



УДК 519.6

МРНТИ 87.15.17

https://doi.org/10.53364/24138614_2026_41_2_3

Ф.Л. Лекерова^{1*}, А.К. Молдабеков¹, Г.Н. Сейфула¹, С.С. Абыл¹

¹Академия гражданской авиации, Алматы, Казахстан

*Email: f.lekerova@agakaz.kz

ЦИФРОВАЯ ПЛАТФОРМА НА БАЗЕ БПЛА ДЛЯ ТРЁХМЕРНОГО МОНИТОРИНГА ДЫМНОСТИ И КАЧЕСТВА ВОЗДУХА

***Аннотация.** Аэродромная зона аэропортов является причиной выбросов авиационных эмиссии в значительном объеме, который оказывает неблагоприятное воздействие на качество воздуха в окрестностях жилых массив. Цель статьи – разработка и экспериментальная валидация созданной платформы цифрового мониторинга для измерения дымности воздуха на базе БПЛА в приаэродромной зоне, оценка работоспособности платформы для экологического регулирования и пространственной визуализации уровней загрязнения в трех измерениях (3D). Объектом данного исследования это измерение скопления твердых частиц сажи, которые образовались при сгорании авиационного топлива, а именно керосина. Созданная платформа имеет емкостный датчик, который определяет изменение диэлектрического свойства воздушного пространства, конвертируя их в электрический сигнал. Это сигнал далее обрабатывается микроконтроллерами Arduino и Raspberry Pi для последующей цифровой регистрации и передачи данных. Это платформа была поэкспериментировано в полевых условиях на базе БПЛА по пространственно-цилиндрической трехмерной траектории на высотах 20-100 м, далее для точности данных платформа была прокалибрована с прибором дымомера «Мета-01МП-0.1». Была выстроена график для описания калибровочной зависимости выходного напряжения датчика от коэффициента дымности, и была применена математическая модель корреляционно-регрессионный анализ. В среде Python и в библиотеке Plotly была построена 3D визуализация распределения твердых частиц и загрязнителей воздуха. В результате, полученные данные доказывает эффективность применения разработанной платформы дымности для мониторинга воздуха и оценки их уровней, показывая возможность его применения в системах экологического контроля в приаэродромной среде и других урбанизированных зонах.*

***Ключевые слова:** загрязнение воздуха, измерение дымности, цифровая измерительная платформа, 3D модель распределения загрязнения, БПЛА, экологический мониторинг, оценка воздействия на окружающую среду.*

Введение.

В последние годы воздушные перевозки демонстрирует стабильный рост, так как увеличивается число пассажиров и объем грузов по всему миру. Соответственно возрастает и экологические нагрузки, связанные с авиационной эмиссией, который поступают от сжигания авиационного керосина в газотурбинных двигателях, образуя агенты загрязнения воздуха как сажевые частицы и «твердые углесодержащие соединения». Эти образования формируются при нехватке кислорода и высоких температур в камере сгорания [1]. Данные

частицы представляют собой аэрозольную взвесь, которая зрительно воспринимается как дым. Следовательно, эта работа будет разбирать дымность, которая является интегральным показателем, представляющий наличие и концентрацию сажевых частиц и выхлопных газов двигателя.

Сажевые выбросы в приаэродромной среде и в окрестностях жилых массив негативно влияют на здоровье людей и влечет к разрушению растительного окружения. В контексте физико-химического положения, дымность является параметром, который показывает степень ослабления светового потока при прохождении потока аэрозольных частиц содержащие твердые частицы сажи. Значение дымности увеличивается из-за большего содержания сажевых частиц, тем самым увеличивается поглощение и рассеяние света. Во многих источниках дымность выражается через коэффициент светопоглощения ($m-1$) и через числовой индекс дымности (SN (smoke number)). Решения выбора параметра «дымности» в качестве измерительной характеристики обуславливается тем, что этот параметр имеет возможность оценивать не только содержание сажевых частиц в выхлопных газах, но имеет способность измерять размерный состав аэрозоля и их смесь состоящий органических и неорганических фракции в аэрозоли включая размер, форму и структуру загрязняющих веществ [2]. Принимая во внимание изложенное можно полагать что мониторинг и контроль выбросов твердых сажевых частиц является приоритетной задачей устойчивого развития авиации, в особенности в рамках программ ИКАО и других законодательных органов.

Недостаточная информативность измерительных процессов и низкие технологические возможности организационных структур экологического контроля является главной причиной ухудшения экологической обстановки в урбанизированных социально-экономических средах как аэродром. Научные труды устанавливают что ингредиенты загрязнения в районе аэропорта, в других урбанизированных территориях распределяются неравномерно, поэтому традиционный подход измерения экологического мониторинга не позволяют оценить уровень загрязнения трехмерном пространстве. Поэтому, очень важно измерить качество воздуха атмосферы в разных точках, то есть во всех трех плоскостях. Таким образом, авторы статьи установили, что применение измерительных приборов цифрового мониторинга на базе БПЛА повышают эффективность мониторинга. Определяющим параметром контрольно-измерительных инструментальных средств, в случае их использования на борту БПЛА, являются: вес, габариты, конструктивные специальные эксплуатационные технологические решения и виды источников бортового питания [3].

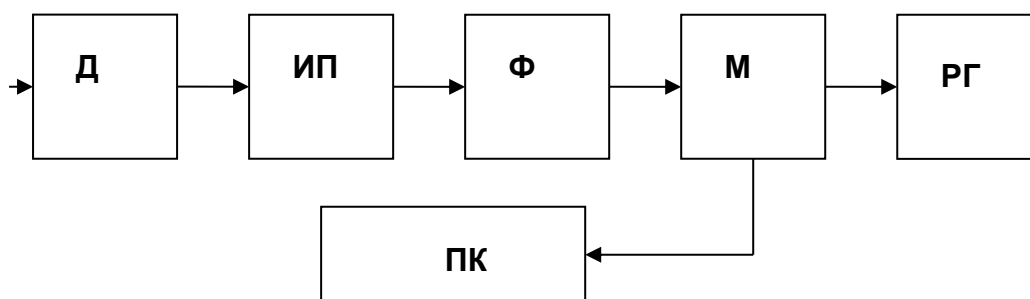
Материалы и методы исследования.

Как было упомянуто традиционные подходы имеют ряд несовершенств, такие как зависимость корреляции от условия эксперимента, невозможность измерения размерного распределения частиц, низкая чувствительность, влияние температуры и влажности и затрудненная калибровка измерительных приборов. К тому же, большая часть измерительных устройств обладают крупными габаритами и массой, что делает его технологически непригодными к применению и для установки БПЛА [4].

Перечисленные проблемы были решены с помощью создания и разработки новой методики для измерения параметра «дымности», в основе которого лежит измерение сопротивления некоторого воздушного пространства между двумя специальными плоскими электродами. Чисто теоретический считается, что физико-химическая плотность содержания газов между двумя электродами изменяют электрическое омическое сопротивление воздуха. И этот принцип является информативно-диагностическим признаком для анализа и мониторинга содержания загрязняющих веществ, в том числе сажи и твердых частиц. Омические сопротивление и диэлектрические свойства изменяются за счет изменения состава объёмной воздушной среды [5].

Следовательно, было в работе был предложен датчик, состоящий из двух металлических пластин которые выполняют функцию обкладок электрического конденсатора, расположенных на некотором расстоянии d друг от друга. Эти обкладки нужны для преобразования диэлектрической неоднородности объема воздушного пространства в электрический сигнал. Принцип действия заключается в следующем: емкость плоского конденсатора C пропорциональна диэлектрической проницаемости среды ϵ , рабочей площади пластин S конденсатора и обратно пропорциональна расстоянию между ними d . Диэлектрическая составляющая будет увеличиваться или уменьшаться при постоянных значениях площади и расстояния, и как следствие – емкость датчика.

Полная структурно-функциональная модель процесса контроля концентрации загрязняющих веществ в воздухе с новым емкостным датчиком представлена на рисунке 1.



Д - емкостной датчик; ИП - истоковый повторитель; Ф - формирователь сигнала; М – Arduino Uno; РГ - регистратор информации; ПК- персональный компьютер.

Рисунок 1 – Структурно-функциональная модель процесса контроля загрязнения воздуха твердыми частицами

В рамках исследования было проведено фильтрация шумов, усреднение показаний и построение графиков зависимости $U_{\text{вых}}$ от времени и концентрации частиц.

Следующая обработка сигналов после их усиления, реализуется микропроцессорными средствами Raspberry Pi или Arduino [6]. В данном блоке выполняются функции сбора данных, их хранения во внутренней памяти в формате CSV, математический и логический анализ данных. Источником питания служит блок питания - 5 В. Каждый из вариантов имеет определенные достоинства. Однако возможно и системная интеграция микроконтроллеров Arduino и Raspberry Pi, при этом:

- первый элемент используется как микроконтроллер с достаточно большим набором типовых универсальных прикладных программ;
- второй элемент является универсальным процессором, на который может устанавливаться система Windows.

Однако в качестве второго элемента могут использоваться и более масштабные элементы, например персональные компьютеры или ноутбук, что обеспечивает реализации на языке программирования, например Питон, статистической и интеллектуальной обработки данных с визуализацией характеристик распределения концентрации. Функциональные возможности второго элемента расширяются за счет внешнего подключения осциллографа и других штатных приборов, расширителя памяти и других запоминающих устройств.

Для передачи информации с Arduino или Raspberry Pi осуществляется подключение с помощью специализированного I2C интерфейса (стандартная двухпроводная последовательная шина). При этом возможно подключение нескольких плат Arduino [7] для параллельного измерения и обработки дополнительных измерительных сигналов.

На основе структурно-функциональной модели процесса контроля загрязнения воздуха твердыми частицами, представленной на рисунке 1 была создана измерительная платформа для измерения дымности в исследуемом объемном пространстве воздуха. На рисунке 2 представлен опытный экземпляр этого прибора на базе БПЛА.



Рисунок 2 – Платформа для контроля загрязнения воздуха твердыми частицами.

Чтобы оценить, какой метод является лучшим, нужно сначала оценить преимущества метода по технологичности, то есть анализировать подход после полевых испытаний в эксплуатационных условиях. При этом нужно учитывать вопрос и задачу оптимального сочетания метрологических параметров с экономической точки зрения [8,9].

Рассмотренные схемные решения (источковый повторитель, согласующий и усилительный каскады) обеспечивают высокое входное сопротивление, стабильность выходного сигнала и достаточную чувствительность при минимальном уровне собственных шумов. Использование микропроцессоров Arduino в комбинации с компьютерным оборудованием может обеспечивать возможность цифровой регистрации, фильтрации и передачи данных на удаленный Центр обработки данных [10].

Принцип работы датчик заключается в подключении к входной цепи согласующего каскада. Эквивалентную схему импеданса входной цепи датчика, газовой среды и сопротивления следующего каскада согласования с измерительным каналом можно представить в виде структуры, представленной на рисунке 3.

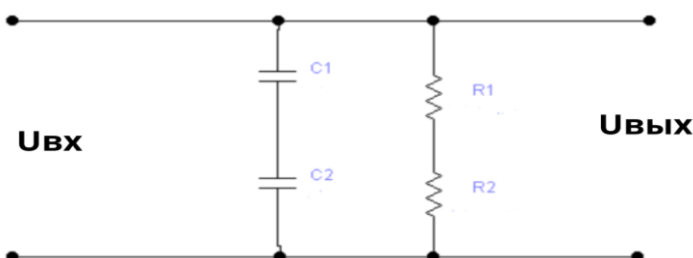


Рисунок 3- Эквивалентная схема датчика загрязнения твердыми частицами контролируемой воздушной среды

На рисунке 1.1 конденсатор C_1 – емкостной элемент входа измерительного канала, C_2 - суммарный емкостной элемент трех элементов, равный

$$C_2 = C_D + C_{\text{каб}} + C_{\text{зи}}, \quad (1)$$

где C_d - емкость рабочего датчика, выполненного в виде двух пластин, и воздушной средой между пластинами; $C_{каб}$ - емкость кабельного соединения; $C_{зи}$ - емкость участка транзистора «затвор-исток».

Сопротивление R_1 определяется сопротивлением полевого транзистора между затвором и истоком. Проводимость $G_{общ}$ является суммой проводимостей:

$$G_{общ} = \frac{1}{R_d} + \frac{1}{R_{каб}} + \frac{1}{R_{зи}}, \quad (2)$$

где R_d - сопротивление датчика, зависящее от проводимости газового участка между двумя электродами; $R_{каб}$ - сопротивление утечки кабеля; $R_{зи}$ - сопротивление между истоком и затвором.

Тогда, если рассматривать комплексные импедансы делителя, коэффициент передачи сигнала датчика на вход согласующего каскада, будет определяться формулой:

$$K = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}, \quad (3)$$

$$\text{где } Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}; \quad (4)$$

$$Z_2 = R_2 + \frac{1}{j\omega C_2}. \quad (5)$$

В данной схеме полезным информативным показателем будет служить емкость датчика C_2 , составляющая с C_1 емкостной делитель. Следовательно, выходное напряжение делителя в общем случае находится по следующей формуле:

$$U_{вых} = \frac{C_1 * U_{вх}}{C_1 + C_2}. \quad (6)$$

Путем макетирования и проведения экспериментов был проведен конструктивный расчет параметров делителя [11]. Результаты исследований приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчет параметров делителя

$U_{вх}$ (В)	d (мм)	S (мм ²)	R_2 (Ом)	C_1 (пФ)	C_2 (пФ)	$U_{вых}$ (В)
0,1	4	7,065	1,5	470	2084	0,018401
0,1	4,2	7,065	1,5	470	2016	0,018899
0,1	4,4	7,065	1,5	470	1953	0,01939
0,1	4,6	7,065	1,5	470	1894	0,019876
0,1	4,8	7,065	1,5	470	1838	0,020355
0,1	5	7,065	1,5	470	1786	0,020829
0,1	5,2	7,065	1,5	470	1736	0,021298
0,1	5,4	7,065	1,5	470	1689	0,021761
0,1	5,6	7,065	1,5	470	1645	0,022218
0,1	5,8	7,065	1,5	470	1603	0,02267
0,1	6	7,065	1,5	470	1563	0,023117

Емкость конденсатора (датчика), состоящая конструктивно из двух пластин 1 и 2 изменяется счет вариаций относительной диэлектрической проницаемости среды между

пластинами [12]. Данный датчик с пластинами возможно закрепить на корпус БПЛА с внешней стороны корпуса. В результате конструктивного расчет было установлено, что сами эффективными параметрами для проведения измерений на БПЛА являются следующие: расстояние между двумя пластинами $d = 5$ см, а диаметр самих пластин составляет $d_5 = 80$ мм.

Измерительный сигнал должен пройти первичную обработку, для чего была предложена соответствующую схема согласования. Структурная схема согласования для измерения концентрации загрязняющих веществ в воздушном на рисунке 4.

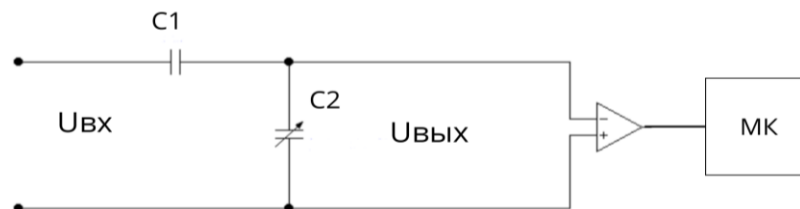


Рисунок 4 – Структурная схема согласования для измерения концентрации загрязняющих веществ

Результаты и их обсуждение.

Экспериментальная проверка работоспособности разработанной цифровой платформы проводилась с помощью БПЛА по заранее заданной траектории в пределах исследуемой зоны. Траектория движения мобильной платформы устанавливалась в соответствии с результатами исследования по форме пространственно-информационного атмосферного цилиндра (рисунок 5).

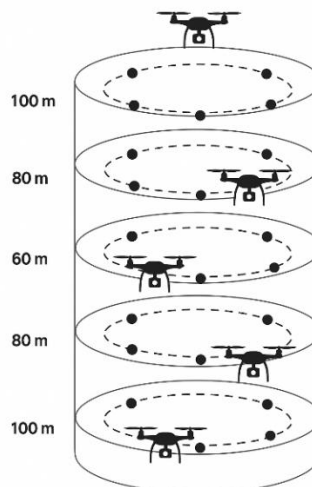


Рисунок 5 – Траектория перемещения БПЛА для мониторинга измерительной

В ходе эксперимента мобильная платформа сбора данных перемещалась в автономном режиме по заданным траекториям (рисунок 5), при этом бортовая GPS система обеспечивала перемещение по соответствующим трехмерным координатам. Во время каждого сеанса измерения проводились на высотах (Н) 20м, 40м, 60м, 80м, 100м. На каждой высоте формировался определенный набор точек мониторинга, где измерительная платформа зависала в течение 15 сек для сбора данных, далее происходил переход к следующей позиции [13].

При помощи системной интеграции микроконтроллеров Arduino и Raspberry Pi передачи информации данных, и измерительная информация записывалась во внутреннюю память прибора передавались на мобильное устройство оператора и переносились в Базу данных в Excel-формате, установленной на наземном персональном компьютере.

Натурные экспериментальные исследования в реальных условиях проводились на территории АО «Академия гражданской авиации» 14.09.2024., находящейся фактически в приаэродромной зоне аэропорта города Алматы. Из-за ограничительных мер высота экспериментальных измерений составила 20, 40 60 м, 80м,100м.

В таблице 2 представлены результаты экспериментальных исследований, проводимых 14 сентября 2024 года, в 13 часов 15 минут. Пространственные перемещения L между каждой точкой в измеряемой зоне ориентировочно составляет 20 м. Каждая строка в матрице данных отражает измеренные значение в трехмерной системе координат (x, y, H).

Таблица 2 - Результаты измерений (14.09.2024 года, 13.15)

H	20м	40м	60м	80м	100м
L	L ₁ = 20.2	L ₁ =20.3	L ₁ =20.1	L ₁ =20.3	L ₁ =20.3
	L ₂ = 20.6	L ₂ =20.4	L ₂ =21	L ₂ =20.5	L ₂ =20.5
	L ₃ =20.7	L ₃ =20.4	L ₃ =20.8	L ₃ =20.6	L ₃ =20.6
	L ₄ =20.2	L ₄ =20.5	L ₄ =20.7	L ₄ =20.7	L ₄ =20.7
	L ₅ =20.4	L ₅ =20.6	L ₅ =20.5	L ₅ =20.8	L ₅ =20.8
Дымность	0,589	1,122	0,6	0,31	0,26
	0,603	0,56	0,15	0,25	0,1
	0,509	0,38	0,11	0,26	0,05
	0,818	0,46	0,3	0,29	0,07
	0,956	0,57	0,25	0,27	0,01

Дальнейший этап исследования заключается в апробации разработанной платформы с емкостным методом измерения дымности для контроля загрязнения воздуха твердыми частицами, представленного на рисунке 1.4.

Для достижения поставленной необходимо решение задач по калибровке и разработке математической модели прибора дымности.

Объектом исследования выступает процесс измерения дымности – концентрации загрязняющих частиц отработавших газов дизельных и бензиновых двигателей следующих автомобилей: Мерседес С-Класс, БМВ 3 серии, Тойота Королла, Фольксваген Поло, Хендай Солярис, Киа Рио, Лада Веста, Митсубиси Паджеро Спорт, Тойота Ленд Крузер 100, Ниссан Патрол Y61, УАЗ Патриот, КамАЗ 5490 и т.д. На первом этапе испытание проводилось в режиме холостого хода при установившейся частоте вращения коленчатого вала автомобиля 2000 об/мин. Для каждого автомобиля на каждом режиме выполнялось не менее пяти измерений, после чего вычислялось среднее арифметическое значение. Измерения эталонным прибором «Мета-01МП-0.1» осуществлялись строго параллельно с измерениями разработанной платформы. «Мета-01МП-0.1» это прибор предназначенный для определения коэффициента дымности автомобильных двигателей R_i . Основными техническими характеристиками прибора [14]:

- диапазон измерений: 0–9,99 м⁻¹;
- предел погрешности: ±0,05 м⁻¹;
- диапазон температур: от –10 до +40 °С;
- время измерения: не более 10 с.

Измерения проводились с использованием разработанной измерительной платформы. Для каждого автомобиля фиксировались значения выходного напряжения

датчика $U_{\text{вых}_i}$ и соответствующие значения коэффициента дымности R_i . По результатам экспериментальных исследований был получен комплекс характеристик $R_i(U_{\text{вых}_i})$. Путем усреднения измеренных данных была получена калибровочная характеристика $\overline{R_i(U_{\text{вых}_i})}$ платформы для контроля дымности или загрязнения воздуха твердыми частицами. В таблице 3 представлена данная характеристика в табличной форме, а на рисунке 6 - в графической форме.

Как видно из графика на рисунке 6, между коэффициентом дымности R и выходным напряжением $U_{\text{вых}}$ наблюдается нелинейная зависимость, причем при увеличении коэффициента дымности снижается значение выходного напряжения, что указывает на возрастание концентрации частиц в выхлопных газах.

Расчет и построение математической модели платформы с калибровочной характеристикой $\overline{R_i(U_{\text{вых}_i})}$ проводился с использованием методов корреляционно-регрессионного анализа и линейной регрессии с двумя факторами.

Для верификации разработанной измерительной платформы проведена процедура калибровки с использованием методов нелинейного регрессионного анализа. В качестве базовой аппроксимирующей функции был принят полином второй степени, обеспечивающий физически адекватное описание нелинейной зависимости выходного напряжения емкостного датчика от концентрации твердых частиц. В результате расчетов с полиномиальной корреляцией 2-го порядка с величиной достоверности $R^2 = 0,9016$, как более соответствующее критериям точности, была построена математическая модель тесноты связи коэффициента дымности R и значения выходного напряжения датчика $U_{\text{вых}}$.

$$K = 0,6089 \times U_{\text{вых}}^2 - 3,6775U_{\text{вых}} + 6,091. \quad (7)$$

Таблица 3 – Калибровочная характеристика $\overline{R_i(U_{\text{вых}_i})}$ измерительной платформы

$U_{\text{вых}_i}, \text{мВ}_i$	$R_i, \text{м}^{-1}$
3,025	0,501
2,826	0,621
2,430	0,680
2,412	0,757
2,367	0,845
2,367	0,857
2,276	0,885
2,222	0,903
2,083	0,957
2,036	1,057
1,998	1,156
1,988	1,354

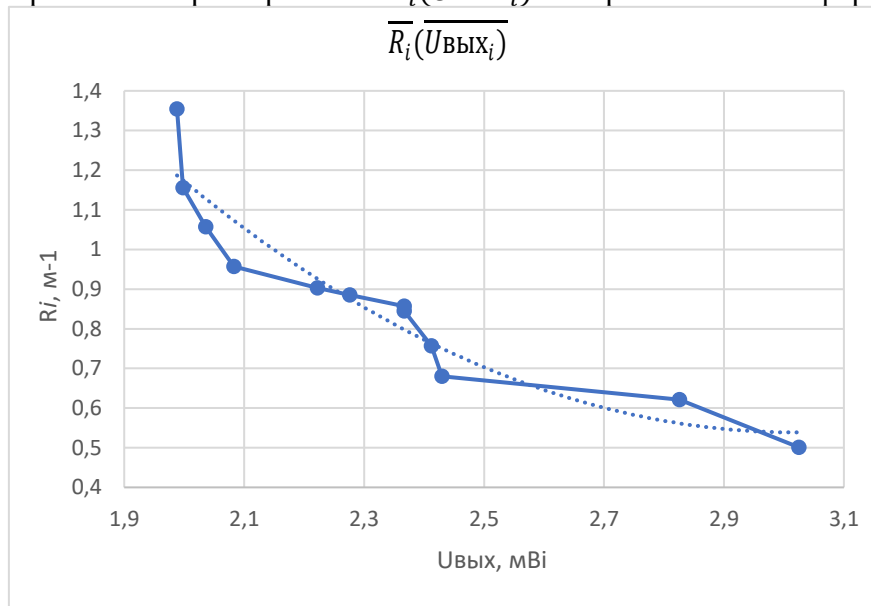


Рисунок 6 – Калибровочная характеристика $\overline{R_i(U_{\text{вых}_i})}$ измерительной платформы в графической форме

Емкостный датчик диэлектрической проницаемости среды (газовой смеси с твердыми частицами) сильно зависит от температуры (T , °C) и влажности (W , %). Поэтому необходимо использовать многофакторную полиномиальную регрессию, тем самым, уравнение (7) будет иметь форму, где будут учитываться эти факторы.

$$K = 0,6089 \times U_{\text{ВЫХ}}^2 - 3,6775U_{\text{ВЫХ}} + 6,091(T + W). \quad (8)$$

Для оценки статистической значимости каждого из эмпирических коэффициентов разработанной математической модели (7) и (8) был применен t-критерий Стьюдента. Проверка локальной значимости параметров позволяет исключить случайный характер связей и подтвердить математическую обоснованность выбранной структуры полинома второго порядка. Критическое значение критерия Стьюдента для двусторонней критической области определено при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы $f = n - m - 1 = 12 - 2 - 1 = 9$, что составляет $t_{\text{табл}} = 2,262$. В то время как расчетный критерий Фишера превысил критическое значение $F_{\text{расч}}(41,23) > F_{\text{табл}}(4,26)$, тем самым уравнение регрессии признается статистически значимым и надежным на уровне значимости 95%. Риск того, что данная нелинейная связь между напряжением и дымностью является случайным совпадением, составляет менее 5%. Средняя ошибка аппроксимации определяется по формуле (9)

$$\bar{A} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{K_{\text{факт},i} - K_{\text{расч},i}}{K_{\text{факт},i}} \right| \cdot 100\% \quad (9)$$

Получено высокое значение скорректированного коэффициента детерминации $\bar{A} = 8,14\%$, тем самым подтверждая высокую прогностическую способность разработанной математической модели в исследованном диапазоне дымности выхлопных газов.

Таким образом, разработанная платформа для контроля загрязнения воздуха твердыми частицами прокалибрована, для нее была предложена математическая зависимость, которая позволяет не только определять дымность воздушного пространства по измеренному выходному напряжению датчика, но и прогнозировать уровень дымности, в том числе в критических условиях.

Следует отметить, что на текущем этапе натурных испытаний количественная верификация функционирования платформы в строгом масштабе реального времени (Real-Time Mode) не являлась изолированной задачей исследования. В рамках представленной работы фокус был сделан на оценке метрологической состоятельности емкостного датчика и стабильности съема данных, в то время как временные задержки пакетной передачи информации и динамические характеристики сквозного канала связи количественно не измерялись.

Для перехода от дискретных точек измерения, полученных БПЛА в фиксированных координатах (x_i, y_i, H_i) к непрерывному пространственному анализу экологической обстановки была разработана модель трёхмерного распределения концентрации загрязняющих веществ. Поскольку измерения проводились по траектории пространственно-информационного атмосферного цилиндра, расчёт концентрации в промежуточных (неизмеренных) точках исследуемой зоны базируется на методе средневзвешенного обратного расстояния (Inverse Distance Weighting — IDW), адаптированном для трёхмерного пространства. Этот метод учитывает закон затухания концентрации примесей по мере удаления от источника эмиссии.

Значение коэффициента дымности (или концентрации частиц) $K(P)$ в любой произвольной точке пространства $P(x, y, H)$ определяется по формуле:

$$K(P) = \begin{cases} \frac{\sum_{i=1}^N w_i(P) \cdot K_i}{\sum_{i=1}^N w_i(P)}, & \text{если } d(P, P_i) > 0 \\ K_i, & \text{если } d(P, P_i) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

где:

K_i - экспериментальное значение дымности, измеренное платформой в i -й точке;

N - количество опорных точек измерения, учитываемых в локальной окрестности;
 $w_i(P)$ - весовая функция i -й точки, обратно пропорциональная расстоянию до целевой точки P :

$$w_i(P) = \frac{1}{[d(P, P_i)]^p} \quad (11)$$

где p - параметр степени (обычно принимается $p=2$ что соответствует физическому закону рассеяния), а $d(P, P_i)$ — Евклидово расстояние в трёхмерном пространстве, вычисляемое с учётом высотного коэффициента анизотропии:

$$d(P, P_i) = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + \lambda \cdot (H - H_i)^2} \quad (12)$$

здесь коэффициент λ учитывает, что вертикальный градиент рассеяния газов и твёрдых частиц в приаэродромной зоне отличается от горизонтального из-за влияния ветра и восходящих тепловых потоков

Реализация сценария визуализации в Python. На основе описанной математической модели в среде Python был реализован алгоритм расчёта регулярной трёхмерной сетки (Voxel Grid). Построенная модель пространственного распределения передаётся в программный модуль визуализации. Использование библиотеки Plotly и градиентной палитры Viridis позволяет решить следующие научные задачи как идентификация стратификации. Цветовая градация наглядно демонстрирует послойное (высотное) распределение твёрдых частиц, выявляя зоны инверсии или задерживающих слоёв атмосферы в районе аэродрома [15].

3D Visualization of Environmental Parameters with Height

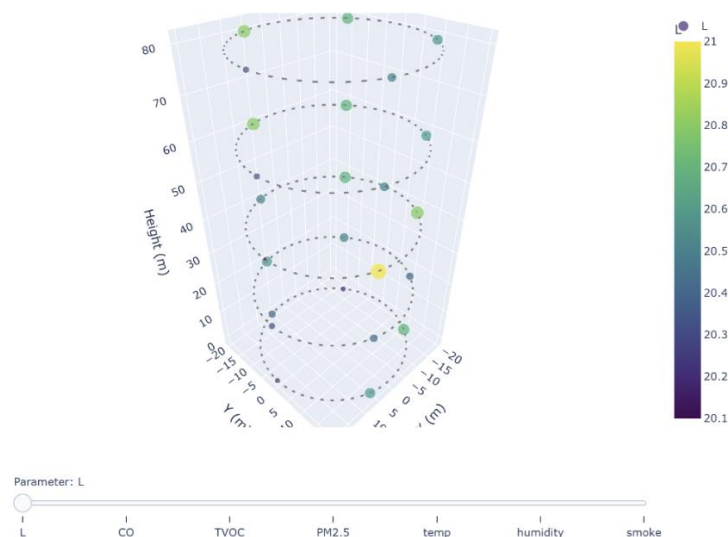


Рисунок 7 – Сценарий 3D - пространственного распределения CO в зависимости от высоты в цветовой градации значений

Заключение.

Целью данной статьи является разработка новой цифровой платформы для контроля загрязнения воздуха твердыми и сажевыми частицами, то есть для измерения «дымности», на основе которого лежит емкостной метод диагностики, работающий на базе БПЛА. Для того чтобы достичь этой цели были предложены следующие методы: измерение сопротивления некоторого воздушного участка между двумя специальными обкладками

конденсатора, где оценивается физическая плотность и химическое содержание газов в межэлектродном расстоянии, которые изменяют объемное электрическое сопротивление воздуха. Состав пространства воздуха будет зависеть от изменения омического сопротивления и диэлектрических свойств конденсатора. Данное техническое решение, была реализована с помощью аппаратных-программных средств Arduino, который показал высокую чувствительность и стабильность выходного сигнала при минимальном уровне шумов.

Это платформа была проэкспериментировано в полевых условиях на базе БПЛА по пространственно-цилиндрической трехмерной траектории на высотах 20-100 м, далее для точности данных платформа была прокалибрована с прибором дымомера «Мета-01МП-0.1». Была выстроена график для описания калибровочной зависимости выходного напряжения датчика от коэффициента дымности, и была применена математическая модель корреляционно-регрессионный анализ. В среде Python и в библиотеке Plotly была построена 3D визуализация распределения твердых частиц и загрязнителей воздуха. Проведённые расчёты и моделирование подтвердили технологическую состоятельность предложенного подхода. Направления дальнейших исследований будут сосредоточены на детальной количественной оценке динамических параметров платформы для доказательства её быстрогодействия в режиме реального времени, включая оптимизацию сетевых задержек при передаче потоковых данных с БПЛА на наземную станцию.

Благодарности

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан №ИРН АР25793665: «Разработка методов анализа загрязненного атмосферного воздуха выбросами воздушного транспорта и других транспортных средств в приаэродромной экологической среде».

Список литературы

1. Emami Javanmard, M., Tang, Y. & Martínez-Hernández, J. A. (2024). Forecasting air transportation demand and its impacts on energy consumption and emission. *Applied Energy*, 364, Article 123031. DOI:10.1016/j.apenergy.2024.123031.
2. ГОСТ ISO 8178-3-2014. (2014). Двигатели внутреннего сгорания поршневые. Измерение выброса продуктов сгорания. Часть 3. Определения и методы измерения дымности отработавших газов. Москва: ИПК Издательство стандартов, 36 с.
3. Lepistö, T., Niemi, J.V., Salo, L., Silvonen, V., Elsayed, M., Jäppi, M., Strandén, T., Kylämäki, K., Harni, S.D., Sormunen, P., Manninen, H.E., Timonen, H. & Rönkkö T (2026). Dispersion of ultrafine particle pollution from an international airport: Characteristics and short- and long-term effects in surrounding areas // *Environment International*. Vol. 208. Article 110116., DOI: 10.1016/j.envint.2026.110116.
4. Sliusar, N, Filkin, T, Huber-Humer, M. & Ritzkowski, M. Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: A comprehensive review. *Waste Manag.* 2022 Feb 15;139:1-16. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.12.006
5. Jasiński, R. (2022). Analysis of Particle Emissions from a Jet Engine Including Conditions of Afterburner Use. *Energies*, 15(20), 7696. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en15207696>
6. Liati, A., Brem, B.T., Durdina, L. et al. (2014). Electron microscopic study of soot particulate matter emissions from aircraft turbine engines. *Environmental Science & Technology* Vol.48(16). P.9417–9426. <https://doi.org/10.1021/es501809b>
7. Куликов, А.Н. (2019). Датчики диэлектрических свойств газовых сред и аэрозольных смесей: монография. Москва: Издательский дом МЭИ, 146 с.

8. StepByStepInternet.com. (2022). Как загрузить и установить Arduino на Raspberry Pi [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stepbystepinternet.com/install-arduino-raspberry-pi/>.
9. Carminati, M., Ferrari, G., & Sampietro, M. (2014). Capacitive Detection of Micrometric Airborne Particulate Matter for Solid-State Personal Air Quality Monitors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 219, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.08.027>
10. Петров, А. С. & Громов, И. П. (2022). Применение микроконтроллерных систем Arduino для экологического мониторинга атмосферного воздуха. Сборник научных трудов. Новосибирск: НГТУ, 54–61с.
11. Mculab.ru. Обзор статьи «Основные схемы на ПТ» [Электронный ресурс] // Mculab.ru. 2022. URL: https://mculab.ru/view_article.php?id=64
12. Иванов, П. А. & Сидоров, Н. Г. (2019). Истоковые повторители и усилительные каскады с полевыми транзисторами: учеб. пособие. Самара: Самарский университет, 96 с.
13. Маслов, В. А. (2002). Моделирование и прогнозирование загрязнения окружающей воздушной среды приаэродромных территорий выбросами воздушных судов (дис.канд. техн. наук). Москва, 213 с.
14. ООО «Мета». Дымомер «Мета-01МП-0.1»: паспорт изделия и руководство по эксплуатации. — М.: ООО «Мета», 2018. — 28 с.
15. Шалыгин, А. В. (2020). Методология трёхмерного экологического мониторинга в приаэродромных территориях: монография. Москва: ЦИАМ им. П. И. Баранова, 144 с.

References

1. Emami Javanmard, M., Tang, Y. & Martínez-Hernández, J. A. (2024). Forecasting air transportation demand and its impacts on energy consumption and emission. *Applied Energy*, 364, Article 123031. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.123031.
2. GOST ISO 8178-3-2014. (2014). Reciprocating internal combustion engines. Measurement of combustion product emissions. Part 3. Definitions and methods for measuring exhaust smoke. Moscow: ИПК Издателство Standartov, 36 p.
3. Lepistö, T., Niemi, J.V., Salo, L., Silvonen, V., Elsayed, M., Jäppi, M., Strandén, T., Kylämäki, K., Harni, S.D., Sormunen, P., Manninen, H.E., Timonen, H. & Rönkkö T (2026). Dispersion of ultrafine particle pollution from an international airport: Characteristics and short- and long-term effects in surrounding areas // *Environment International*. Vol. 208. Article 110116., DOI: 10.1016/j.envint.2026.110116.
4. Sliusar, N, Filkin, T, Huber-Humer, M. & Ritzkowski, M. Drone technology in municipal solid waste management and landfilling: A comprehensive review. *Waste Manag.* 2022 Feb 15; 139:1-16. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.12.006
5. Jasiński, R. (2022). Analysis of Particle Emissions from a Jet Engine Including Conditions of Afterburner Use. *Energies*, 15(20), 7696. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/en15207696>
6. Liati, A., Brem, B. T., Durdina, L. et al. (2014). Electron microscopic study of soot particulate matter emissions from aircraft turbine engines. *Environmental Science & Technology* Vol.48(16). P.9417–9426. <https://doi.org/10.1021/es501809b>
7. Kulikov, A. N. (2019). Sensors of the Dielectric Properties of Gas Media and Aerosol Mixtures: Monograph. Moscow: MPEI Publishing House, 146 p.
8. StepByStepInternet.com. (2022). How to Download and Install Arduino on Raspberry Pi [Electronic resource]. Available at: <https://stepbystepinternet.com/install-arduino-raspberry-pi/>.
9. Carminati, M., Ferrari, G., & Sampietro, M. (2014). Capacitive Detection of Micrometric Airborne Particulate Matter for Solid-State Personal Air Quality Monitors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 219, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.08.027>

10. Petrov, A. S. & Gromov, I. P. (2022). Application of Arduino Microcontroller Systems for Environmental Monitoring of Atmospheric Air. Collection of Scientific Papers. Novosibirsk: NSTU, 54–61 p.
11. Mculab.ru. Review of the Article "Basic FET Circuits" [Electronic Resource] // MCULab.ru. 2022. URL: https://mculab.ru/view_article.php?id=64
12. Ivanov, P. A. & Sidorov, N. G. (2019). Source Followers and Amplifier Cascades with Field-Effect Transistors: A Tutorial. Samara: Samara University, 96 p.
13. Maslov, V. A. (2002). Modeling and Forecasting of Air Pollution in Aerodrome Areas by Aircraft Emissions (PhD Dissertation). Moscow, 213 p.
14. Meta LLC. Meta-01MP-0.1 Smoke Meter: Product Data Sheet and Operating Manual. Moscow: Meta LLC, 2018. 28 p.
15. Shalygin, A. V. (2020). Methodology of Three-Dimensional Environmental Monitoring in Aerodrome Areas: Monograph. Moscow: P. I. Baranov Central Institute of Aviation Motors, 144 p.

НАҚТЫ УАҚЫТ РЕЖИМІНДЕ 3D ТҮТІН МЕН АУА САПАСЫН БАҚЫЛАУҒА АРНАЛҒАН ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТТАРЫНА НЕГІЗДЕЛГЕН САНДЫҚ ПЛАТФОРМА

***Аңдатпа.** Әуежайлар авиациялық шығарындылардың айтарлықтай көзі болып табылады, бұл жақын маңдағы тұрғын аудандардағы ауа сапасына кері әсер етеді. Бұл зерттеуде ұшқышсыз ұшу аппараттарына негізделген сандық әуе кеңістігінің түтінін бақылау платформасын әзірлеу және эксперименттік тексеру қарастырылады. Бұл зерттеудің негізгі бағыты - адам денсаулығы мен қоршаған ортаға кері әсер ететін керосинді авиациялық отынның жануы кезінде пайда болатын күйе мен аэрозоль бөлшектерінің концентрациясы. Әзірленген платформа әуе кеңістігінің диэлектрлік қасиеттеріндегі өзгерістерді тіркейтін, оларды сандық жазуға және деректерді беруге қабілетті Arduino және Raspberry Pi микроконтроллерлерімен өңделетін электрлік сигналға айналдыратын сыйымдылықты сенсор қолданылады. 20-100 м биіктікте 3D цилиндрлік траектория бойынша ұшқышсыз ұшу аппараттарының ұшуларымен далалық тәжірибелер жүргізілді. Платформа сонымен қатар Meta-01MP-0.1 түтін өлшегішімен калибрленді. Сенсордың шығыс кернеуінің түтін коэффициентіне қатысты графикалық калибрлеу қисығы құрылды және нәтижелер корреляциялық және регрессиялық талдаудың математикалық тәсілін қолдана отырып өңделді. Аэрозоль бөлшектері мен газ ластаушы заттардың таралуын визуализациялау үшін Python тіліндегі 3D модель және Plotly кітапханасы жасалды. Өлшенген деректер ұсынылған платформаның ауаны бақылау және түтін деңгейін нақты уақыт режимінде болжамды бағалау үшін тиімділігін растайды, бұл оны әуежай аймақтарында және басқа да урбандалған аудандарда қоршаған ортаны бақылау жүйелерінде қолдануға жарамды етеді.*

***Түйін сөздер:** ауаның ластануы, сандық платформа, түтін, 3D ауаны тарату моделі, ҰҰА, қоршаған ортаға әсерді бағалау, қоршаған ортаны бақылау.*

A UAV-BASED DIGITAL PLATFORM FOR REAL-TIME 3D MONITORING OF SMOKE AND AIR QUALITY

***Abstract.** Airfield areas are a source of significant aviation emissions, negatively impacting air quality in nearby residential areas. This study examines the development and experimental validation of a UAV-based digital airspace smoke monitoring platform. The primary focus of the study is the concentration of soot and aerosol particles formed during the combustion of kerosene aviation fuel, which negatively impacts human health and the environment. The developed*

platform uses a capacitive sensor that records changes in the dielectric properties of the airspace, converting them into an electrical signal processed by Arduino and Raspberry Pi microcontrollers capable of digital recording and data transmission. Field experiments were conducted with UAV flights along a three-dimensional cylindrical trajectory at altitudes of 20-100 m. The platform was also calibrated with a Meta-01MP-0.1 smoke meter. A graphical calibration curve for the sensor output voltage versus the smoke coefficient was constructed, and the results were processed using a mathematical approach of correlation and regression analysis. A 3D model in Python and the Plotly library were created to visualize the distribution of aerosol particles and gas pollutants. The measured data confirm the effectiveness of the presented platform for air monitoring and predictive assessment of smoke levels in real time, making it suitable for use in environmental monitoring systems in airport areas and other urbanized areas.

Keywords: air pollution, digital platform, smoke, 3D air distribution model, UAV, environmental impact assessment, environmental monitoring.

Сведение об авторах

Лекерова Фариза Лекеркызы	Старший преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии» АО «Академия Гражданской Авиации», г. Алматы, Казахстан, E-mail: f.lekerova@agakaz.kz
Молдабеков Айдос Кусайнович	Ассоциированный профессор, к.х.н, кафедра «Авиационная техника и технологии» АО «Академия Гражданской Авиации», г. Алматы, Казахстан E-mail: a.moldabekov@agakaz.kz
Сейфула Гүлжан Нұрланқызы	Преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии» АО «Академия Гражданской Авиации», г. Алматы, Казахстан, E-mail: gulzhan.seyfulla@agakaz.kz
Абыл Салима Серикқызы	Магистр технических наук, преподаватель кафедры «Авиационная техника и технологии» «АО Академия гражданской авиации», г. Алматы, Казахстан; e-mail: a.salima@agakaz.kz

Авторлар туралы мәлімет

Лекерова Фариза Лекеркызы	Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан «Әуе техникасы және технологиялары» кафедрасының аға оқытушысы, E-mail: f.lekerova@agakaz.kz
Молдабеков Айдос Кусайнович	Доцент, х.ғ.к., «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, «Әуе техникасы және технологиялары» кафедрасы, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: a.moldabekov@agakaz.kz
Сейфула Гүлжан Нұрланқызы	«Әуе техникасы және технологиялары» кафедрасының оқытушысы, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: gulzhan.seyfulla@agakaz.kz
Абыл Салима Серикқызы	Техника ғылымдарының магистрі, «Әуе техникасы және технологиялары» кафедрасының оқытушысы, «Азаматтық авиация академиясы» АҚ, Алматы қ., Қазақстан, E-mail: a.salima@agakaz.kz

Information about the authors

Fariza Lekerova	Senior Lecturer, Department of “Aviation Engineering and Technology,” JSC “Academy of Civil Aviation,” Almaty, Kazakhstan, E-mail: f.lekerova@agakaz.kz
Aidos Moldabekov	Associate Professor, PhD in Chemistry, Department of “Aviation Engineering and Technology,” JSC “Academy of Civil Aviation,” Almaty, Kazakhstan E-mail: a.moldabekov@agakaz.kz
Gulzhan Seifula	Lecturer, Department of “Aviation Engineering and Technology”, JSC “Academy of Civil Aviation,” Almaty, Kazakhstan, E-mail: gulzhan.seyfulla@agakaz.kz
Salima Abyl	Master of Technical Sciences, Lecturer, Department of “Aviation Engineering and Technology,” JSC “Academy of Civil Aviation,” Almaty, Kazakhstan E-mail: a.salima@agakaz.kz