

Научная статья
УДК 338
<https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3>

**Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества
опасных производственных объектов на металлургическом предприятии:
структура и алгоритмы**

**Михаил Юрьевич Наркевич¹✉, Оксана Сергеевна Логунова²,
Михаил Борисович Аркулис³, Азат Иреквич Сагадатов⁴,
Сергей Сергеевич Климов⁵, Вероника Валерьевна Кабанова⁶,
Антон Андреевич Николаев⁷, Денис Исхакович Дерябин⁸**

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова,
Магнитогорск, Россия

¹narkevich_mu@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

²logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

³arkulis78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3006-9968>

⁴azat0680@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1982-3421>

⁵sergey.klimov.2002@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7215-9083>

⁶nika_homework@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9253-6942>

⁷aanton2001@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6813>

⁸shalender@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7622-1294>

Аннотация. Целью данного исследования является обоснование использования прикладной цифровой платформы (далее – ПЦП) при проведении экспертизы элементов опасных производственных объектов (далее – ОПО) металлургического предприятия. Внедрение указанной платформы соответствует приоритетному направлению научно-технологического развития Российской Федерации: «Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта»¹ и позволяет повысить конкурентоспособность экспертизы опасных производственных объектов. В ходе исследования разработана структура прикладной цифровой платформы, которая учитывает получение информации о состоянии элементов ОПО с помощью беспилотных летательных аппаратов, движущихся по модельной траектории и использующих комплекс алгоритмов для реализации программных модулей. Программные модули выполняют функции анализа текущего состояния элементов ОПО, изучают динамику разрушения и осуществляют построение цифровой тени элементов ОПО.

© Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Аркулис М. Б., Сагадатов А. И., Климов С. С., Кабанова В. В., Николаев А. А., Дерябин Д. И., 2022

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

Исследования проводятся с 01.09.2021 по настоящее время в условиях ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Были разработаны структура ПЦП, комплекс программных модулей для оценки состояния и динамики качества ОПО с применением ПЦП, алгоритмы анализа текущего и будущего состояния качества ОПО; реализованы 10 модулей на трех технологических уровнях. С учетом того, что при использовании цифровой тени ОПО характеристика опасного производственного объекта возможна только в условиях получения информации о его состоянии, перспективным направлением дальнейших исследований является создание цифрового двойника объекта. Синтез цифровых двойников позволит выполнить накопление ретроспективной информации об изменении состояния ОПО.

Ключевые слова: прикладная цифровая платформа, опасные производственные объекты, карта программных модулей по уровням прикладной цифровой платформы, алгоритмы анализа текущего и будущего состояния качества

Благодарность. Исследования выполняются при финансовой поддержке по договору № 247715 от 05.07.2021 г. между ПАО «ММК» и ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г. И. Носова» «Разработка и применение методик контроля территорий, зданий и сооружений ПАО «ММК» с использованием беспилотных воздушных судов (БВС)».

Для цитирования: Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Аркулис М. Б., Сагадатов А. И., Климов С. С., Кабанова В. В., Николаев А. А., Дерябин Д. И. Прикладная цифровая платформа для оценки динамики качества опасных производственных объектов на металлургическом предприятии: структура и алгоритмы // Вестник Череповецкого государственного университета. 2022. № 5 (110). С. 29–48. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3>.

Applied digital platform for assessing the dynamics of the quality of hazardous industrial facilities at a metallurgical enterprise: structure and algorithms

Mikhail Yu. Narkevich^{1✉}, Oksana S. Logunova², Mikhail B. Arkulis³,
Azat I. Sagadatov⁴, Sergey S. Klimov⁵, Veronika V. Kabanova⁶,
Anton A. Nikolaev⁷, Denis I. Deryabin⁸

^{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}Nosov Magnitogorsk State Technical University,
Magnitogorsk, Russia,

¹narkevich_mu@mail.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>

²logunova66@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>

³arkulis78@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3006-9968>

⁴azat0680@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1982-3421>

⁵sergey.klimov.2002@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7215-9083>

⁶nika_homework@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9253-6942>

⁷aanton2001@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4254-6813>

⁸shalender@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7622-1294>

Abstract. The purpose of the study is to justify the use of an applied digital platform in the examination of elements of hazardous industrial facilities (HIF) at a metallurgical enterprise. The introduction of an applied digital platform corresponds to the priority areas of scientific and technological development in the Russian Federation: “Transition to advanced digital, intelligent production technologies, robotic systems, new materials and design methods, development of systems for processing large amounts of data, machine learning and artificial intelligence” and increasing competitiveness expertise of hazardous industrial facilities. In the course of the study, the

structure of the applied digital platform (ADP) has been developed, which takes into account obtaining information about the state of the HIF elements, using unmanned aerial vehicles that move along a model trajectory and applying a set of algorithms for the implementation of software modules. Software modules perform the functions of analyzing the current state of HIF elements, studying the dynamics of destruction and building a digital shadow of HIF elements. The studies have been carried out since 09.01.2021 to the present at PJSC “Magnitogorsk Iron & Steel Works”. In the course of the study, the structure of the ADP, a set of software modules for assessing the state and dynamics related to the quality of hazardous industrial facilities using an applied digital platform, algorithms for analyzing the current and future state of the quality of hazardous industrial facilities were developed; 10 modules were implemented at three technological levels. When using the digital shadow of the hazardous facility, it is possible to characterize a hazardous industrial facility only in the conditions of obtaining information on its state, thus a promising direction of further research is the development of a digital twin of the facility. The synthesis of digital twins will allow accumulating retrospective information on the change in the state of HIF.

Keywords: applied digital platform, hazardous industrial facilities, map of software modules by levels of the applied digital platform, algorithms for analyzing the current and future quality state

Acknowledgements. The studies are carried out with financial support under agreement No. 247715 of 05.07.2021 between PJSC “Magnitogorsk Iron & Steel Works” and FSBEI HE “Nosov Magnitogorsk State Technical University” “Development and application of methods for monitoring territories, buildings and structures of PJSC “Magnitogorsk Iron & Steel Works” using unmanned aircraft (UMA)”.

For citation: Narkevich M. Yu., Logunova O. S., Arkulis M. B., Sagadatov A. I., Klimov S. S., Kabanova V. V., Nikolaev A. A., Deryabin D. I. Applied digital platform for assessing the dynamics of the quality of hazardous industrial facilities at a metallurgical enterprise: structure and algorithms. *Cherepovets State University Bulletin*, 2022, no. 5 (110), pp. 29–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2022-5-110-3>.

Введение

Развитие приоритетного направления национального проекта «Наука» («Переход к передовым цифровым, интеллектуальным производственным технологиям, роботизированным системам, новым материалам и способам конструирования, создание систем обработки больших объемов данных, машинного обучения и искусственного интеллекта»¹) послужило стимулом для активизации процессов синтеза цифровых платформ. Под *прикладной цифровой платформой* в рамках исследования понимается система алгоритмизированных отношений и взаимодействий (*InterActive*) между системными компонентами в едином информационном поле², приводящее к повышению точности информации при осуществлении экспертной оценки за счет приме-

¹ Стратегия научно-технологического развития Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 1 декабря 2016 г. № 642). URL: <http://static.kremlin.ru/media/acts/files/0001201612010007.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

² Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Корниенко В. Д., Калитаев А. Н., Суровцов М. М., Луганская Д. А., Чернышева А. С. Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20, № 1. С. 50–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60>.

нения пакета цифровых технологий при работе с данными и снижения влияния человеческого фактора.

Современный уровень развития средств вычислительной техники и программного обеспечения в области обработки фото- и видеопотоков позволяет создавать программные платформы, выполняющие комплексные решения задач, реализация которых до настоящего времени происходила на основе традиционных органолептических технологий¹. Такие технологии оценки определяются государственными и отраслевыми стандартами, устанавливающими графические шаблоны и правила оценки объекта².

Подробное исследование проблемы повышения конкурентоспособности экспертной оценки опасных производственных объектов³ доказало необходимость создания многоуровневой комплексной прикладной цифровой платформы, включающей изменение инструментов сбора информации для принятия решений, проектирование и разработку программного обеспечения для подготовки и обработки фото- и видеоинформации, а также переобучение кадрового состава.

В статье представлены результаты синтеза прикладной цифровой платформы с целью использования ОПО и их элементов при трансформации системы управления на металлургическом предприятии. Тестирование платформы выполнено для зданий и сооружений производственных цехов, которые являются элементами ОПО.

¹ Molchanova K. M., Trushkina N. V., Katerna O. K. Digital platforms and their application in the aviation industry // Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management. 2020. Vol. 3. P. 83–98. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2020-3-8>; Тимошкина М. В., Соловьева Е. В. Оценка качества, надежности и безопасности зданий и сооружений, применяемых на опасных производственных объектах // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12, № 6. URL: <https://esj.today/PDF/47SAVN620.pdf> (дата обращения: 20.03.2022); Саттарова Г. С., Акимбекова Н. Н., Комлева Е. В. Информационная система мониторинга промышленной безопасности на опасных производственных объектах // Автоматика. Информатика. 2016. № 1 (38). С. 23–28.

² Отраслевой стандарт ОСТ 14-4-73 Сталь. Метод контроля макроструктуры литой заготовки (слитка), полученной методом непрерывной разливки. [Б. м.]: [б. и.], 1973. 18 с.; ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ, 2014. 55 с.; Бычков А. А. и др. Руководящий документ РД-22-01-97 Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026286> (дата обращения: 20.03.2022).

³ Наркевич М. Ю., Корниенко В. Д., Полякова М. А. Визуальный контроль как основа для разработки автоматизированных систем дистанционного контроля и оценки качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 5. С. 570–576. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-570-576>; Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Корниенко В. Д., Николаев А. А., Тюлюмов А. Н., Злыдарев Н. В., Дерябин Д. И. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной безопасности: эмпирическая основа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19, № 3. С. 90–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>.

Основная часть

Методы

Структура прикладной цифровой платформы для экспертной оценки элементов опасных производственных объектов

Разработка новой технологии применения экспертных оценок для оценки качества опасных производственных объектов металлургического предприятия с целью повышения ее конкурентоспособности потребовала создания определенных моделей, методик, алгоритмов и комплекса программных модулей. Эти компоненты составили основу прикладной цифровой платформы. На рис. 1 приведена структура ПЦП, которая была использована для получения и обработки данных в ходе проведения экспертизы ОПО.

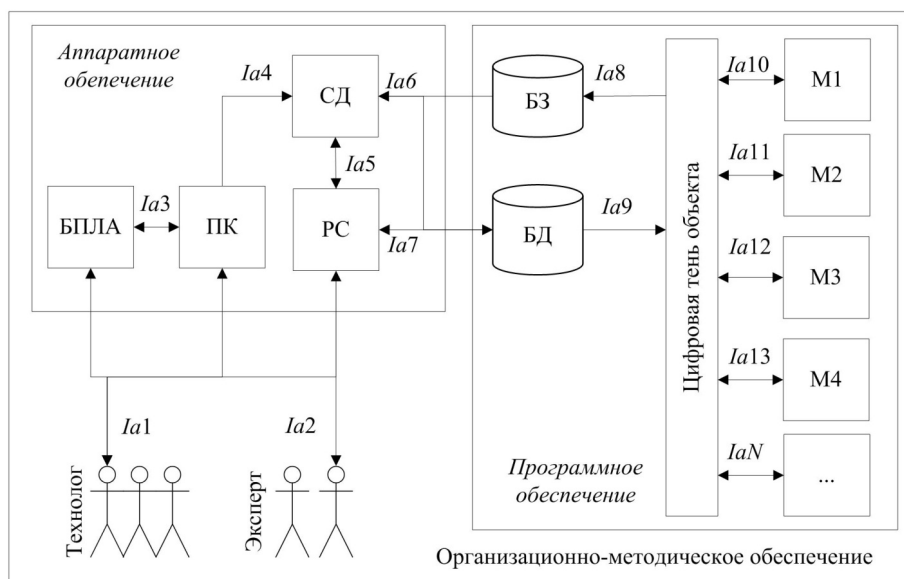


Рис. 1. Структура прикладной цифровой платформы для экспертной оценки качества опасных производственных объектов:

БПЛА – беспилотный летательный аппарат; ПК – переносной компьютер;
РС – рабочая станция; СД – сервер данных; БД – база данных; БЗ – база знаний;
М1, М2, ... – программные модули

На рис. 1 введены обозначения для описания взаимодействия между компонентами цифровой платформы. Данные обозначение представлены в таблице.

Можно выделить следующие основные компоненты ПЦП для экспертной оценки ОПО:

– аппаратное обеспечение платформы, благодаря которому осуществляется процесс сбора, хранения и передачи информации о показателях качества ОПО. Отличительная особенность ПЦП – введение в состав аппаратного обеспечения БПЛА, позволяющего выполнять фронтальное исследование поверхности ОПО;

- программное обеспечение, включающее несколько слоев организации и реализующее хранение и обработку данных, а также генерирующее различные варианты решений на основе базы знаний;
- кадровое обеспечение, подразумевающее наличие коллектива технологов, ведущих техническую подготовку экспертизы, и экспертов, изучающих как сам объект, так и его цифрового двойника для принятия решений.

Таблица

**Перечень обозначений видов взаимодействия
между компонентами цифровой платформы**

№	Обозначение	Суть взаимодействия (InterAction)
1	<i>Ia1</i>	Взаимодействие технолога с аппаратным обеспечением с целью подготовки БПЛА, передачи данных с БПЛА на ПК и РС
2	<i>Ia2</i>	Взаимодействие экспертов с РС для получения данных о результатах обследования объектов с помощью БПЛА и цифровой тени объекта
3	<i>Ia3</i>	Взаимодействие БПЛА с ПК с целью сохранения и передачи данных о состоянии объекта в виде фото- и видеопотоков на СД
4	<i>Ia4</i>	Взаимодействие ПК с СД для передачи данных о результатах обследования ОПО
5	<i>Ia5</i>	Двухстороннее взаимодействие СД и РС с целью формирования ответов на запрос эксперта
6	<i>Ia6</i>	Взаимодействие БЗ с СД для сохранения результатов принятия решений по экспертной оценке ОПО
7	<i>Ia7</i>	Двухстороннее взаимодействие РС и БД с целью сохранения и извлечения фото- и видеопотока по результатам экспертной оценки
8	<i>Ia8</i>	Взаимодействие цифровой тени ОПО с БЗ по результатам принятия решений экспертом на основе фото- и видеопотоков
9	<i>Ia9</i>	Взаимодействие БД с цифровой тенью ОПО
10	<i>Ia10– Ia13</i>	Взаимодействие программных модулей с цифровой тенью ОПО при обработке информации в текущих условиях и прогнозировании нового состояния ОПО

Введение ПЦП обусловило необходимость изучения возможностей БПЛА для фронтального обследования объектов как на российском, так и на мировом уровне.

Комплекс программных модулей для оценки состояния и динамики качества опасных производственных объектов с использованием прикладной цифровой платформы

Исходными данными для работы программных модулей служат изображения ОПО, полученные с помощью БПЛА, после применения методики формализации.

Схема указанной методики приведена на рис. 2.

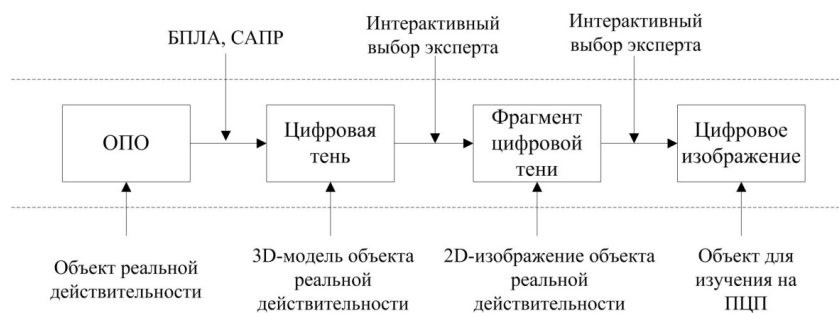


Рис. 2. Схема методики формализации ОПО, применяемая к объекту изучения на цифровой платформе: САПР – система автоматизированного проектирования

Суть данной методики состоит в переходе от объекта реальной действительности к возможному объекту, который используется цифровой платформой.

Согласно рис. 1, на ПЦП определены две роли: технолога и эксперта. Технолог производит подготовку информации на основе ПЦП для ее использования экспертом в процессе экспертизы. В функционал технолога входит получение сведений о состоянии ОПО с помощью БПЛА и их передача на ПЦП для формирования цифровой тени. Далее, используя цифровую тень, эксперт определяет фрагменты, которые подвергаются тщательному исследованию и доставляются как цифровые изображения на ПЦП в качестве исходных данных в комплекс программных модулей.

Комплекс программных модулей формируется из трех уровней (см. рис. 3):

- технологической подготовки исходных данных (цифрового изображения), построенного на типовых алгоритмах обработки изображений и необходимого для приведения изображения к типовому виду (к определенной яркости и контрастности);
- изучения текущего состояния объекта по выбранным экспертом изображениям цифровой тени, которые в дальнейшем должны быть подвергнуты сегментации и квалитметрической оценке;
- прогнозирования будущего состояния ОПО после оценки динамики изменения качества.

Настоящий комплекс программных модулей включает десять составляющих (см. рис. 3). Программные модули связаны определенными информационными потоками, которые устанавливают порядок перехода между модулями и непосредственных исполнителей работ. Для отображения схемы информационных потоков введем обозначение исполнительных уровней: *R* – уровень исследователя (Researcher); *T* – уровень функционального технолога (Technologist); *E* – уровень эксперта (Expert). Уровень *R* предназначен для подготовки изображений к экспертной оценке, уровень *T* – для их технологической обработки.



Рис. 3. Карта программных модулей по уровням ПЦП для оценки текущего и будущего состояния ОПО

При указанных условиях сформирована информационная модель для оценки состояния и динамики качества ОПО с использованием ПЦП (см. рис. 4).

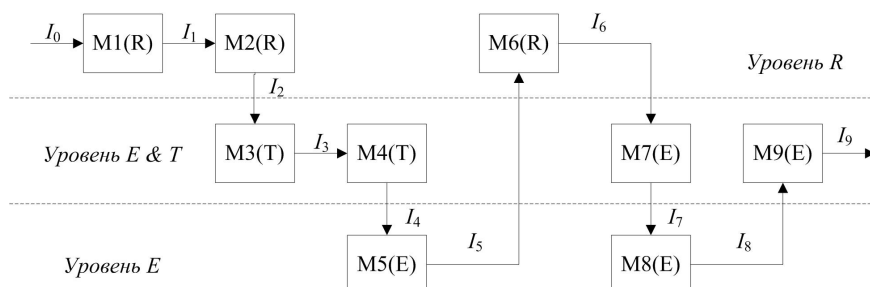


Рис. 4. Информационная модель для оценки состояния и динамики качества опасных производственных объектов с использованием прикладной цифровой платформы

На рис. 4 введены следующие обозначения информационных потоков: I_0 – кортеж 2D-изображений, принятых в программный комплекс; I_1 – кортеж 2D-изображений с разделением освещения (теплое, холодное); I_2 – кортеж 2D-изображений в градациях серого; I_3 – кортеж 2D-изображений в градациях серого и вектор объектов разрушения ОПО; I_4 – кортеж 2D-изображений в градациях серого и вектор завершенных объектов разрушения; I_5 – кортеж 2D-изображений для сравнения нескольких состояний ОПО; I_6 – кортеж 2D-изображений до и после обработки модулями М1–М5; I_7 – кортеж 2D-изображений в виде дискретной карты обнаруженных разрушений; I_8 – кортеж 2D-изображений в виде дискретной карты обнаруженных разрушений текущего и нового прогнозируемого состояний; I_9 – кортеж 2D-изображений и вектор перспективных квалиметрических оценок.

Аналитически информационная модель имеет вид:

$$\begin{aligned} I_0 \rightarrow & (M1(R), I_1), (M2(R), I_2), (M3(T), I_3 = \{O_1, \dots, O_n\}), \\ & (M4(T), I_4 = \{O'_1, \dots, O'_n\}), (M5(T), I_5 = \{O''_1, \dots, O''_n\}), \\ & (M6(R), I_6 = \{O'''_1, \dots, O'''_n\}), (M7(E), I_7 = \|D_0\|), \\ & (M8(E), I_8 = \|D_1\| - \|D_0\|), (M9(E), I_9 = \{O_k, \{QP\}\}) \rightarrow I_9, \end{aligned}$$

где $\{O_1, \dots, O_n\}$ – кортеж изображений, принятых для обработки и оценки; $\{O'_1, \dots, O'_n\}$, $\{O''_1, \dots, O''_n\}$, $\{O'''_1, \dots, O'''_n\}$ – кортеж изображений после обработки; $\|D_0\|$ – карта дефектов исходного изображения; $\|D_1\| - \|D_0\|$ – карта дефектов после сравнения текущего и будущего состояний; $\{O_k, \{QP\}\}$ – исходное изображение с набором квалиметрических оценок перспективных показателей.

Аналитическая информационная модель позволила сформировать структуру базы данных и синтезировать алгоритмы для функционирования каждого программного модуля ПЦП.

Алгоритмы анализа текущего и будущего состояний опасных производственных объектов

Анализ текущего и будущего состояний ОПО осуществляется экспертами. В результате определяются как базовые, так и перспективные показатели качества. Подготовительная работа с изображениями производится на основе типовых алгоритмов, для которых в настоящее время разработано множество программных библиотек, реализованных на базе платформы OpenCV. Решение специализированных задач выполняется с применением оригинальных алгоритмов, созданных автором.

Алгоритмы анализа текущего состояния опасных производственных объектов с использованием прикладной цифровой платформы

Исходное изображение, загружаемое в комплекс программных модулей, является растровым и представляет собой цифровую матрицу. Для всех модулей с целью исключения влияния освещения в лаборатории и погодных условий при съемке объектов на производстве выполняется преобразование исходного изображения в оттенки

серого по алгоритму пороговой бинаризации в модуле М2. Пример изображения лабораторного образца в градациях серого приведен на рис. 5.

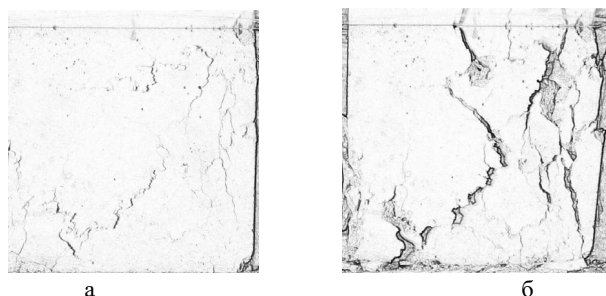


Рис. 5. Примеры исходных изображений лабораторных образцов в оттенках серого:
а – на начальной стадии разрушения; б – на завершающей стадии разрушения

Вычислительные эксперименты проводились с изображениями панельного жилого дома и промышленного здания ПАО «ММК» (см. рис. 6).



Рис. 6. Изображения для проведения вычислительного эксперимента:
а – панель жилого дома; б – панель промышленного здания ПАО «ММК»
(1 – пример разрушения соединительных швов)

Введем обозначение исходной матрицы изображения – $O = \|o_{m \times n}\|$, где m – количество строк в матрице изображений и n – количество столбцов. Алгоритмы, реализуемые в программных модулях, представляют собой преобразование матрицы O и добавление атрибутов матрицы после ее преобразования.

Модули М3, М4 и М7 предназначены для оценки текущего состояния исследуемого объекта. Схемы функционирования модулей по разработанным алгоритмам приведены на рис. 7, 8.

На рис. 7 введены следующие обозначения: O – исходные изображения; ArS – массив сегментов; ArD – карта дефектов.

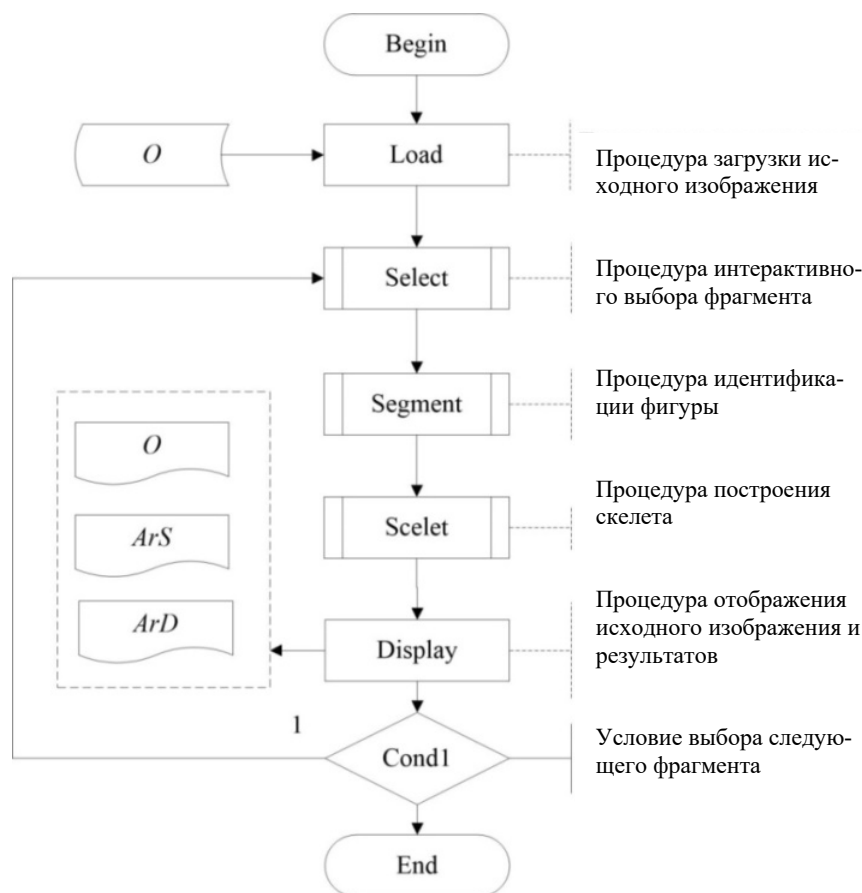


Рис. 7. Схема функционирования модуля сегментации элементов разрушения ОПО

На рис. 8 введен ряд обозначений: O – исходное изображение для завершения фигур; $Conf$ – файл конфигурации обнаруженных объектов разрушения; $Load$ – процедура загрузки исходного изображения в программный модуль M4; $Cond1$ – условие входа в цикл по содержимому файла конфигурации «Строка файла конфигурации не содержит записей?»; $Cond2$ – условие принадлежности текущего пикселя найденной фигуре «Текущий пиксель – часть фигуры?»; $Comround$ – процедура соединения текущего пикселя с найденной фигурой; $Cond3$ – условие прохождения всех пикселей изображения «Есть необработанный пиксель на изображении?»; $Choice$ – процедура выбора следующего пикселя изображения; $Display$ – процедура вывода результата; O' – изображение с завершёнными дефектами; F – фрагменты изображений с завершёнными объектами.

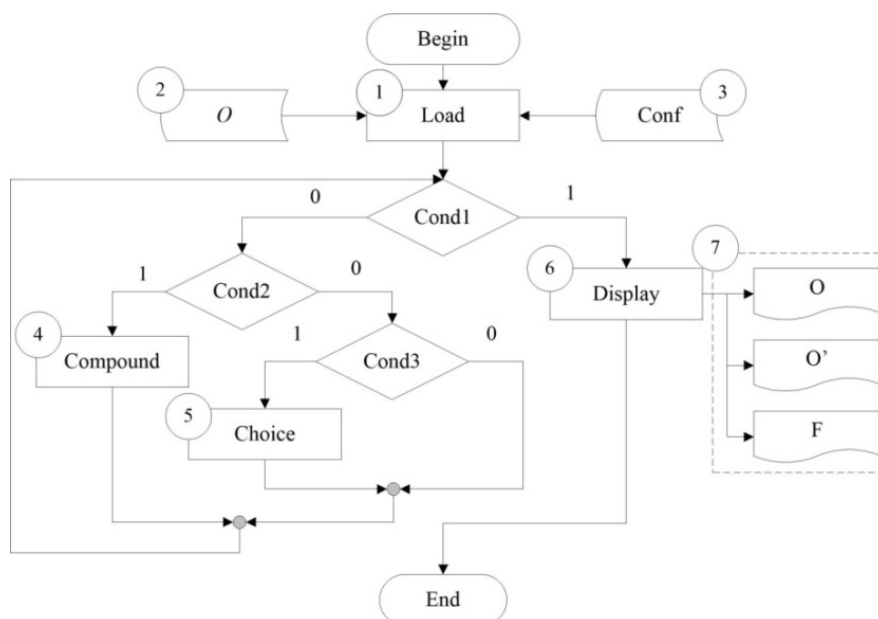


Рис. 8. Схема функционирования модуля по завершению фигур

Результаты вычислительного эксперимента на основе программного модуля М4 приведены на рис. 9.

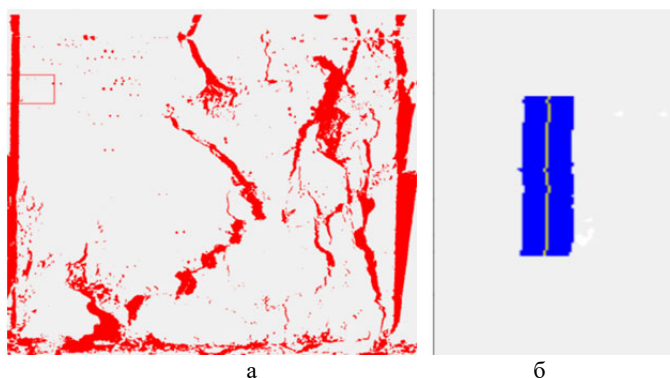


Рис. 9. Рабочие окна программного модуля М4:

- а – исходное изображение после завершения фигур O' ;
- б – фрагмент изображения с завершённой фигурой по трещине на образце

Алгоритм исследования динамики разрушения опасного производственного объекта с использованием прикладной цифровой платформы

Экспертиза зданий и сооружений проводится один раз в пять лет. По этой причине при анализе динамики разрушения объекта используют результаты лабораторных испытаний. Цель исследования состоит в прогнозировании состояния разрушения (каким оно будет спустя тот или иной промежуток времени) и в изучении его причин. Цифровая платформа позволила на основе накопленного материала разработать алгоритм для оценки динамики разрушения объектов (он представлен на рис. 10).

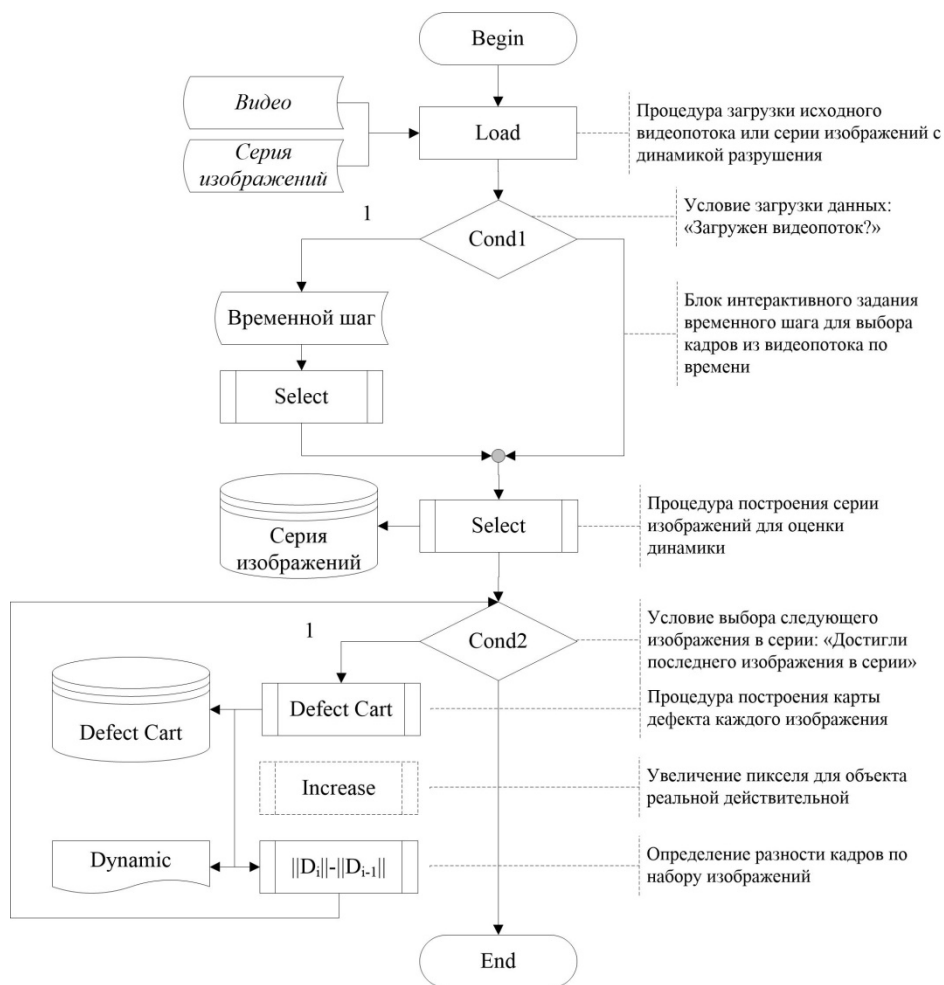
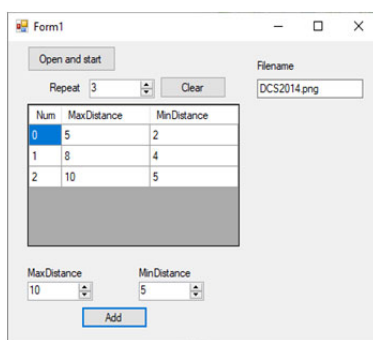


Рис. 10. Алгоритм оценки динамики изменения состояния объекта

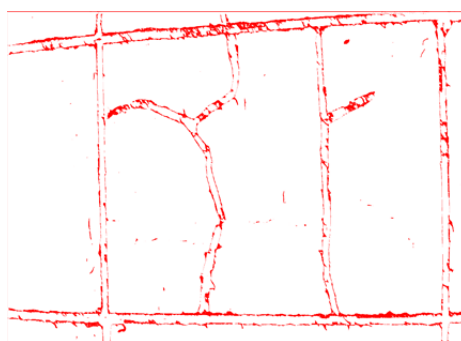
В алгоритме оценки динамики состояния объекта блок Increase подключается для режима работы с изображениями, удаленность съемки которых составляет более 2 м (при этом состояние камеры нестационарно). В таких условиях невозможно добиться попиксельного сравнения изображений. Положительный результат был получен при усреднении пикселей в квадрате 10×10 .

Результаты

Результаты вычислительного эксперимента на основе программного модуля M2 представлены на рис. 11.



а



б

Рис. 11. Рабочие окна программного модуля M2:
а – вид конфигуратора сегментированных объектов;
б – сегментация объектов разрушения на изображении фасада здания

Примеры кадров видеоряда с указанием точек в динамике разрушения показаны на рис. 12, 13. Использование возможностей прикладной цифровой платформы позволило в ходе лабораторного специализированного эксперимента более детально изучить процесс разрушения бетонных конструкций.

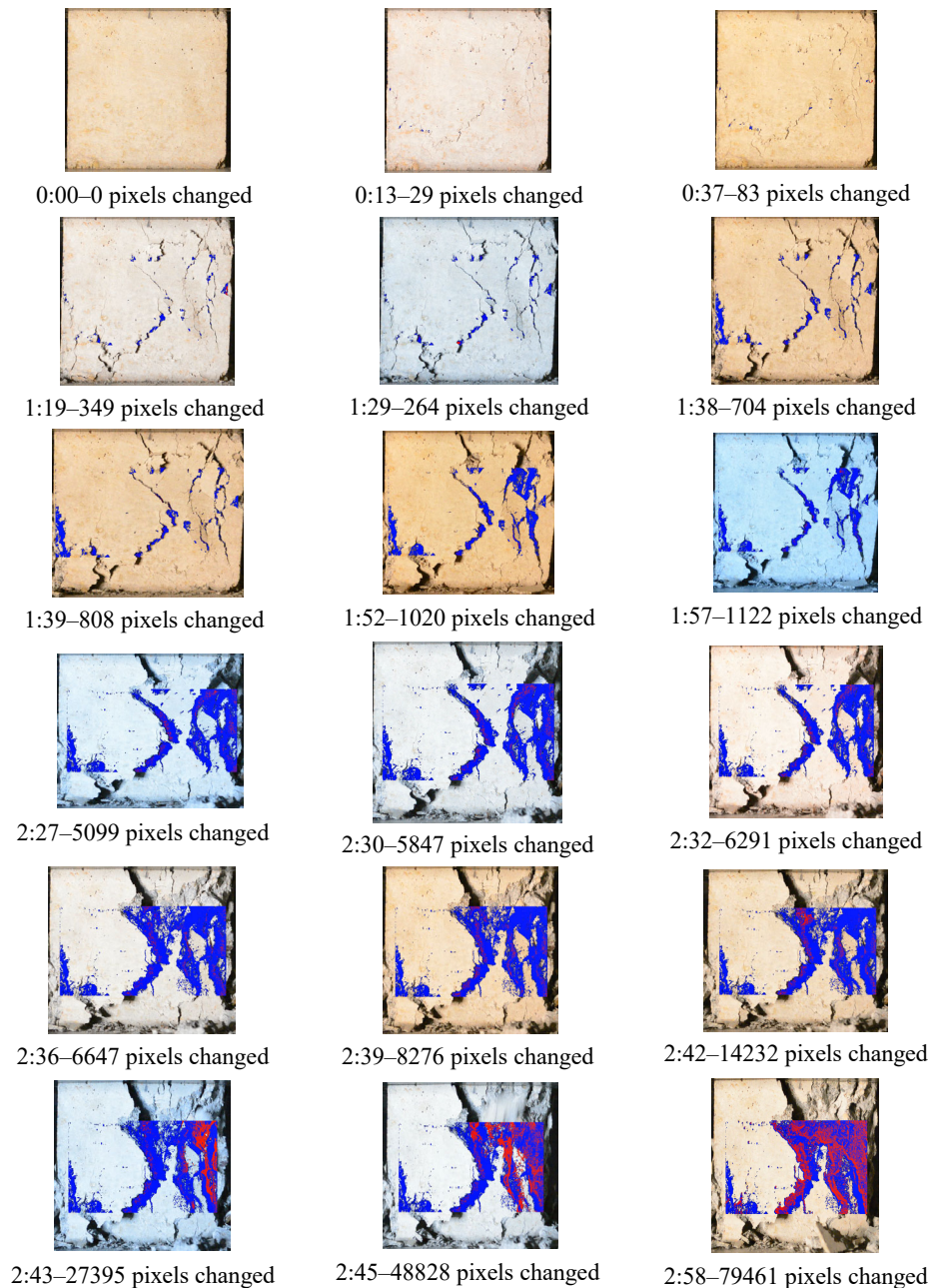
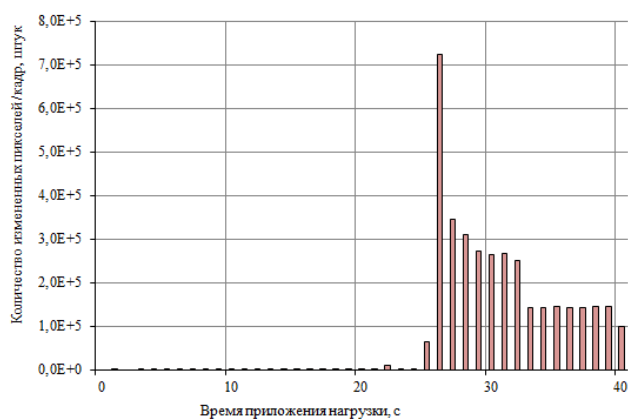
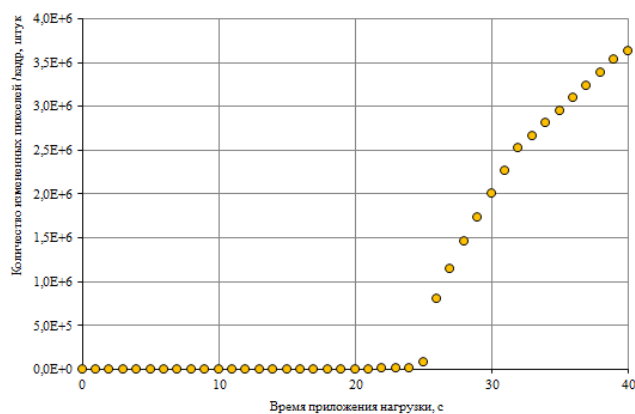


Рис. 12. Кадры видеоряда с точками разрушения на примере лабораторного бетонного образца



а



б

Рис. 13. Диаграммы изменения изображения образца в процессе эксперимента:
а – абсолютное количество изменившихся точек на изображении;
б – кумулята изменений на изображении

На рис. 13 представлены результаты визуализации динамики изменения изображения образца в течение времени. Наблюдаются период незначительного разрушения образца – от 0 до 25 с, точка резкого изменения – 26 с и период последующего разрушения с замедлением – от 27 до 40 с.

Интерпретация полученных результатов находит отражение на рис. 13а (динамика мгновенной скорости разрушения образца) и рис. 13б (площадь разрушения поверхности образца).

Установленные зависимости являются основополагающими при формировании экспертных перспективных оценок качества элементов опасных производственных объектов.

Выводы

Результаты проведенного исследования позволили нам сделать ряд выводов.

1. Для реализации новых инструментов проведения экспертной оценки качества элементов опасных производственных объектов синтезирована структура прикладной цифровой платформы, в состав которой вошли аппаратное обеспечение, программное обеспечение и персонал. Особенностью аппаратного обеспечения является использование беспилотного летательного аппарата для выполнения фронтального обследования поверхности объектов.

2. Программное обеспечение ПЦП построено на основе 10 программных модулей, которые распределены по трем уровням (исследовательский, технологический и экспертный). Исходными данными каждого модуля являются одиночное изображение, серия изображений или видеопоток.

3. В ходе реализации программных модулей разработаны алгоритмы анализа текущего состояния опасных производственных объектов с использованием прикладной цифровой платформы. При разработке активно внедрялись передовые технологии графических библиотек OpenCV, которые позволили акцентировать внимание на последовательности применения модулей стандартных библиотек и найти эффективные (с точки зрения быстродействия) программные решения.

4. Лабораторные испытания прикладной цифровой платформы, применяемой для анализа образцов бетона, позволили получить новые знания и уточнить механизм разрушения образцов. Таким образом, подтверждается эффективность использования данной платформы в системе принятия решений при экспертной оценке элементов опасных производственных объектов.

Список источников

Бычков А. А. и др. Руководящий документ РД-22-01-97 Требования к проведению оценки безопасности эксплуатации производственных зданий и сооружений поднадзорных промышленных производств и объектов (обследование строительных конструкций специализированными организациями). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200026286> (дата обращения: 20.03.2022).

ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ, 2014. 55 с.

Наркевич М. Ю., Корниенко В. Д., Полякова М. А. Визуальный контроль как основа для разработки автоматизированных систем дистанционного контроля и оценки качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2021. Вып. 5. С. 570–576. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-570-576>.

Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Корниенко В. Д., Калитаев А. Н., Суровцов М. М., Луганская Д. А., Чернышева А. С. Интеллектуальная система принятия решений при оценке качества зданий и сооружений на опасных производственных объектах: определение траектории движения беспилотного летательного аппарата // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2022. Т. 20, № 1. С. 50–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60>.

Наркевич М. Ю., Логунова О. С., Корниенко В. Д., Николаев А. А., Тюлюмов А. Н., Злыдарев Н. В., Дерябин Д. И. Качество материалов, изделий и конструкций в промышленной

безопасности: эмпирическая основа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2021. Т. 19, № 3. С. 90–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>.

Отраслевой стандарт ОСТ 14-4-73 Сталь. Метод контроля макроструктуры литой заготовки (слитка), полученной методом непрерывной разливки. [Б. м.]: [б. и.], 1973. 18 с.

Саттарова Г. С., Акимбекова Н. Н., Комлева Е. В. Информационная система мониторинга промышленной безопасности на опасных производственных объектах // Автоматика. Информатика. 2016. № 1 (38). С. 23–28.

Тимошкина М. В., Соловьева Е. В. Оценка качества, надежности и безопасности зданий и сооружений, применяемых на опасных производственных объектах // Вестник Евразийской науки. 2020. Т. 12, № 6. URL: <https://esj.today/PDF/47SAVN620.pdf> (дата обращения: 20.03.2022).

Molchanova K. M., Trushkina N. V., Katerna O. K. Digital platforms and their application in the aviation industry // Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management. 2020. Vol. 3. P. 83–98. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2020-3-8>.

References

Bychkov A. A. i dr. *Rukovodiashchii dokument RD-22-01-97 Trebovaniia k provedeniiu otsenki bezopasnosti ekspluatatsii proizvodstvennykh zdaniy i sooruzhenii podnadzornykh promyshlennykh proizvodstv i ob"ektov (obsledovanie stroitel'nykh konstruksii spetsializirovannymi organizatsiiami)* [Guidance document RD-22-01-97 Requirements for safety assessment of production buildings and structures of supervised industrial production facilities (inspection of building structures by specialized organizations)]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200026286> (accessed: 20.03.2022).

GOST 31937-2011 Zdaniia i sooruzheniia. Pravila obsledovaniia i monitoringa tekhnicheskogo sostoiianiia [GOST 31937-2011 (Russian National Standard) Buildings and Structures. Rules for inspection and technical condition monitoring]. Moscow: Standartinform, 2014. 55 p.

Narkevich M. Iu., Kornienko V. D., Poliakov M. A. Vizual'nyi kontrol' kak osnova dlia razrabotki avtomatizirovannykh sistem distantsionnogo kontrolya i otsenki kachestva zdaniy i sooruzhenii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh [Visual control as a basis for the development of automated systems for remote control and quality assessment of buildings and facilities at hazardous production facilities]. *Izvestiia Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of TSU. Technical Sciences], 2021, iss. 5, pp. 570–576. <https://doi.org/10.24412/2071-6168-2021-5-570-576>.

Narkevich M. Iu., Logunova O. S., Kornienko V. D., Kalitaev A. N., Surovtsov M. M., Luganskaia D. A., Chernysheva A. S. Intellektual'naia sistema priniatiia reshenii pri otsenke kachestva zdaniy i sooruzhenii na opasnykh proizvodstvennykh ob"ektakh: opredelenie traektorii dvizheniia bespilotnogo letatel'nogo apparata [An intelligent decision support system for assessing the quality of buildings and structures at hazardous industrial facilities: determining the trajectory of the unmanned aircraft]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2022, vol. 20, no. 1, pp. 50–60. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-1-50-60>.

Narkevich M. Iu., Logunova O. S., Kornienko V. D., Nikolaev A. A., Tiuliumov A. N., Zlydarev N. V., Deriabin D. I. Kachestvo materialov, izdelii i konstruksii v promyshlennoi bezopasnosti: empiricheskaia osnova [Quality of materials, products and structures in industrial safety: an empirical basis]. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2021, vol. 19, no. 3, pp. 90–101. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-3-90-101>.

Otraslevoi standart OST 14-4-73 Stal'. Metod kontroliia makrostruktury litoi zagotovki (slitka), poluchenoii metodom nepreryvnoi razlivki [Industry standard OST 14-4-73 Steel. Method of monitoring the macrostructure of a cast billet produced by continuous casting]. 1973. 18 p.

Sattarova G. S., Akimbekova N. N., Komleva E. V. Informatsionnaia sistema monitoringa promyshlennoi bezopasnosti na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh [Information system of monitoring industrial safety at hazardous production facilities]. *Avtomatika. Informatika* [Automatics Computer Science], 2016, no. 1 (38), pp. 23–28.

Timoshkina M. V., Solov'eva E. V. Otsenka kachestva, nadezhnosti i bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy, primeniaemykh na opasnykh proizvodstvennykh ob'ektakh [Assessment of the quality, reliability and safety of buildings and structures used at hazardous production facilities]. *Vestnik Evraziiskoi nauki* [The Eurasian Scientific Journal], 2020, vol. 12, no. 6. Available at: <https://esj.today/PDF/47SAVN620.pdf> (accessed: 20.03.2022).

Molchanova K. M., Trushkina N. V., Katerna O. K. Digital platforms and their application in the aviation industry. *Intellectualization of Logistics and Supply Chain Management*, 2020, vol. 3, pp. 83–98. <https://doi.org/10.46783/smart-scm/2020-3-8>.

Сведения об авторах

Михаил Юрьевич Наркевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и строительства зданий; <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>, narkevich_mu@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Mikhail Yu. Narkevich** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Design and Construction of Buildings; <https://orcid.org/0000-0001-6608-8293>, narkevich_mu@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Оксана Сергеевна Логунова – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой вычислительной техники и программирования; <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Oksana S. Logunova** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Computing and Programming Department; <https://orcid.org/0000-0002-7006-8639>, logunova66@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Михаил Борисович Аркулис – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой физики; <https://orcid.org/0000-0003-3006-9968>, arkulis78@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Mikhail B. Arkulis** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of Physics Department; <https://orcid.org/0000-0003-3006-9968>, arkulis78@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Азат Ирекович Сагадатов – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и строительства зданий; <https://orcid.org/0000-0003-1982-3421>, azat0680@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Azat I. Sagadatov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Design and Construction of Buildings; <https://orcid.org/0000-0003-1982-3421>, azat0680@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Сергей Сергеевич Климов – студент; <https://orcid.org/0000-0002-7215-9083>, sergey.klimov.2002@bk.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Sergey S. Klimov** – Stu-

dent; <https://orcid.org/0000-0002-7215-9083>, sergey.klimov.2002@bk.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Вероника Валерьевна Кабанова – студент; <https://orcid.org/0000-0001-9253-6942>, nika_homework@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Veronika V. Kabanova** – Student; <https://orcid.org/0000-0001-9253-6942>, nika_homework@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Антон Андреевич Николаев – студент; <https://orcid.org/0000-0003-4254-6813>, aanton2001@gmail.com, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Anton A. Nikolaev** – Student; <https://orcid.org/0000-0003-4254-6813>, aanton2001@gmail.com, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Денис Исхакович Дерябин – студент; <https://orcid.org/0000-0002-7622-1294>, shalender@mail.ru, Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова (д. 38, пр-т Ленина, 455000 Магнитогорск, Россия); **Denis I. Deryabin** – Student; <https://orcid.org/0000-0002-7622-1294>, shalender@mail.ru, Nosov Magnitogorsk State Technical University (38, pr. Lenina, 455000 Magnitogorsk, Russia).

Заявленный вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 12.04.2022; одобрена после рецензирования 07.07.2022; принята к публикации 15.07.2022.

The article was submitted 12.04.2022; Approved after reviewing 07.07.2022; Accepted for publication 15.07.2022.