



АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2023_2_137

МРНТИ 50.01.85

Ф.Л. Лекерова¹, К. Алибекқызы², Ж.К. Азаматова², В.К. Тулаев³,
А.К. Кошекков¹, Қ. Асқадұлы²

¹Академия гражданской авиации, г. Алматы, Казахстан

²Восточно-Казахстанский технический университет имени Д. Серикбаева,
г. Усть-Каменогорск, Казахстан

³Северо-Казахстанский университет имени Манаша Козыбаева, г. Петропавловск,
Казахстан

E-mail: lekerov_92@mail.ru

E-mail: Karlygash.eleusizova@mail.ru*

E-mail: zhanerkeaz@mail.ru

E-mail: tvk30091949@mail.ru

E-mail: abai_koshekov@mail.ru

E-mail: kanat.askaduly@gmail.com

ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫЙ ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ПРИАЭРОДРОМНОЙ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

АЭРОДРОМ НЕГІЗІНДЕГІ ЭКОЛОГИЯЛЫҚ ОРТАНЫҢ ГЕОКЕҢІСТІКТІК ЦИФРЛЫҚ ЕГІЗІ

GEOSPATIAL DIGITAL TWIN OF THE NEAR-AIRDROME ECOLOGICAL ENVIRONMENT

Аннотация. В статье поставлена цель разработки методики повышения достоверности мониторинга уровня загрязнения воздуха в приаэродромной среде в условиях цифровой трансформации бизнес-процессов авиационной отрасли. В качестве механизма достижения цели была аналитически обоснована и выбрана технология «Цифровой двойник». Для эффективного решения данной многоаспектной проблемы в условиях авиационного предприятия был теоретически исследован ряд задач и предложены практические рекомендации. С учетом природно-климатических и географических особенностей аэропорта г. Алматы сформирован вектор атмосферных ингридиентов, загрязняющих приаэродромную среду города. Проведен экспертный анализ значимости ингридиентов загрязнения приаэродромной атмосферной среды г. Алматы. Разработана модель интегрированного оценивания степени воздействия приаэродромной среды обитания на человека с учетом погодных факторов. Разработана структурно-функциональная модель контрольно-измерительного комплекса на базе БПЛА, осуществляющего мониторинг качества воздуха приаэродромного атмосферного 3D-объекта. Разработаны формальные модели оценки и прогнозирования рисков контроля и мониторинга качества воздуха приаэродромной среды в функции статистических характеристик параметров многоагентной контрольно-измерительной системы. Проведен компьютерный эксперимент и построены 3D-модели результатов моделирования.

Ключевые слова: авиационная отрасль, цифровая трансформация, метод, технологии, модель, критерий, вероятность.

Аңдатпа. Мақаланың мақсаты – авиация саласындағы бизнес-процестердің цифрлық трансформациясы жағдайында әуеайлақ маңындағы ауаның ластану деңгейін бақылаудың сенімділігін арттыру әдістемесін әзірлеу. Мақсатқа жету механизмі ретінде «Сандық егіз» технологиясы аналитикалық негізделіп, таңдалды. Осы көп қырлы мәселені авиациялық кәсіпорын жағдайында тиімді шешу үшін бірқатар міндеттер теориялық

тұрғыдан зерттеліп, практикалық ұсыныстары ұсынылды. Алматы қаласы әуежайының табиғи-климаттық және географиялық ерекшеліктерін ескере отырып, Алматы қаласының аэродромының қоршаған ортасын ластайтын атмосфералық ингредиенттер векторы қалыптастырылды. Алматы қаласының аэродромының атмосфералық ортасын ластау ингредиенттерінің маңыздылығына сараптамалық талдау жүргізілді. Ауа райы факторларын ескере отырып, әуеайлақ маңындағы ортаның адамға әсер ету дәрежесін кешенді бағалау моделі әзірленді. Әуеайлақ атмосфералық 3D объектісінің ауа сапасын бақылайтын ұшқышсыз ұшу аппараты негізіндегі бақылау-өлшеу кешенінің құрылымдық-функционалдық моделі әзірленді. Көп агентті бақылау-өлшеу жүйесі параметрлерінің статистикалық сипаттамаларының функциясы ретінде әуеайлақ маңындағы ауаның сапасын бақылау және мониторингілеу тәуекелдерін бағалау және болжау үшін ресми үлгілер әзірленді. Компьютерлік эксперимент жүргізілді және имитациялық нәтижелердің 3D үлгілері құрастырылды.

Түйін сөздер: Авиация саласы, цифрлық трансформация, әдіс, технологиялар, модель, критерий, ықтималдық.

Abstract. The aim of the article is to develop a methodology for improving the reliability of monitoring the level of air pollution in the near-aerodrome environment in the context of the digital transformation of business processes in the aviation industry. As a mechanism for achieving the goal, the Digital Twin technology was analytically substantiated and chosen. To effectively solve this multifaceted problem in the conditions of an aviation enterprise, a number of tasks were theoretically studied and practical recommendations were proposed. Taking into account the natural, climatic and geographical features of the airport in Almaty, a vector of atmospheric ingredients polluting the airfield environment in Almaty has been formed. An expert analysis of the significance of the ingredients of pollution of the airfield atmospheric environment in Almaty was carried out. A model for integrated assessment of the degree of impact of the near-aerodrome environment on a person has been developed, taking into account weather factors. A structural-functional model of a control and measuring complex based on an UAV, which monitors the air quality of an aerodrome atmospheric 3D object, has been developed. Formal models have been developed for assessing and predicting the risks of controlling and monitoring the air quality of the near-aerodrome environment as a function of the statistical characteristics of the parameters of a multi-agent control and measuring system. A computer experiment was carried out and 3D models of the simulation results were built.

Keywords: aviation industry, digital transformation, method, technologies, model, criterion, probability.

Введение. Цифровую трансформацию, которая приходит на смену цифровизации, называют цифровой революцией во всех сферах человеческой деятельности, что повлечет к созданию огромного количества геопространственных данных [1-8]. В результате анализа специалистами «Высшей школы экономики» был создан перечень новых цифровых технологий, интегрированно представляющих цифровую трансформацию, куда вошли: «Нейротехнологии и искусственный интеллект»; «Технологии распределенного реестра»; «Квантовые технологии»; «Новые производственные технологии»; «Технологии умного производства (Smart Manufacturing); «Компоненты робототехники и сенсорики»; «Технологии беспроводной связи»; «Технологии виртуальной и дополненной реальности»; «Цифровой двойник»; «Техническая СМАРТ диагностика» [5]. В настоящее время на практике уже широко используются такие цифровые геосистемные подходы и технологии, как ГИС, BIM и др. BIM – это 3D-модель объекта, связанная с Большими данными, где каждый элемент модели имеет индивидуальную спецификацию [6]. Особенность такой архитектуры состоит в системном единстве, и изменение любого элемента автоматически системно модифицирует информационную архитектуру объекта.

В настоящее время большое прикладное значение приобретает интеллектуальная технология под общим названием «цифровой двойник», которая, по данным компаний Accenture и Dassault Systèmes, в ближайшие 10 лет позволит получить экономический эффект в размере 1,3 триллиона долларов и сокращения выбросов CO₂ на 7,5 Гт. [9, 10, 11].

Цифровой двойник – это цифровой трехмерный информационный образ реальной среды. Технология «Цифровой двойник» только начинает приобретать свой функциональный и информационный облик. Между технологиями на данном этапе пока существует информационный разрыв, что лишает системы цифровой трансформации главного качества – интегрированности. Например, ГИС и реальные объекты другого функцио-

нального назначения пока еще плохо согласуются, и они не интегрированы с системой BIM. Ожидается, что метод BIM свяжет жизненные циклы отраслевых объектов с индивидуальными цифровыми моделями и проектами на основе моделирования и использования общих данных. Такое изменение всей цифровой парадигмы предоставит огромные возможности в отношении создания и управления отраслевым разнообразием.

Интегрирующим фактором в цифровой трансформации является бесшовный 3D-план для управления объектами с использованием внутренних и наружных данных с одним и тем же интерфейсом, что является важным свойством бизнес-модели. Серьезным недостатком следует назвать разрыв между геопространством и реальным объектом, когда одни и те же объекты реального мира могут избыточно храниться в разных проектах, что приводит к неоднородности базы данных. Не существует стандартов для выражения того, что два геосистемных представления описывают один и тот же объект реального мира. Эта проблема, особенно для технологии «Цифровой двойник», может сглаживаться путем интеллектуализации системы на базе формальных подходов с использованием стохастического, имитационного, агентного и нечеткого моделирования.

Методы. Системная методология исследования является базовым обеспечением, которая выбрана целевым ориентиром и интегрирующим механизмом цифровых агентов управления, где в качестве агентов выбраны: контроль, мониторинг, математическое обеспечение, информационное обеспечение на платформе Больших данных, нормативы, техническое обеспечение. В качестве прикладных инструментов формализации методов системного подхода в задачах оценки и прогнозирования экологической динамики используются: экспертные оценки, технологические аналогии, функциональные зависимости, вероятностные и агентные подходы. Для проведения компьютерного эксперимента используется программное приложение, разработанное в предыдущих исследованиях. Результаты моделирования представляются в формате 3D. Статистические данные для моделирования взяты из отчетных документов авиатранспортных предприятий. Для исследования статистического материала на однородность использовались F-критерий Фишера и t-критерий Стьюдента. Для обработки результатов статистических исследований использовался пакет Statistica 10.

Литературный обзор. Ц-двойник это виртуальное представление сложной экосистемы в форме геометрически конфигурированного «облака точек». Преимущества использования технологий «цифровой двойник» были выявлены при исследовании результатов их внедрения в шести отраслях: строительство, производство потребительских товаров, транспорт, науки о жизни, экология и электроника [10]. В строительной отрасли данная технология была успешно реализована при решении задач оптимизации городской среды. В производстве потребительских товаров технология цифровых двойников использовалась при разработке экологических продуктов с помощью 3D-моделирования и симуляции. В области транспорта, науки о жизни, экологии, электрики и электроника решались задачи оптимизации социально-экономических проектов [11]. Применение цифровых двойников в системе обслуживания зданий и сооружений позволило сэкономить 300 млрд долларов и сократить выбросы CO₂.

В работе [12] показано, что цифровые двойники революционным шагом в достижении робастности, под которой понимается устойчивость и обеспечение экономического роста предприятия. Технологию цифровых двойников следует рассматривать как самый эффективный механизм в обеспечении устойчивости в таких сферах, как: окружающая среда, экономика и социальная платформа.

В работе [13] приводятся следующие показатели, которые приобрели положительную тенденцию при внедрении технологии цифровых двойников:

- снижение себестоимости продукции;
- уменьшение системных и операционных рисков;
- внедрение и развитие новых инновационных моделей обслуживания;
- уменьшение потребности в материальных и организационных ресурсах;
- увеличение оборота товаров и услуг.

В реальной практике возникает необходимость в понимании работы цифровых двойников. Ответ следует искать в том, что цифровой двойник является виртуальной сущностью представления продукта или экосистемы в реальном времени, которое можно использовать для моделирования, визуализации, прогнозирования, предоставляющей определенные свойства и функционалы объекта или продукта. Для пользователя цифровой двойник представлен моделью с перечнем переменных, которые можно варьировать, и тем самым прогнозировать поведение объекта. Используя итерации, можно получить результат с достаточно высокой точностью и большой экономией времени и ресурсов. Эти результаты уже в настоящее время подтверждаются на практике, так как моделирование поведения объекта в целом в различных условиях и контекстах может оцениваться визуально или путем объективного контроля. Цифровой двойник позволяет оценивать результат в реальном масштабе времени, что приводит к немедленной реакции по звену обратной связи с целью восстановления нормативной функциональности объекта контроля или его работоспособности. Эта технология давала положительный результат на всех этапах жизненного цикла: проектирования, изготовления, сборки, тестирования, обслуживания и даже утилизации, а на стадии эксплуатации точнее предсказывать их неисправности и заранее производить ремонт.

Однако в большинстве работ рассматривается только техническая область применения цифровых двойников. Цифровой двойник технических систем реально реализует компьютерную модель, которая должна дать ответ на вопрос, как будет работать объект при разных условиях, которые могут задаваться исследователем. Проблема для нетехнических экономических или социальных систем состоит в том, что если в технических системах реакция или воздействия на объект описываются детерминистски или как случайные величины с известными статистическими характеристиками, то для нетехнических систем характерно наличие неопределённостей, не поддающихся адекватному статистическому описанию [14, 15].

В цифровой трансформации сферы экологии и природопользования решение взаимодействия фундаментальных и прикладных исследований на базе технологий цифровых двойников, была решена одна из ключевых задач управления качеством воздуха – экологического мониторинга. С этих позиций рассматривается возможность коренного улучшения системы экологического мониторинга приаэродромной среды в программных документах многих стран, где определены приоритеты важнейших направлений научных исследований в области экологического мониторинга до 2030 г., в числе которых названы: внедрение технологий искусственного интеллекта, активное использование беспилотных летательных аппаратов, систем дистанционного зондирования Земли, создание и использование в экологической отрасли больших данных (Big Data), разработка моделей «цифровых двойников» (Digital Twins). Большой интерес вызывают у специалистов вопросы разработки цифровых двойников в экологических приложениях, где предлагаются два подхода: технологический и концептуальный. В экологии цифровой двойник мониторинга качества воздушной среды представляется как математическая модель, связанная с реальным процессом и непрерывным цифровым потоком данных. Именно непрерывное предметное исследование информационного потока данных определяет разницу технологии Digital Twins от традиционного моделирования систем. На прикладном

уровне «цифровым двойником» «обозначается процесс или объект, динамика состояния которого полностью смоделирована математически, а все важные его показатели оцифрованы, построены соответствующие модели, которые просчитывают все возможные состояния объекта».

Типовая классификация цифровых двойников в экологических проектах насчитывает три разновидности:

1. Информационные, которые подключены к реальной контрольно-измерительной системе и текущую информацию о состоянии объекта в онлайн-режиме передают оператору или встроенной компьютерной системе, которая анализирует и фиксирует в оперативной и внешней памяти факты и результаты контроля.

2. Предиктивные двойники, формирующие автоматически условия эксплуатации и прогнозирования поведения объекта в разных ситуациях, а также при проектировании новых продуктов.

3. Операционные цифровые двойники, моделирующие виртуальную работу компании.

Вместе с тем цифровые двойники в практической реализации имеют и недостатки, состоящие в их сложности и требующие больших затрат на внедрение и обслуживание.

Результаты и обсуждение. Целью исследований данного этапа является аналитическое исследование и выявление наиболее важных компонентов загрязнения воздуха, разработка модели интегральной количественной оценки степени воздействия приаэродромной среды обитания на человека, разработка технологического подхода исследования контролируемого пространства и разработка модели количественного оценивания рисков экологического контроля.

Одной из главных проблем в технологиях цифровых двойников является сбор первичной информации с реального объекта, который подлежит цифровой трансформации и в режиме мониторинга периодически обновляет свое цифровое поле или облако цифровых точек. Для этой цели используются различные датчики. Каждая точка является информационным носителем результатов измерений экспертно обоснованных параметров загрязнения приаэродромной среды. В работе [4] предлагаются следующие показатели, подлежащие мониторингу с учетом их влияние на организм человека:

- загрязненность воздушной среды (СО, пыль), $K_{зн} = 1$;
- качество питьевой воды, $K_{зн} = 1$;
- загрязненность почв и грунтов, $K_{зн} = 1$;
- шум, $K_{зн} = 1$;
- вибрация, $K_{зн} = 1$;
- радиоактивные излучения, $K_{зн} = 1$;
- электромагнитные излучения, $K_{зн} = 1$;
- фактор близости опасного производства, $K_{зн} = 0,3$;
- обеспеченность подъезда пожарных машин, $K_{зн} = 0,3$;
- обеспеченность зелеными насаждениями, $K_{зн} = 0,3$;

В приведенном перечне коэффициент значимости $K_{зн}$ определен для конкретных условий и социально-экономической обстановки расположения аэропорта и научно-технических возможностей службы, осуществляющей экологический мониторинг в районе аэропорта. В работах [1, 2, 3, 10] доказывается, что выбор совокупности показателей загрязнения в приаэродромной среде необходимо осуществлять с учетом геосистемных и социально-экономических факторов конкретного аэропорта, в данном случае, аэропорта г. Алматы. С учетом приведенных доводов и нормативных требований возникает первая задача – сформировать вектор показателей загрязнения воздуха приаэродромной среды и провести экспертный анализ значимости элементов вектора.

В соответствии с нормативами ИКАО список загрязняющих атмосферу аэропортов веществ может быть представлен таблицей 1 [10].

Таблица 1. Перечень загрязняющих веществ [10]

1.1	Продукты полного сгорания топлива:	
	– двуокись углерода	CO ₂
	– водяные пары	H ₂ O
	– оксиды серы	SO _x
1.2	В перечень нормируемых ИКАО загрязняющих атмосферу веществ, характеризующих экологическое совершенство двигателя, входят:	
	– окись углерода	CO;
	– несгоревшие углеводороды	CH;
	– оксиды азота	NO _x (NO, NO ₂);
	– дым (твердые частицы, или сажа)	SN
1.3	В Приложении «А» к «Киотскому Протоколу» указана группа «парниковых» газов:	
	– двуокись углерода	CO ₂ ;
	– метан	CH ₄ ;
	– закись азота	N ₂ O;
	– гидрофторуглероды	(ГФУ);
	– перфторуглероды	(ПФУ);
	– гексафторид серы	SF ₆

Полный список компонентов загрязнения в приаэродромной среде г. Алматы, с учетом табл. 1, включает следующие атмосферные ингредиенты: CO, CO₂, NO, NO₂, SO₂, H₂S, O₃, NH₃ и взвешенные частицы.

Вторая задача исследований состояла в проведении экспертного анализа и определении коэффициентов значимости приведенных выше ингредиентов воздушной приаэродромной среды аэропорта г. Алматы. Результаты экспертного анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты экспертного анализа значимости компонентов загрязнения атмосферы приаэродромной среды аэропорта г. Алматы

Номер варианта	Вес эксперта	Загрязнения атмосферы							
		NO	CO	CO ₂	SO ₂	H ₂ S	NO ₂	O ₃	NH ₃
1	5,8	0,214	0,085	0,057	0,128	0,1	0,2	0,171	0,042
2	5,4	0,144	0,043	0,101	0,217	0,15	0,086	0,188	0,057
3	6	0,129	0,096	0,064	0,225	0,145	0,177	0,048	0,112
4	7,8	0,223	0,089	0,059	0,149	0,134	0,179	0,044	0,119
5	6	0,142	0,158	0,047	0,111	0,079	0,190	0,238	0,031
A _j		0,170	0,094	0,066	0,166	0,123	0,166	0,138	0,072
A _{ip}		1	6	8	3	5	2	4	7

B_j		0,174	0,095	0,065	0,164	0,123	0,168	0,131	0,076
B_{jp}		1	6	8	3	5	2	4	7

Интегральная оценка степени воздействия приаэродромной среды обитания на человека характеризуется показателем A , который подсчитывается в баллах по формуле [2, 3]:

$$A = \sum_{i=1}^n (\text{ФОС}_i \times K_{\text{зн}i} \times K_{\text{вр}i} / K_{\text{бф}}), \quad (1)$$

где ФОС_i – i -й показатель окружающей среды в баллах; $K_{\text{зн}i}$ – коэффициент значимости i -го показателя; $K_{\text{вр}i}$ – коэффициент времени пребывания (воздействия) в среде i -го показателя; $K_{\text{бф}}$ – коэффициент силы ветра (Бофорта). При этом отдельно учитываются $K_{\text{вр}}$ в жилище, равный 0,85; на дворовой территории (среди антропогенных агентов) – 0,1; на улице – 0,05; $K_{\text{св}}$ изменяется от 1 до 12. Комплексная оценка A количественно вычисляется в результате использования программного приложения и статистики Больших данных, накапливающихся на сервере Центра экологического контроля аэропорта в разделе «Цифровой двойник».

В данной работе вектор данных загрязнения, поступающих от расположенных на БПЛА датчиков, является результатом сканирования поверхности виртуального трехмерного объема в форме условного атмосферного цилиндра высотой h и радиусом R , покрывающего территорию аэропорта. Параметры h и R вводятся оператором Центра экологического контроля, территориально расположенным в районе аэропорта. Контролируемое пространство рассматривается как информационный массив размерностью $2\pi R/\Delta h$ на $h/\Delta h$. В качестве контрольно-измерительного комплекса на базе летательного аппарата рекомендуется использовать беспилотный комплекс Геоскан 401.

Общие требования к системе мониторинга качества приаэродромной воздушной среды состоят в обеспечении необходимой достоверности контроля, технологичности и малозатратности. Достоверность вычисляется из выражения:

D – 1-вероятная ошибка ложного брака – вероятная ошибка необнаруженного брака.

Данные ошибки контроля вычисляются аналитически по известным или новым разработанным формальным моделям. Конструктивно и технологически система контроля и мониторинга реализуется в композиции БПЛА, измерительного блока и компьютерного блока предварительной обработки и хранения информации.

В исследовании воздушная среда представляется в форме цилиндра с заданными параметрами радиуса (R), высоты (h) и начальной («мировой») координатой трехмерного исследования (X_0, Y_0, Z_0). Высота и радиус исследуемого цилиндра задается оператором. Рабочий, наиболее востребованный, режим обследования цилиндра, осуществляется по внешней поверхности объекта. Точность контроля загрязнения определяется метрологическими характеристиками инструментальных средств измерения химических компонентов загрязнения воздуха и детальностью анализа поверхности цилиндра ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$), которая задается оператором. Максимальная горизонтальная скорость квадрокоптера 50 км/ч (14 м/с), минимальная относительная безопасная высота полета 3 м, максимальная – 500 м. Продолжительность одного сеанса-вылета (от взлета до посадки) определяется емкостью аккумулятора БПЛА и массой полезной нагрузки, и достигает 60 минут. Отклонение фактических траекторий полета от заданных не превышает 0,6 м. Комплекс позволяет осуществлять объемное исследование заданного 3-х мерного объекта и применять новые методы анализа и интерпретации данных, что обеспечит построение объемной модели загрязнения воздушного бассейна на достоверном уровне. С применением БПЛА

появилась реальная возможность изучать объекты в форматах 2D и 3D с высокой скоростью и необходимой точностью. Предлагаемая система управления полетами предоставляет возможность совершать полеты на разной высоте, с разной скоростью, с точным обтеканием рельефа. Прилагаемые к комплексу программные средства обеспечивают экспорт результатов в формате: *.gdb, *.accdb, *.mdb.

Программно-управляемый БПЛА с количеством датчиков $m=8$, измеряет концентрацию загрязнения в каждой объемной координате «цилиндра» (X_i, Y_i, Z_i) , и накапливает эту информацию в бортовой компьютерной памяти за время сеанса контроля. По завершении сеанса информация передается на общий сервер локального Центра экологического контроля и пополняет общую базу данных, формируя большие данные. В Центре контроля осуществляется глубокая обработка результатов измерения, поступающих с датчиков БПЛА.

В связи с тем, что на коммерческом рынке предлагается большое разнообразие бытовых и профессиональных средств контроля газовой среды, при окончательном выборе гаджета следует особое внимание обратить на возможность контроля диоксида азота (NO_2), который является высокотоксичным компонентом в отработавших газах авиационных двигателей. Даже в небольших концентрациях он вызывает поражение лёгких, уменьшает содержание в крови гемоглобина и т.д. Предельно допустимая концентрация (ПДК) содержания NO_2 в воздухе контролируемой зоны составляет 2 мг/м^3 . Анализ показывает, что не все гаджеты обладают возможностью контроля данного компонента. Так, предлагаемый для практического использования прибор Air Sensor, согласно рекламе, кроме общепринятых индикаторов качества воздуха (CO_2 и $\text{PM}_{2.5}$), может измерять концентрацию угарного газа (CO), диоксид азота (NO_2) и озон (O_3). Эта многофункциональность привела к повышенной стоимости прибора. Но, вместе с положительными отзывами на технические возможности данного прибора, существуют и негативные мнения. В данной статье авторы предлагают переносной портативный газоанализатор для измерения массовой концентрации токсичных газов GasAlertMicro 5. Внешний вид прибора GasAlertMicro 5 приведен на рис. 1. Максимальная канальность прибора 5; контролируемые газы: CO , CO_2 , H_2S , CL_2 , NH_3 , O_3 , O_2 , SO_2 , NO_2 , HC_1 ; есть USB-адаптер.



Рисунок 1. Переносной портативный газоанализатор для измерения массовой концентрации токсичных газов GasAlertMicro 5 [15]

Обработка данных с датчиков загрязнения технологически осуществляется в два этапа. Первым этапом осуществляется запись первичных измерительных данных в абсолютной форме в бортовую БПЛА базу данных, вторым этапом – предварительная обработка данных и запись результатов обработки также в бортовую базу данных. Предварительная обработка данных осуществляется по нейронному принципу. На втором этапе предвари-

тельной обработки контрольно-измерительных результатов осуществляется оценка статистической однородности элементов выборки по критериям Фишера и Стьюдента. В случае отклонения гипотезы однородности при уровне значимости $\alpha=0,05$ возможно повторное цифровое сканирование поверхности экологического 3D-цилиндра. Математическая предварительная обработка осуществляется связкой Arduino UNO (A) и Raspberry Pi (R), которые используются функционально таким образом, что Arduino UNO выполняет роль микроконтроллера, а в Raspberry Pi – процессора. Подключение Arduino UNO к Raspberry Pi показано на рис. 2.

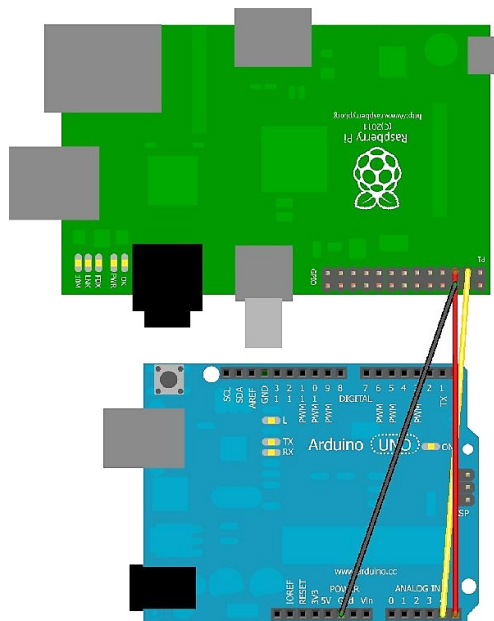


Рисунок 2. Подключение Arduino к Raspberry Pi [15]

Данное подключение продиктовано тем, что Raspberry Pi не работает в режиме реального времени ОС. Поэтому этой функцией загружается Arduino UNO. В подобном решении используются 14 вход/выходов, 6 из которых используются как подключения к датчикам. Подключение и передача информации осуществляется с помощью стандартной двухпроводной последовательной шины специализированного I2C интерфейса. С Raspberry Pi и коммуникатором I2C можно соединить Pi с одной или несколькими платами Arduino. Информация после обработки бортовой компьютерной связкой поступает в бортовую БД. После завершения полета БПЛА информация из бортовой БД передается в центральную базу данных (BigDate) системы «цифровой двойник».

В Центре мониторинга и управления экологической средой аэропорта осуществляется завершающая фаза обработки оперативных данных переданных с БПЛА. Ключевой задачей данной фазы является оценка и прогнозирование экологических рисков. Юридически необходимость оценки проектных и системных рабочих рисков регламентируется последним дополнением к стандарту ИСО 2015, где указывается, что «Риск теперь пронизывает весь стандарт и встроен в целом в систему управления, становится ее неотъемлемым свойством, а не представляет собой ее часть». Риски появляются в системах управления на стадии контроля и принятия решения [14, 15]. Как отмечается в данных работах, риски являются обязательным следствием того, что процесс измерения технологически и на формальном уровне оперирует неопределенностями, как на параметрическом уровне,

так и в среде данных. Качественно и метрологически риски являются ошибками контроля, которые принято интерпретировать как ложный и необнаруженный брак (или отказ). Количественно эти ошибки оцениваются расчетными вероятностями. В данном предметном случае $P_{лб}$ – вероятность ложного брака, $P_{нб}$ – вероятность необнаруженного брака. Этим вероятностям также придают прагматический экономический смысл, как риск «производителя работ» и риск «потребителя работ». Таким образом, в новой модели цифровой трансформации «Цифровой двойник» процесс мониторинга качества воздуха в приаэродромной среде является задачей разработки формального решения количественного оценивания и прогнозирования рисков в функции статистических характеристик параметров многоагентной контрольно-измерительной системы. В известных предыдущих исследованиях были разработаны вероятностные модели на примере нижнего ограничения контролируемого параметра и для примера допускового нормативного ограничения. Для новой гипотезы верхнего предельного ограничения была разработана математическая модель оценки и прогнозирования рисков, имеющая следующий вид:

$$P_{лб} = \sum_{t=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{z_i} e^{-\frac{z^2}{2}} dz; \quad P_{нб} = \sum_{t=1}^n \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{t_i}^{t_{i+1}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{z_i}^{+\infty} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (2)$$

где вероятность необнаруженного брака – $P_{нб}$, а вероятность ложного брака – $P_{лб}$. Параметр t получен путем известной в математике операции центрирования и нормирования переменной интегрирования по среднему квадратическому отклонению функции распределения.

В данном модельном подходе под необнаруженным браком (отказом) считается случай, когда контролируемый параметр находится за допустимыми пределами, а система контроля регистрирует факт нахождения параметра в допустимых пределах. И наоборот, когда контролируемый параметр находится в допустимых пределах, а система контроля регистрирует факт нахождения параметра за допустимыми пределами. В приведенных моделях используется гипотеза принадлежности статистических законов распределения всех параметров к закону Гаусса. Путем модификации предельных значений и принятия гипотезы распределения диагностического параметра по закону Вейбулла, а погрешности измерения по закону Гаусса, были получены математические выражения вычисления вероятности $P_{лб}$ и $P_{нб}$ для приведенных условий:

$$P_{лб} = \sum_{i=1}^k \left(e^{-\frac{S_i^\beta}{\alpha}} - e^{-\frac{S_{i+1}^\beta}{\alpha}} \right) \times \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{S_B}^{S_i + 3\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2}} dy, \quad (3)$$

$$P_{нб} = \sum_{i=1}^k \left(e^{-\frac{S_i^\beta}{\alpha}} - e^{-\frac{S_{i+1}^\beta}{\alpha}} \right) \cdot \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} \int_{S_B}^{S_i - 3\sigma_y} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} dy. \quad (4)$$

Для проведения компьютерного эксперимента была использована программа. В формате 3D на рис. 3 представлен результат компьютерного моделирования, где проявляется визуально пространственная системная связь статистических параметров контроля и интегрального показателя качества контроля достоверности D .

В случае демонстрации результатов компьютерного моделирования в формате 2D, возникла бы необходимость в производстве, на примере данной задачи, порядка десяти информационных разрезов. Анализ подобного множества иллюстраций не представляется возможным, чтобы делать качественные выводы.

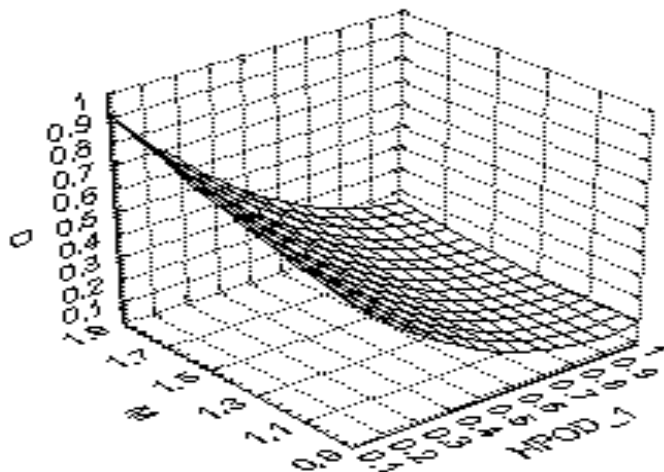


Рисунок 3. 3D-модель достоверности (D, %) в функции отношения неопределенности измерения (V, %) к неопределенности контролируемого параметра и значений норматива KRSR

Выводы. Целью статьи является разработка методики повышения достоверности мониторинга уровня загрязнения воздуха в приаэродромной среде в условиях цифровой трансформации бизнес-процессов авиационной отрасли на примере аэропорта г. Алматы.

В качестве механизма достижения цели была аналитически обоснована и выбрана технология «Цифровой двойник». Для эффективного решения данной многоаспектной проблемы в условиях аэропорта г. Алматы были теоретически исследованы и решены актуальные задачи и предложены практические рекомендации.

С учетом природно-климатических и географических особенностей аэропорта г. Алматы сформирован вектор атмосферных ингредиентов, загрязняющих приаэродромную среду города.

Проведен экспертный анализ значимости ингредиентов загрязнения приаэродромной атмосферной среды г. Алматы.

Разработана модель интегрированного оценивания степени воздействия приаэродромной среды обитания на человека с учетом погодных факторов.

Разработана структурно-функциональная модель контрольно-измерительного комплекса на базе БПЛА, осуществляющая мониторинг качества воздуха приаэродромного виртуального атмосферного 3D-объекта.

Разработаны формальные модели оценки и прогнозирования рисков контроля и мониторинга качества воздуха приаэродромной среды в функции статистических характеристик параметров многоагентной контрольно-измерительной системы.

Проведен компьютерный эксперимент, построены 3D-модели результатов моделирования и предложены практические выводы.

Список литературы:

1. Цифровой Казахстан – официальный сайт Государственной программы «...digital.kz»
2. Роджерс Д.Л. Цифровая трансформация: практическое пособие / пер. с англ. – М.: Точка, 2017. – С. 7.
3. Грибанов Ю.И. Цифровая трансформация социально-экономических систем на основе развития института сервисной интеграции: дис. ... д-ра экон. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный экономический университет, 2019. – URL: <https://unicon.ru/sites/default/files/dissgribanovui.pdf> (дата обращения: 08.10.2020).
4. Прохоров А., Коник Л. Цифровая трансформация: анализ, тренды, мировой опыт. – М.:

- АльянсПринт, 2019. – 368 с.
5. Абдрахманова Г.И., Быховский К.Б., Веселитская Н.Н., Вишневский К.О., Гохберг Л.М. Цифровая трансформация отраслей: стартовые условия и приоритеты // XXII Международная научная конференция по проблемам развития экономики и общества. – Москва, 2021. – С. 11-16.
 6. <https://www.gim-international.com/content/article/bridging-the-gap-between-geospatial-and-constructi...>
 7. Big Data - что такое системы больших данных? Развитие...//
 8. promdevelop.ru/industry/big-data.
 9. Большие данные в авиации: 4 практических примера
 10. bigdataschool.ru/blog/большие-данны...
 11. Цифровые двойники: кто и зачем их использует |
 12. dzen.ru/...cifrovye-dvoyniki-cto...zachem...ispolzuet-...
 13. Устойчивое развитие и цифровые двойники / habr.com/ru/company/ds/blog/566252/
 14. Зачем нужна технология цифровых двойников
 15. ramax.ru/Все/...-dvoynik-cto-eto-takoe...
 16. Что такое цифровой двойник (Digital twin): технология и ее применение future2day.ru/tehnologiya-cifrovyyh...
 17. Цифровой двойник// ru.wikipedia.org/wiki/
 18. Yesmagambetova Marzhan, Keribayeva Talshyn, Koshekov Kairat, Belginova Saule, Alibekkyzy Karlygash, Ospanov Yerbol. Smart technologies of the risk-management and decision-making systems in a fuzzy data environment // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – Vol. 28. – No. 3, December 2022. – ISSN: 2502-4752. – DOI: 10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1-1x.
 19. Alibekkyzy K, Wojcik W, Vyacheslav K, Belginova S. Robust data transfer paradigm based on VLC technologies // Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – Little Lion Scientific. 15th February, 2021. – Vol.99. – No 3.

References

1. Cifrovoy Kazahstan – oficial'nyj sajt Gosudarstvennoj programmy «...digitalkz.kz
2. Rodzhers D.L. Cifrovaya transformaciya: prakticheskoe posobie / per. s angl. – M.: Tochka, 2017. – S. 7.
3. Gribanov YU.I. Cifrovaya transformaciya social'no-ekonomicheskix sistem na osnove razvitiya instituta servisnoj integracii: dis. ... d-ra ekon. nauk. SPb.: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj ekonomicheskij universitet, 2019. – URL: <https://unecon.ru/sites/default/files/dissgribanovui.pdf> (data obrashcheniya: 08.10.2020).
4. Prohorov A., Konik L. Cifrovaya transformaciya: analiz, trendy, mirovoj opyt. – M.: Al'yansPrint, 2019. – 368 s.
5. Abdrahmanova G.I., Byhovskij K.B., Veselitskaya N.N., Vishnevskij K.O., Gohberg L.M. Cifrovaya transformaciya otraslej: startovye usloviya i priorityety. XXII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya po problemam razvitiya ekonomiki i obshchestva. – Moskva, 2021. – S. 11-16.
6. <https://www.gim-international.com/content/article/bridging-the-gap-between-geospatial-and-constructi...>
7. Big Data - chto takoe sistemy bol'shih dannyh? Razvitie...//
8. promdevelop.ru/industry/big-data.
9. Bol'shie dannye v aviacii: 4 prakticheskix primera
10. bigdataschool.ru/blog/bol'shie-dann...
11. Cifrovye dvoyniki: kto i zachem ih ispol'zuet |
12. dzen.ru/...cifrovye-dvoyniki-cto...zachem...ispolzuet-...
13. Ustojchivoe razvitie i cifrovye dvoyniki / habr.com/ru/company/ds/blog/566252/
14. Zachem nuzhna tekhnologiya cifrovyyh dvoynikov
15. ramax.ru/Vse/...-dvoynik-cto-eto-takoe...
16. Chto takoe cifrovoy dvoynik (Digital twin): tekhnologiya i ee primenenie future2day.ru/tehnologiya-cifrovyyh...
17. Cifrovoy dvoynik// ru.wikipedia.org/wiki/
18. Yesmagambetova Marzhan, Keribayeva Talshyn, Koshekov Kairat, Belginova Saule, Alibekkyzy Karlygash, Ospanov Yerbol. Smart technologies of the risk-management and decision-making systems in a fuzzy data environment // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – Vol. 28. – No. 3, December 2022. – ISSN: 2502-4752. – DOI: 10.11591/ijeecs.v28.i3.pp1-1x
19. Alibekkyzy K, Wojcik W, Vyacheslav K, Belginova S. Robust data transfer paradigm based on VLC technologies. Journal of Theoretical and Applied Information Technology. – Little Lion Scientific. 15th February, 2021. – Vol.99. – No 3.