

МОНИТОРИНГ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПРИАЭРОДРОМНЫХ ТЕРРИТОРИЙ (НА ПРИМЕРЕ г. ЭНГЕЛЬС)

И.С. Лазарев, Ж.Ю. Кочетова, О.В. Базарский, И.О. Бакланов

Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина,
lazarev-ilya@list.ru

Представлены результаты мониторинга и прогнозирования загрязнения грунтов приаэродромных территорий авиационным топливом. В основу расчета положена математическая модель образования капель керосина при взлете и посадке самолетов, когда двигатели работают в форсажном режиме. Модель прошла апробацию на военном аэродроме «Энгельс-2» (г. Энгельс) и показала высокую сходимость результатов расчетов и измерений уровня загрязнения грунтов керосином (81 %). Установлено, что наибольшее загрязнение грунтов авиационным топливом находится на расстоянии до 300 м от взлетно-посадочной полосы.

Ключевые слова: аэродром, загрязнение грунтов, керосин, модель каплеобразования, модель загрязнения грунтов, форсажный режим.

MONITORING AND FORECASTING CONTAMINATION OF LAND NEXT TO THE AIRFIELD (FOR EXAMPLE, ENGELS)

I.S. Lazarev, Zh. Yu. Kochetova, O.V. Bazarsky, I.O. Baklanov

N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy

The article presents the results of monitoring and forecasting of soil contamination in the area near an airfield with aviation fuel. The calculation is based on a mathematical model of kerosene droplets formation during takeoff and landing of aircraft when the engines are operating in the afterburner mode. The model was tested at the military airport «Engels-2» (Engels) and showed a high convergence of the calculated and measured results of soil contamination levels with kerosene (81 %). It is established that the greatest contamination of soil with aviation fuel is at a distance of up to 300 m from the runway.

Keywords: aerodrome, monitoring, pollution, soils, kerosene, model of droplet formation, model of soil pollution, afterburning regime

Введение

В Российской Федерации в настоящее время эксплуатируется более 70 военных аэродромов, из них к активно действующим относится около 30. Основным компонентом, загрязняющим грунты аэродромов, является керосин. Он относится к веществам третьего класса опасности, и его ориентировочно допустимая концентрация (ОДК) в грунтах составляет 100 мг/кг.

Авиационное топливо накапливается в толще грунтов, фильтруется, проникает в нижние слои и может представлять угрозу загрязнения водоносным горизонтом. Под военными аэродромами скапливаются керосиновые линзы массой до сотен тонн, движущиеся с грунтовыми водами в направлении естественных водоемов [7]. В ежегодном докладе о результатах 2014 г. и основных направлениях

деятельности МЧС на 2015—2018 гг. экологическая ситуация на военных аэродромах характеризуется как приближенная к катастрофической [5].

Существующие модели в основном описывают развитие ситуации при аварийных сбросах, когда топливо находится в жидкой фазе [2, 3, 9]. При этом недостаточно изучена эволюция керосиновых облаков, образующихся в форсажном режиме работы двигателей самолетов. Однако эта составляющая загрязнения грунтов за десятилетия эксплуатации аэродромов становится не менее значимой, чем загрязнение, обусловленное аварийными сбросами.

Цель настоящей статьи — верификация математической модели каплеобразования керосина при работе двигателей самолетов в форсажном режиме и загрязнения грунтов приаэродромной территории.

Методика прогнозирования

В основе прогнозирования загрязнения грунтов приаэродромной территории в г. Энгельс лежит математическая модель конденсации капель керосина в атмосфере и пространственного загрязнения грунтов [4]. Разработана расчетная программа на основе универсальной математической системы Mathcad, позволяющая в автоматическом режиме прогнозировать загрязнение грунтов военных аэродромов с учетом особенностей их эксплуатации.

При описании каплеобразования авторы исходили из того, что отработавшие газы авиационных двигателей и дренажных систем могут конденсироваться при температуре ниже критической температуры керосина. При конденсации керосина из-за множества процессов, происходящих в турбулентной среде спутного следа самолета, распределение капель топлива по радиусу R_i можно считать нормальным. С учетом энергии, выделяющейся при охлаждении паров керосина, и поверхностной энергии, необходимой для их конденсации, авторами ранее было установлено, что радиус сконденсированных капель несгоревшего топлива может изменяться от 35 до 595 мкм (рис. 1) [4].

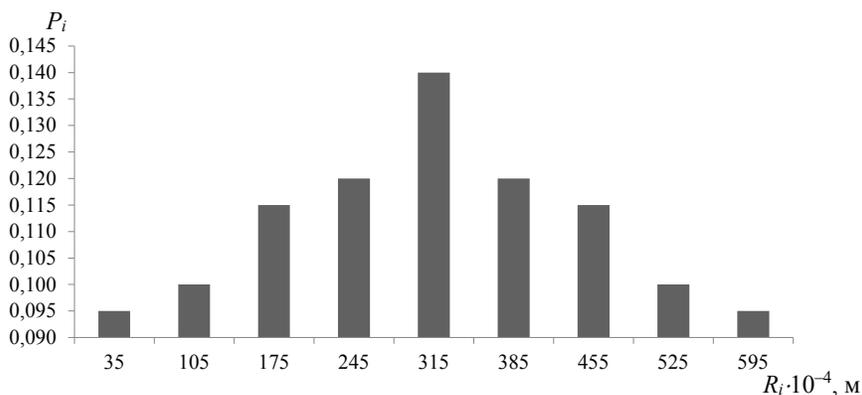


Рис. 1. Нормальное распределение вероятности образования капель несгоревшего топлива радиусом R_i .

Алгоритм расчета модели образования капель из паров керосина и загрязнения грунтов приаэродромных территорий включает следующие шаги.

1. Расчет массы керосина (m_i , кг) в каждой i -й градации за один вылет самолета в зависимости от радиуса капель топлива:

$$m_i = P_i M, \quad (1)$$

где P_i — вероятность образования капель керосина радиусом R_i , $M = 1$ кг — масса выбрасываемого несгоревшего керосина за один самолетовылет [1].

2. Расчет массы керосина в каждой градации ($m_{\Sigma i}$) за все время существования аэродрома с учетом среднего числа вылетов самолетов в год (N):

$$m_{\Sigma i} = m_i T N, \quad (2)$$

где $T = 80$ лет — время существования аэродрома г. Энгельс, $N = 5000$.

3. Расчет скорости горизонтального разлета (v_r , м/с) капель керосина в каждой i -й градации:

$$v_r = \frac{v_{cp}^2}{v_{cp} + \frac{6\eta}{P_B R_i}} \left[1 - e^{\frac{-1,5 \left(\frac{P_B v_{cp}}{2} + \frac{3\eta}{R_i} t_{ri} \right)}{P_0 R_i}} \right], \quad (3)$$

где $v_{cp} = 4$ м/с — среднегодовая скорость ветра, направление которого перпендикулярно взлетно-посадочной полосе на высоте 100 м [10]; $\eta = 1,8 \cdot 10^{-5}$ Па·с — коэффициент динамической вязкости воздуха; $p_B = 1,2$ кг/м³ — плотность воздуха при нормальных условиях; t_{ri} — время (с) ускоренного осаждения капель керосина, зависящее от параметра осаждения $b = (9\eta)/(2 p_0 R_i^2)$ [4]; $p_0 = 8 \cdot 10^2$ кг/м³ — плотность охлажденной капли керосина.

Время осаждения частиц в каждой i -й градации t_{ri} представлено на рис. 2.

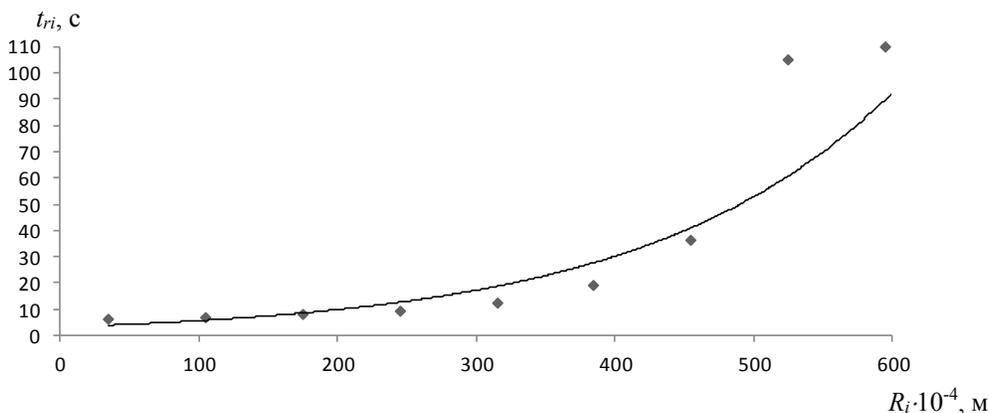


Рис. 2. Зависимость времени ускоренного осаждения частиц керосина (t_{ri}) от их радиуса (R_i).

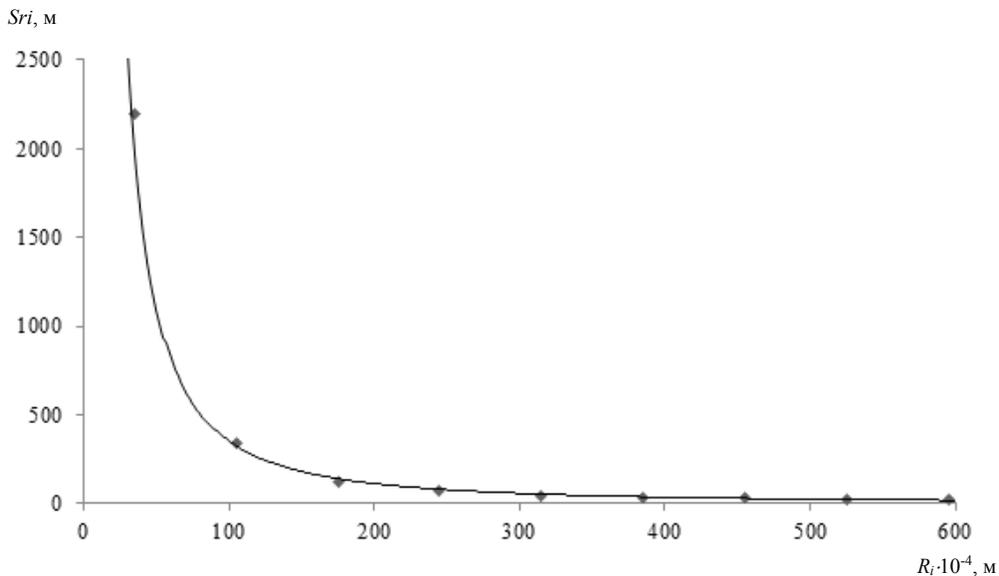


Рис. 3. Дальность разлета капель керосина перпендикулярно взлетно-посадочной полосе (Sr_i) в зависимости от их радиуса (R_i).

4. Расчет дальности разлета капель керосина (Sr_i , м) перпендикулярно взлетно-посадочной полосе в каждой i -й градации определяется выражением $Sr_i = V_r t_{ri}$. Результаты расчета представлены на рис. 3.

5. Введение исходных данных о ширине полос (Δl_i , м), загрязненных каплями керосина радиусом каждой градации, перпендикулярных взлетно-посадочной полосе.

6. Расчет массы грунта ($M_{гр_i}$, кг) в каждой полосе шириной Δl_i загрязненного на глубине $h = 0,02$ м, при средней плотности грунта $\rho_{гр} = 1200$ кг/м³ по всей длине $L = 2000$ м между маяками ближайших приводов исследуемого аэродрома:

$$M_{гр} = L h \Delta l_i \rho_{гр}. \quad (4)$$

7. Концентрация в грунте (C_i , мг/кг) в каждой полосе шириной Δl_i топлива, выброшенного за время эксплуатации аэродрома:

$$C_i = m_{\Sigma i} / M_{гр_i}. \quad (5)$$

Мониторинг концентрации керосина в грунте

Отбор проб грунтов проводили в соответствии с Руководящим документом РД 52.04.186-89 на удалении от взлетно-посадочной полосы с шагом 5, 10, 50 м и далее 100 м до 1 км в разных направлениях. С помощью GPS-пеленгатора фиксировали координаты точек отбора проб. Определение концентрации керосина в почвогрунтах по аттестованным методикам предполагает консервирование и

транспортировку проб грунта в специализированные лаборатории, сложную пробоподготовку с извлечением нефтяных углеводородов из почвы с применением токсичных растворителей, анализ экстрактов с помощью специального оборудования (флуориметры, ИК-спектрометры, хроматографы). Дорогостоящая стандартная схема определения загрязнителей грунтов на масштабных приаэродромных территориях обуславливает сокращение числа контролируемых точек, что приводит к значительному понижению точности геомониторинга. В настоящее время отбор проб производят в местах предполагаемого повышенного содержания загрязнителей (склады ГСМ, станции перекачки топлива) и по одной-две пробы отбирают на прилегающих территориях в селитебной зоне (детские площадки, школьные двory).

Для повышения оперативности и снижения стоимости исследования загрязнения грунтов аэродромов в полевых условиях разработан универсальный пьезосенсорный датчик, действие которого основано на явлении обратного пьезоэффекта [6]. Датчик прошел апробацию в лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии № 97 ФМБА России и применяется для ранжирования проб грунтов по уровню загрязнения перед дорогостоящим лабораторным анализом для оперативного контроля экологической ситуации на аэродромах государственной авиации (города Воронеж, Липецк) [8]. Применение датчика позволяет определять концентрацию легких нефтепродуктов в почвах и грунтах различной природы *in situ* без сложных стадий пробоотбора, пробоподготовки, интерпретации результатов анализа. Время определения концентрации керосина в одной контрольной точке не превышает 10 мин, относительная погрешность измерений составляет менее 20 %.

Верификация модели

В программе Surfer были построены карты загрязнения грунтов территорий аэродрома Энгельс-2 и прилегающих к нему селитебной и рекреационной зон (рис. 4).

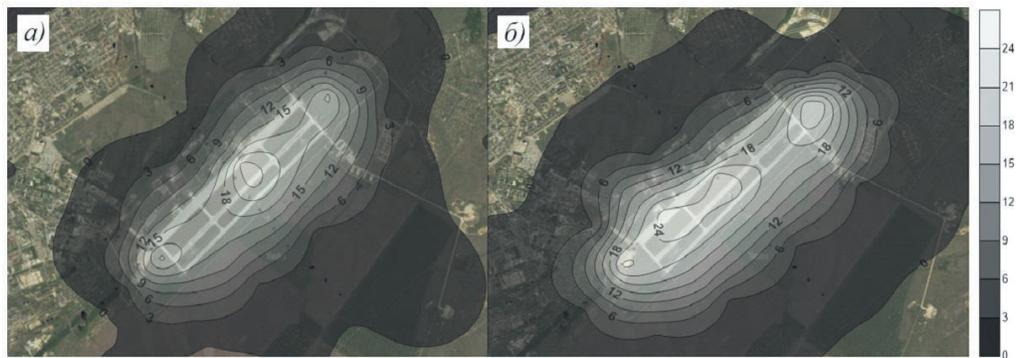


Рис. 4. Измеренное (а) и рассчитанное (б) значения кратности превышения ПДК керосина в грунте на территории аэродрома Энгельс-2.

Сопоставление расчетных значений загрязнения керосином грунтов приаэродромной территории с измеренными значениями концентрации керосина проводили методом корреляционного анализа. Теснота связи (коэффициент корреляции Пирсона) составила 0,81. Из рассмотрения были исключены точки контроля грунтов, расположенные на территориях склада горюче-смазочных материалов и в местах перекачки топлива, где концентрация керосина в грунтах превышала расчетную в два-три раза. В остальных случаях наибольшее расхождение значений было получено вблизи взлетно-посадочной полосы, что объясняется смывами с аэродромного покрытия, не учтенными в модели.

Выводы

Разработанная модель образования, рассеяния капель керосина и загрязнения ими грунтов в результате взлета и посадки самолетов при форсажном режиме работы двигателей, а также составленная расчетная программа, позволяют оперативно оценивать загрязнение грунтов аэродромов государственной авиации и прилегающих к ним территорий с учетом времени и особенностей эксплуатации аэродромов.

В соответствии с расчетными и экспериментальными данными установлено, что основная масса керосина оседает в грунты на расстоянии от взлетно-посадочной полосы до 300 м, а повышенное содержание керосина фиксируется и на расстоянии более 2 км. Надо отметить, что на расстоянии 800 м от взлетно-посадочной полосы аэродрома Энгельс расположен дачный поселок. Подобное расположение рекреационной и селитебных зон относительно аэродромов характерно для большинства военных аэродромов, что вызвано естественным и неизбежным ростом урбанизации, постепенным слиянием городов с авиационными комплексами. Полученные в работе результаты прогнозного и полевого испытания загрязнения грунтов объектов авиационной деятельности рекомендуется учитывать при проектировании градостроительства; при установлении границ санитарно-защитных зон авиационных комплексов, масштабы которых рекомендуется уточнять ежегодно в зависимости от интенсивности деятельности аэродромов; при проведении мероприятий по повышению экологической грамотности населения.

Список литературы

1. Авиационные правила АП-34. Охрана окружающей среды. Эмиссия загрязняющих веществ авиационными двигателями. Нормы и испытания. М.: Росавиация, 2003. 99 с.
2. Александров Э.Л. О поведении капель ракетного топлива в атмосфере // Метеорология и гидрология. 1993. № 4. С. 36—45.
3. Архипов В.А., Жарова И.К., Козлов Е.А. Прикладные аспекты экологии при эксплуатации ракетно-космической и авиационной техники // Оптика атмосферы и океана. 2013. № 8. С. 636—641.
4. Базарский О.В., Кочетова Ж.Ю. Модель испарения капель керосина в атмосфере и загрязнение грунтов приаэродромной территории // Вестник МГТУ. 2019. № 1. С. 64—71.
5. Доклад о результатах 2014 года и основных направлениях деятельности МЧС России на 2015—2018 годы [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.mchs.gov.ru/activities/results/2014_god/Doklad_o_rezultatah_2014_g._i_osnovnih_n, 2015. Дата обращения 11.05. 2019.

6. Кочетова Ж.Ю., Базарский О.В., Кучменко Т.А. Экспресс-оценка загрязнения грунтов керосином по сигналам пьезосенсора на основе многослойных углеродных нанотрубок // Вестник МГУ. Серия 2: Химия. 2017. Т. 58, № 1. С. 28—35.
7. Кочетова Ж.Ю. Экомониторинг нефти и нефтепродуктов в объектах окружающей среды. Воронеж: изд-во ВУНЦ ВВС «ВВА», 2016. 204 с.
8. Патент 2302627 RUS, МПК G01N 27/12. Газоанализатор с открытым входом на основе пьезосенсора / Т.А. Кучменко, Ж.Ю. Кочетова, Ю.Е. Силина. Заявл. 31.01.2006; Оpubл. 10.07.2007.
9. Свириденков А.А., Третьяков В.В. Влияние коагуляции капель на характеристики факела распыливания за форсунками // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2009. № 3 (9). С. 157—161.
10. Свод правил СП 131.13330.2012. Строительная климатология. СНиП 23-02-99. М., 2015. 113 с.