Ф., Маланичева В. Г., Массур Ю. П., Федоров Е. П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. М. : Химия, 1985. 240 с.

9. Свириденков А. А., Третьяков В. В. Влияние коагуляции капель на характеристики факела распыливания за форсунками // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3–2 (19). С. 157–161.

10. Базарский О. В., Косинова И. И., Фонова С. И. Математическая модель загрязнения приповерхностных отложений аэрозольными частицами // Инженерные изыскания. 2015. № 5–6. С. 76–79.

11. Спиридонов Е. Г. Проблемы загрязнения приземного слоя атмосферы в зоне обслуживания воздушных судов : монография. Воронеж : ВВАИИ, 2004. 191 с.

12. Маслова Н. В., Кочетова Ж. Ю., Данилов А. Н., Кучменко Т. А. Экологический мониторинг нефтепродуктов на территории химически опасного объекта с применением флэш-детектора // Медицина экстремальных ситуаций. 2017. № 2. С. 83–88.

References

1. Kochetova Zh. Yu. Ekomonitring nefiti i nefteproduktov v ob'yektakh okruzhayushchey sredy [Environmental monitoring of oil and petroleum products in the environment] : monografiya. Voronezh : VUNTS VVS "VVA", 2016. 204 p.

2. Morokov Yu. N., Klimova Ye. G., Rivin G. S., Borodulin A. I., Desyatkov B. M. [i dr.]. Modelirovaniye zagryazneniya poverkhnosti zemli raketnym toplivom [Modeling of surface contamination of the earth with rocket fuel] // Optika atmosfery i okeana. 2004. V. 17, N 9. P. 769–773.

3. Klimova Ye. G., Morokov Yu. N., Rivin G. S., Borodulin A. I., Desyatkov B. M. [i dr.]. Matematicheskaya otsenka zon zagryazneniya poverkhnosti zemli raketnym toplivom pri padenii otdelyayushchikhsya chastey raket-nositeley [Mathematical estimation of zones of earth surface pollution by rocket fuel at falling of separating parts of launch vehicles] // Optika atmosfery i okeana. 2005. V. 18, N 5–6. P. 525–529.

4. Prokhorov A. V., Yanov A. Yu. Model' negativnogo ekologicheskogo vliyaniya letatel'nykh apparatov na selitebnuyu zonu v rayone raspolozheniya aeroportov [Model of negative ecological influence of aircrafts on residential zone in the area of airports location] // Universum: Tekhnicheskkiye nauki : elektron. nauchn. zhurn. 2014. N 7 (8). URL: <http://7universum.com/en/tech/archive/item/1465>.

5. Aleksandrov E. L. Povedeniye zhidkikh raketnykh topliv v atmosfere // Ekologicheskkiye problemy i riski vozdeystviy raketno-kosmicheskoy tekhniki na okruzhayushchuyu sredu [Environmental problems and risks of rocket and space technology impacts on the environment] : spravochnoye posobiye / pod obshch. red. V. V. Adushkina [i dr.]. M. : ANKIL, 2000. 638 p.

6. Sadovskiy A. P., Raputa V. F., Ol'kin S. Ye., Zykov S. V., Reznikova I. K. K voprosu ob aerizirovaniy geptila v rayonakh padeniya otdelyayemykh chastey raket-nositeley [On the issue of the aerosolization of heptyl in the areas of attack of separated parts of launch vehicles] // Optika atmosfery i okeana. 2000. V. 13, N 6–7. P. 672–677.

7. Kochetova Zh. Yu., Kuchmenko T. A., Bazarskiy O. V. Ekspress-otsenka zagryazneniya gruntov kerosinom po signalam p'yezosensora na osnove mnogoslonykh uglerodnykh nanotrubok [Rapid assessment of pollution of soils with kerosene signals piezosensor based on multi-walled carbon nanotubes] // Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 2. Khimiya. 2017. V. 58, N 1. P. 28–35.

8. Dubovkin N. F., Malanicheva V. G., Massur Yu. P., Fedorov Ye. P. Fiziko-khimicheskkiye i ekspluatatsionnyye svoystva reaktivnykh topliv [Reference data on chemical composition, thermal stability indicators, anti-wear and performance characteristics of jet fuels]. M. : Khimiya, 1985. 240 p.

9. Sviridenkov A. A., Tret'yakov V. V. Vliyaniye koagulyatsii kapel' na kharakteristiki fakela raspylivaniya za forsunkami [The effect of coagulation of drops on the characteristics of the torch atomization for injectors] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta. 2009. N 3–2 (19). P. 157–161.

10. Bazarskiy O. V., Kosinova I. I., Fonova S. I. Matematicheskaya model' zagryazneniya pripoverkhnostnykh otlozheniy aerizol'nymi chastitsami [The mathematical model of surface sediment contamination with aerosol particles] // Inzhenernyye izyskaniya. 2015. N 5–6. P. 76–79.

11. Spiridonov Ye. G. Problemy zagryazneniya prizemnogo sloya atmosfery v zone obsluzhivaniya vozdushnykh sudov [The problems of pollution of the ground atmospheric layer in the area of aircraft maintenance] : monografiya. Voronezh : VVAII, 2004. 191 p.

12. Maslova N. V., Kochetova Zh. Yu., Danilov A. N., Kuchmenko T. A. Ekologicheskii monitoring nefteproduktov na territorii khimicheskii opasnogo ob'yekta s primeneniym flesh-detektora [Environmental monitoring of oil products in the territory of a chemically hazardous facility with the use of a flash detector] // Meditsina ekstremal'nykh situatsiy. 2017. N 2. P. 83–88.

Сведения об авторах

Базарский Олег Владимирович – ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, Россия, 394064; Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", д-р физ.-мат. наук, профессор

Bazarsky O. V. – 54a, Staryh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Research Air Force Center "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Dr of Phys.-Math. Sci., Professor

Кочетова Жанна Юрьевна – ул. Старых Большевиков, 54а, г. Воронеж, Россия, 394064; Военно-учебный научный центр Военно-воздушных сил "Военно-воздушная академия имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина", канд. хим. наук, доцент, докторант; e-mail: zk_vva@mail.ru

Kochetova Zh. Yu. – 54a, Staryh Bolshevikov Str., Voronezh, Russia, 394064; Military Educational and Research Air Force Center "Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin", Cand. of Chem. Sci., Associate Professor, Doctoral Student; e-mail: zk_vva@mail.ru

O. V. Bazarsky, Zh. Yu. Kochetova

Model of evaporation of kerosene droplets in the atmosphere and pollution of soil around the airfield

Pollution of soils near airport territories is caused by formation and dispersion of kerosene droplets during its incomplete combustion in afterburner operation of the aircraft engine. With constant impact on the environment even small amounts of unburned fuel over decades of operation of airfields (primarily military), the contribution of this component to soil contamination becomes no less significant than with emergency discharges. The description of kerosene dropping is based on the fact that the exhaust gases of aircraft engines and drainage systems cannot condense, as they are at temperatures above the critical temperature for kerosene. To condense, they are to become vaporized. Cooling of exhaust gases and condensation of kerosene vapors occurs with a high level of air flow turbulence. As a result, gas-dynamic formations with different mass are formed reaching condensation temperatures, turning into drops of liquid kerosene. Taking into account the set of random processes occurring during turbulent cooling of kerosene, droplet size distribution is Gaussian. The constructed mathematical model of kerosene soil pollution near the airfield shows that environmentally hazardous pollution is observed at a distance of up to 100 m from the edge of the runway. During the study of the soils of the near-aerodrome territory of the Baltimor airfield (Voronezh), it has been determined that the nearest residential area is located 1.8 km from the runway, where the level of soil contamination with kerosene is determined below the MPC. In the southern direction from the airport at the distance of 300–1500 m there is a village with a predominant soil type – Chernozem; here kerosene accumulates, the MCL excess is exceeded by 4–12 times. A fairly complete agreement has been obtained between the calculated and experimental data ($R = 0.81$), despite the fact that the theoretical calculations did not take into account changes in the altitude of the aircraft flights.

Key words: mathematical model, evaporation of droplets, kerosene, around-airfield territory, pollution of soils

Article info: received 09.02.2018; received in revised 18.10.2018