

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ДЕФЕКТОВ И ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ СРЕДСТВАМИ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

© 2023 г. Чандан Кумар^{1,*}, Аджай Кумар Синха^{1,**}

¹Национальный технологический институт, Патна 800005 Индия
E-mail: *chandank.ph21.ce@nitp.ac.in; **aksinha@nitp.ac.in

Поступила в редакцию 05.07.2023; после доработки 29.08.2023
Принята к публикации 04.09.2023

Трещины — это деформации в бетонных конструкциях в реальном времени. Они характеризуются как несплошности с точки зрения формы и размеров бетонных конструкций. Для обеспечения надежности и безопасности конструкций выявление трещин является важной задачей. К традиционным методам контроля трещин относятся визуально-измерительный контроль, ультразвуковой контроль и ручной контроль трещин. Эти методы требуют большого вмешательства человека, а также опытного и квалифицированного специалиста. Кроме того, эти методы являются субъективными и трудоемкими, не позволяющими корректно обнаруживать трещины в сложных бетонных конструкциях. Для устранения этих проблем был предложен метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля для автоматического обнаружения трещин в бетонных конструкциях. Предложенный метод представляет собой двухэтапную модель, в которой на первом этапе сегментируются области трещин, а на втором этапе выполняется точная оценка трещин. Кроме того, для повышения эффективности фильтра Собеля маска модифицируется с помощью локальной дисперсии изображения вместо использования обычной маски фильтра. Для экспериментального исследования были получены изображения самостоятельно подготовленного образца бетона. Эффективность предложенного метода сравнивалась с различными существующими методами, такими как оператор Собеля, Превитт, Робертса, LoG, Zero Cross и Кэнни. Сравнительный качественный результат показывает, что предложенный метод превышает результаты других существующих методов. Кроме того, для удобства реализации и применения было разработано приложение к предлагаемому методу. Веб-приложение может быть использовано службами эксплуатации гражданской инфраструктуры и инженерами-строителями при решении задач по обслуживанию сооружений.

Ключевые слова: бетон, трещины, grab-cut, обработка изображения, оператор Собеля, веб-приложение.

AUTOMATED CRACK DETECTION AND A WEB TOOL USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES IN CONCRETE STRUCTURES

Chandan Kumar^{1,*}, Ajay Kumar Sinha^{1,**}

¹National Institute of Technology, Patna, 800005 India.
E-mail: *chandank.ph21.ce@nitp.ac.in; **aksinha@nitp.ac.in

Cracks indicates the real time deformity in concrete structures. It is characterized as discontinuity in terms of shape and size of the concrete structures. To ensure the structural health and safety, crack detection is an important task. The traditional methods of crack detection include visual introspection, ultrasonic and hand-held testing of crack. These methods require a high human intervention along with an experienced and skilled inspector. Moreover, these methods are subjective and time-consuming process which fails to identify the crack of the complex concrete structures properly. To overcome these issues, a grab-cut with improved Sobel has been proposed for automatic crack detection from the concrete structures. The proposed method works as a two-step model where cracks regions are segmented in the first step and a precise crack assessment is performed in the second step. Furthermore, to improve the efficacy of Sobel, the mask is modified with the aid of local variance of the image instead of using conventional mask of the filter. For the experimentation study, the images of self-prepared concrete sample have been acquired. The effectiveness of the proposed method has been compared with respect to various pre-existing methods like Sobel, Prewitt, Robert, LoG, Zero Cross and Canny. The comparative qualitative result exhibits that the proposed method surpasses the outcomes of the other pre-existing methods. Additionally, for easy implementation and application point of view a web tool of the proposed method has been developed. The web tool can be utilised by the civil infrastructure maintenance agency and construction engineers in the task of structure maintenance.

Keywords: concrete, cracks, grab-cut, image processing, Sobel, web tool.

DOI: 10.31857/S0130308223110039, **EDN:** XAYBIG

1. ВВЕДЕНИЕ

Трещины в любых инженерных сооружениях, таких как мосты, дороги, тротуары, здания, балки, плиты и бетонные конструкции, свидетельствуют о деградации или разрушении конструкции [1]. Внешние нагрузки, усталостные напряжения, сжатие, а также химические процессы,

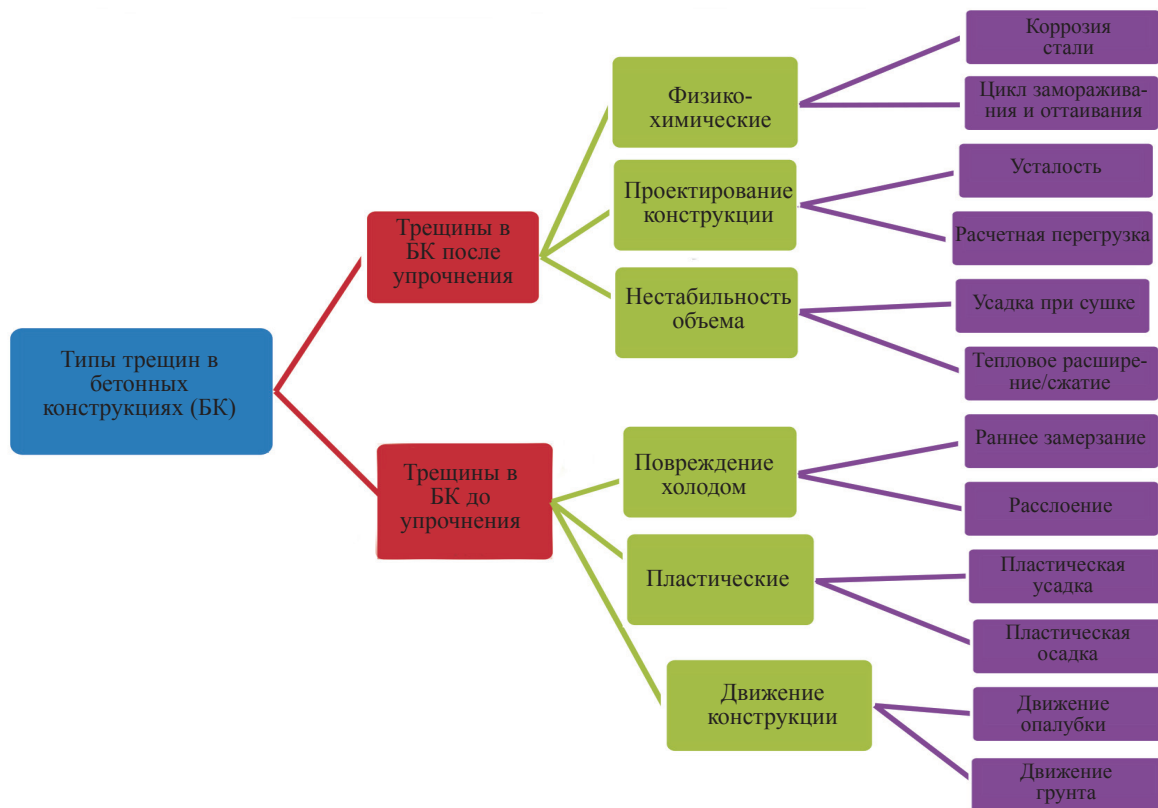


Рис. 1. Различные типы трещин в бетонных конструкциях.

такие как коррозия и реакции со щелочью, являются основными факторами, вызывающими появление трещин [2]. Кроме того, трещины в бетонных конструкциях могут образовываться в результате стихийных бедствий и техногенных причин. К стихийным бедствиям относятся наводнения, оползни и землетрясения, а к техногенным причинам образования трещин в бетонных конструкциях — низкое качество бетона, неправильное конструктивное исполнение и несоответствующее расстояние между стальными стержнями [3]. На рис. 1 показан обзор различных типов трещин в бетонных конструкциях [4]. В основном они делятся на те, которые возникают после и до упрочнения бетонных конструкций. Под твердением понимается процесс схватывания бетона. Одни трещины образуются до оседания конструкций, другие — после. Наличие трещин в бетонных конструкциях по естественным или техногенным причинам снижает их эксплуатационные свойства, срок службы и безопасность. Кроме того, снижается локальная компактность материалов, что приводит к образованию разрывов в конструкциях. Каковы бы ни были причины образования трещин, они всегда представляют собой серьезную проблему в развивающихся странах.

Первоначально трещины зарождаются в бетонных конструкциях на микроскопическом уровне. Постепенно их пропорции изменяются, что приводит к разрушению конструкции. Методы контроля трещин включают в себя ручной, визуально-измерительный и неразрушающий контроль [1]. При ручном методе трещины оцениваются по грубо составленной схеме трещин, включающей различные обстоятельства возникновения неровностей. Визуальноизмерительный метод использует для обнаружения трещин человеческое восприятие [3]. Это означает, что процесс идентификации трещин является составной функцией зрительных способностей и знаний человека. Кроме того, при неразрушающем контроле (НК) для обнаружения трещин используются технологии визуализации и сканирования [5]. Неразрушающий контроль позволяет обнаруживать трещины в бетонных конструкциях без какого-либо вмешательства в целостность материала. Он предлагает контроль трещин на основе изображений. В основном он включает ультразвуковую, радиографическую и инфракрасную визуализацию для контроля несплошностей в бетонных конструкциях [6]. В развивающихся странах для контроля трещин в основном используется ручной контроль.

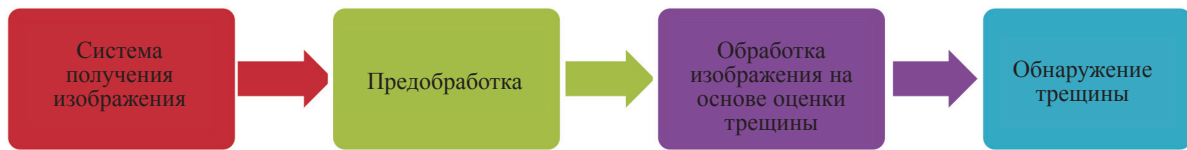


Рис. 2. Блок-схема стандартного метода контроля дефектов с использованием обработки изображений.

Однако все эти методы имеют ряд ограничений, таких как необходимость привлечения специалиста, уровень квалификации, знания дефектоскописта и качество изображения. Помимо этих ограничений, обнаружение трещин с помощью ручного и визуальноизмерительного контроля является дорогостоящим и трудоемким. Более того, эти методы в большей степени связаны с ошибками и вмешательством человека. Кроме того, эти методы должны выполняться через определенный промежуток времени. Таким образом, весь процесс контроля трещин становится более сложным и трудоемким. На изображения, получаемые в процессе неразрушающего контроля, часто влияют шумы, возникающие при получении изображения. Таким образом, существование трещин на любом уровне конструкций как микро, так и макро, не является благоприятным для жизни. Это создает небезопасную и опасную рабочую среду для человека. Поэтому корректный анализ трещин в бетонных конструкциях является чрезвычайно важной и актуальной задачей. В последнее время для обнаружения трещин очень популярны методы, основанные на обработке изображений (МОИ). Эти методы популярны благодаря точности результатов, низкой стоимости, меньшему времени вычислений и простоте использования [7]. Типичный метод, основанный на обработке изображений, включает в себя систему получения изображения, предварительную обработку изображения и алгоритм оценки трещин, как показано на рис. 2. МОИ может предложить второе мнение по отношению к результатам, полученным с помощью ручного, визуального и неразрушающего методов обнаружения трещин. Кроме того, он может помочь ведомствам контролировать и поддерживать структурное состояние бетонных конструкций в единой системе, оптимизируя при этом имеющиеся ресурсы.

В статье кратко описывается происхождение трещин в бетонных конструкциях. Цель получения этой информации — понять значение трещин и степень серьезности проблемы. Основной задачей данной работы является идентификация трещин по цифровым изображениям бетонных конструкций. Для этого предлагается метод, основанный на обработке изображений. Суть метода заключается в использовании преимуществ компьютерного зрения и современных методов обработки изображений, таких как сегментация, обнаружение краев или алгоритмы выделения признаков, для автоматического обнаружения трещин на цифровых изображениях. Алгоритмы, основанные на обработке изображений, повышают точность и эффективность обнаружения трещин. Кроме того, они обеспечивают простоту вычислений и меньшее вмешательство человека. В целом, распознавание трещин по изображениям играет важную роль в обслуживании, безопасности и долговечности инфраструктуры. Преимущества этого метода заключаются в его эффективности, точности и неразрушающем характере, что делает его незаменимым инструментом в различных отраслях, включая гражданское строительство, аэрокосмическую промышленность и производство. Таким образом, для обнаружения краев или границ трещин на основе визуальной информации был предложен улучшенный алгоритм Собеля для автоматического обнаружения трещин по полученным пользователем цифровым изображениям трещин. Он сочетает в себе основные признаки традиционного алгоритма Собеля и алгоритма *grab-cut*. Основной вклад в предлагаемый метод заключается в следующем. Во-первых, горизонтальная и вертикальная маски модифицируются с помощью локальных вариаций изображения для точного определения краев трещины. Во-вторых, передний и задний планы изображений разделяются с помощью алгоритма *grab-cut*. Он обеспечивает лучшую свертку модифицированных масок с пикселем трещины. В-третьих, для удобства использования и практического применения предложенного метода для обнаружения трещин в бетонных конструкциях было разработано веб-приложение. Веб-приложение разработано на платформе MATLAB.

Дальнейшая структура работы построена следующим образом: в разделе 2 представлен обзор существующих методов. В разделе 3 описаны методы и материалы, а также предлагаемый метод. В разделе 4 представлены результаты и их обсуждение с точки зрения качественного анализа. В этом разделе также представлено сравнительное исследование между предлагаемым и существующим методом. И, наконец, в разделе 5 сформулированы выводы.

2. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

С целью распознавания трещин проводились различные исследования, основанные на применении методов обработки изображений. В первую очередь это морфологические операции, вейвлет-преобразование, алгоритмы Кэнни, Собеля, метод выделения порога Оцу, метод максимума энтропии, градиентный метод и метод Прюитт. В данном разделе рассматриваются некоторые из существующих методов обнаружения трещин в зданиях, мостах, тротуарах и железнодорожных путях. Qader и др. [8] проанализировали различные МОИ, такие как метод Собеля, Кэнни, Фурье и быстрое преобразование Хаара (БПХ), применительно к контролю трещин в мостовых конструкциях. Анализ методов был проведен на пятидесяти образцах изображений бетонных мостов с трещинами и без трещин. Однако корректное обнаружение краев трещин ограничено интенсивностью изображения и формой пикселей трещин. Talab и др. [9] для контроля трещин в бетонных конструкциях объединили методы Собеля и порогового выделения Оцу. В этом способе после применения метода Собеля устранялся остаточный шум. Эффективность метода оценивалась по самостоятельно полученным изображениям бетона, однако он не обеспечивает обнаружения незашумленных трещин. Hutchinson и др. [10] использовали статистический метод для оценки таких повреждений бетона, как трещины и сколы. Статистический метод был реализован на основе результатов метода Кэнни и метода БПХ. Статистический метод представлял собой комбинацию операционных характеристик приемника и теории принятия решений Байеса. Метод не сработал в случае изменения ширины трещины. Yamaguchi и др. [11] предложили перколяционную модель для выявления больших трещин. Перколяция учитывает связность между соседними пикселями в бетоне и соответствующим образцом для выделения трещин. Кроме того, результат перколяционного метода бинаризуется и оптимизируется для получения лучшего результата. Однако оптимизация порогового значения не учитывается, и в случае мелких трещин получается зашумленное изображение. Wang и др. [12] провели сравнительный анализ обнаружения трещин в бетоне. Были проанализированы интегральный, перколяционный, морфологический и практический методы обнаружения трещин в бетоне. Rizvi и др. [13] представили метод обработки изображений для обнаружения трещин на железнодорожных путях. Метод использует пространственный, т.е. медианный фильтр для удаления шума. После удаления шума для идентификации трещин применяются морфологические операции, такие как бинаризация и гистограммное выравнивание изображения. Данный метод позволяет обнаруживать только крупные трещины. Lattanzi и др. [14] использовали метод сегментации и выделения признаков для обнаружения трещин в бетонных конструкциях при помощи обработки изображений. Для выявления трещин использовались сегментация по методу Кэнни и вейвлет-сегментация на основе анализа контуров. Метод был разработан для трех наборов собственных изображений. Однако признаки, используемые для обнаружения трещин, описаны недостаточно четко, а полученные изображения подвержены шуму. Kabig и др. [15] провели оценку эффективности различных методов обнаружения трещин на основе обработки изображений. Такие методы, как метод Собеля, перекрестный оператор Робертса, метод БПХ и метод Марра-Хилдрета, были опробованы на собственных акустических изображениях скважины. Однако в случае мелких трещин эффективность методов оказалась недостаточной. Однако в случае мелких трещин эффективность таких методов снижается. В работе Mohan и др. [1] представлен краткий анализ способов обнаружения трещин с помощью средств обработки изображений и методов неразрушающего контроля. Описаны требования к корректному распознаванию трещин: направление трещин; неправильная форма трещин; разрешение изображения; выбор параметров изображения. Lee и др. [16] предложили комбинированный подход для обнаружения трещин по снимкам мостов. Для сглаживания изображения используется медианный фильтр, после чего сглаженное изображение вычитается из исходного для получения более резкого изображения, причем резкость изображения регулируется параметром масштабирования. В дальнейшем для выделения сегмента трещины на изображении с контурами обрабатываются морфологическими операциями, такими как расширение и утоньшение. Однако точность метода зависела от ручного выбора параметра масштабирования. Kim и др. [17] использовали гибридный метод для обнаружения мелких трещин. Метод сочетает в себе свойства бинаризации изображений и технологии беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для получения изображения с БПЛА используется ультразвуковая съемка. Однако существует неоднозначность в выборе порога для изображения. Dihaio Ai и др. [7] сделали подробный обзор литературы по выявлению трещин. В литературе трещины в различных аспектах гражданских инфраструктур изучаются с помощью таких подходов к компьютерному зрению, как обработка изображений, машинное обучение (МО) и глубокое обучение (ГО). Ограничения для МОА заключаются в качестве изображения и шумах, в то время как методы,

основанные на МО и ГО, требуют большого набора данных и большого времени вычислений для контроля трещин. Takeda и др. [18] использовали традиционное вейвлет-преобразование для анализа трещин на цифровых изображениях бетонных конструкций. Однако в этом методе не учитываются локальные характеристики трещин, например, связность между соседними пикселями трещин. Кроме того, не было проведено устранение шумов на изображениях. Fujita и др. [19] рассмотрели два метода предварительной обработки изображений — вычитание и метод матрицы Гессе — для оценки трещин в бетонных конструкциях. В данном методе сначала проводится идентификация трещин обоими методами. После этого — сравнение между выявленными трещинами и трещинами, обнаруженными в результате ручного осмотра. Данный метод не работает в случае переменного размера трещин, поскольку локальное окно не фиксировано. Lee и др. [20] использовали морфологический метод и метод расширенной бинаризации для определения трещин по полученным самостоятельно цифровым изображениям. Морфологический метод был применен для преобразования неоднородной яркости изображения, а бинаризация использовалась для анализа формы. Однако в случае мелких трещин эффективность метода была ограничена. Giakoumis и др. [21] использовали для обнаружения трещин фильтр анизотропной диффузии (ФАД). ФАД [22] сочетает в себе свойства дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных. Но результат применения метода подвержен эффекту «лестницы» и необходимости вручную подбирать параметры краевого порога ФАД.

Из литературы известно, что для оценки трещин широко используются методы обработки изображений (ОИ), МО и ГО. Все эти методы имеют ряд достоинств и недостатков, например, пороговые методы и методы, основанные на обнаружении краев, имеют меньшее время вычислений, но зависят от качества изображения и шумов. Аналогично, методы ОИ на основе морфологии хорошо подходят для анализа формы, но плохо работают в случае сложных текстур бетонных конструкций. Что касается методов, основанных на МО и ГО, то для их применения требуются большие наборы данных с маркировкой. Кроме того, их эффективность и устойчивость зависят от доступных ресурсов, а также от большого времени вычислений.

3. ОПИСАНИЕ МЕТОДОВ И МАТЕРИАЛОВ

Для устранения указанных в литературе недостатков был предложен метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля (GCIS) для обнаружения трещин в бетонных конструкциях. На рис. 3 показана блок-схема предлагаемой системы GCIS, в которой процесс начинается с получения изображений и заканчивается оценкой трещин и созданием веб-приложения. В данном разделе подробно рассматривается изготовление бетонных образцов, процесс образования трещин с помощью универсальной испытательной машины, процесс получения изображений и полное математическое описание предлагаемого метода.

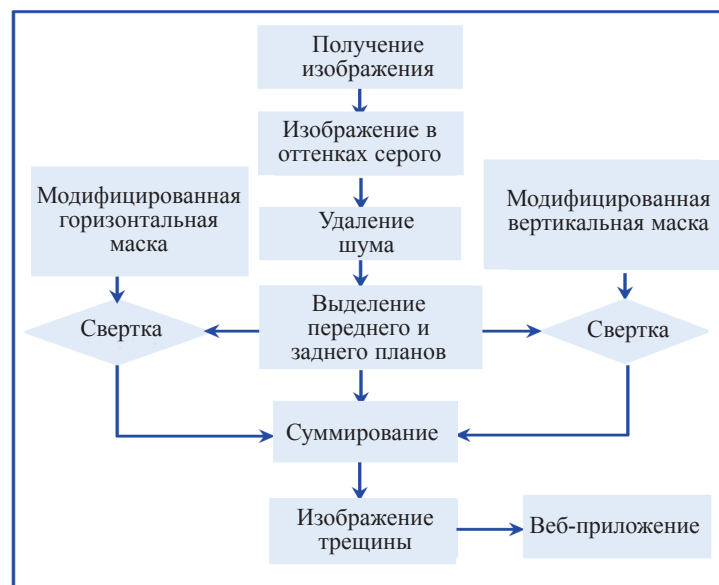


Рис. 3. Блок-схема предлагаемой методики.

3.1. Изготовление образцов из бетона и выборка образцов трещин

Для оценки эффективности предложенного метода использовали цифровые изображения самостоятельно изготовленных образцов бетона. Изготовление образцов бетона и образование трещин осуществляли в лабораторных условиях. Поскольку основной целью предлагаемого метода является оценка трещин по цифровым изображениям поврежденных бетонных конструкций, то в данной статье, чтобы избежать излишней детализации, представлен краткий обзор процесса изготовления образцов, образования трещин и получения изображений трещин. Результат изготовления образца бетона, процесс образования трещин и изображения трещин представлены на рис. 4*a—в* соответственно. Весь процесс создания образцов бетона состоит из трех этапов. На первом этапе формируются образцы бетона с использованием таких материалов, как цемент, мелкий и крупный заполнитель. Образцы бетона размером 100×100×500 мм были изготовлены в соответствии с Индийским Стандартом 456:2000. На втором этапе сначала образцы загружаются в универсальную испытательную машину (УИМ), затем к ним прикладывается автоматическая нагрузка для образования трещин, причем оба процесса выполняются одновременно. Контроль величины нагрузки проводили программирующим устройством до начала образования трещин в образцах. Использовалась УИМ модели BSUT-100-FAD мощностью 1000 кН с высокой точностью нагружения и коэффициентом скорости нагружения 0,5 мм/мин. Подготовка и испытание образцов бетона происходили в лаборатории бетона и испытания материалов Национального технологического института Патны соответственно. На третьем этапе с помощью цифровой фотокамеры NIKON D5100 получены изображения трещин в бетонных структурах.

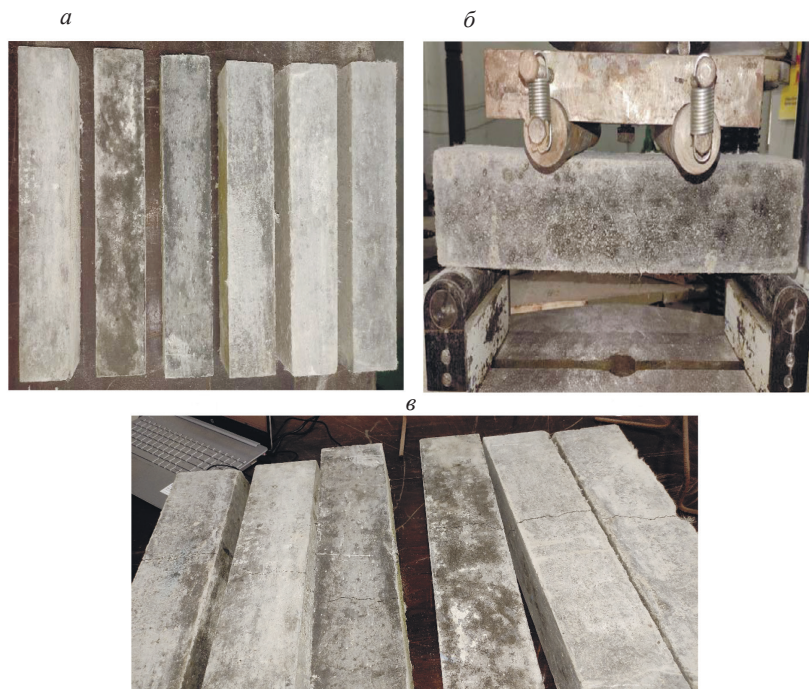


Рис. 4. Образец из бетона размерами 100×100×500 мм (*a*); образец, загруженный в универсальную испытательную машину (*б*); изображения образцов с трещинами (*в*).

Трещины в сформированном образце бетона генерируются с помощью УИМ. Кроме того, цифровые изображения трещин были получены с помощью камеры высокого разрешения NIKON D5100 в яркий солнечный день. С целью экспериментального анализа было получено несколько образцов бетона с трещинами и их изображения. Для понимания эффективности предложенного метода приведен результат для шести образцов. Однако для остальных полученных образцов и их изображений анализ эксперимента остается неизменным. Форма и размер трещин меняются в зависимости от нагрузки на УИМ. Ниже показана оценка мелких трещин с помощью предлагаемого метода. Крупные трещины легко просматриваются. На рис. 5 показан образец формованного



Рис. 5. Образец образца из бетона с выделенным участком, содержащим трещину.

бетона, на котором интересующая область, т.е. трещина, выделена прямоугольной красной рамкой. Экспериментальные результаты, полученные на рис. 5 с помощью предложенного метода, показаны на рис. 7.

3.2. Предложенный метод grab-cut с улучшенным оператором Собеля

Трещины несут высокочастотную информацию о структурах в терминах краев и границ. В аспекте обработки изображений трещины эквивалентны краевой информации изображения. Края в основном выражаются в изменении интенсивности пикселей, которое используется для разделения изображения на различные сегменты. В отличие от трещин в бетонных конструкциях, края могут быть визуализированы как резкая или размытая структура. Задачей предлагаемого метода является обнаружение краев пикселей трещин. Предлагаемый метод сочетает в себе признаки метода grab-cut и метода Собеля, что делает его гибридным методом обнаружения трещин в бетонных конструкциях. В предлагаемой работе трещина обозначает изучаемую область (ИО). Сегментация ИО была выполнена с помощью алгоритма grab-cut (GCA). Кроме того, для определения краев сегментированной ИО использовался улучшенный алгоритм Собеля. Grab-cut [23] — это метод сегментации изображений, при котором изображение разбивается на области переднего и заднего плана. Этот метод широко используется благодаря простоте реализации и высокой производительности. Он основан на правилах теории графов. В нем используется модель гауссовой смеси (МГС), которая отвечает за оценку распределения цветов для разделения изображения на передний и задний план. Далее на метки пикселей накладывается случайное поле Маркова (СПМ) с энергетической функцией, которая определяет схожие области краев для точного выделения переднего и заднего планов изображения. После этого для вывода меток пикселей используется оптимизация на основе разрезания графа. В общем случае энергетическая функция [24] определяется как

$$E = U_{\text{pixel}} + V_{\text{pair}} + G_{\text{global}}, \quad (1)$$

где U_{pixel} и V_{pair} — данные и сглаживание соответственно. U_{pixel} оценивает вероятность принадлежности пикселя к заднему или переднему плану. V_{pair} определяет сглаживание локальных пикселей. G_{global} являются стандартными членами и определяют сходство между передними планами.

Пусть входное изображение обозначается как $I(x, y)$ с n пикселями и α — метка пикселя изображения. Согласно GCA, это проблема маркировки, в которой выделяется метка $\alpha_i \in \{0, 1\}$, где $i = 1, \dots, n$ соответствует каждому пикселю p_i изображения. И где $i = 1, \dots, n$ с $\alpha_i = 1$ для переднего плана и 0 для заднего плана соответственно. Затем проблема маркировки рассматривается как задача оптимизации. Она решается минимизацией энергетической функции, которая определяется как

$$E(\alpha, k, \theta, p) = U(\alpha, k, \theta, p) + V(\alpha, p), \quad (2)$$

где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, $p = (p_1, p_2, \dots, p_n)$, а θ определяет модель внешнего вида переднего и заднего планов изображения, которая обозначается как

$$\theta = \{h(z; \alpha), \alpha = \{0, 1\}\}, \quad (3)$$

где h — модель внешнего вида. Она определяется как МГС, где для построения рассматривается полноковариационная гауссовская смесь с К-факторами.

По данным $U(\alpha, k, \theta, p)$ в уравнении (2) оценивают соответствие метки α метке p с θ и k . Оно читается как

$$U(\alpha, k, \theta, p) = \sum_n D(\alpha_n, k_n, \theta, p_n) \quad (4)$$

и

$$D(\alpha_n, k_n, \theta, p_n) = -\log P(p_n | \alpha_n, k_n, \theta) - \log \pi(\alpha_n, k_n), \quad (5)$$

где P — ковариация распределения. По сглаживанию $V(\alpha, p)$ в уравнении (2) повышают согласованность в локальных областях изображения. Оно может быть записано в виде:

$$V(\alpha, p) = \gamma \sum_{(m,n) \in C} [\alpha_m \neq \alpha_n] \exp(-\beta) \|p_m - p_n\|^2, \quad (6)$$

где $[\cdot]$ — индикаторная функция, принимающая значения 0,1 для исследуемого признака; β и γ являются константами; C — группа пар соседних пикселей.

Рабочее уравнение GSA определяется через минимизацию уравнения (2). Оно может быть записано в виде:

$$\hat{\alpha} = \arg \min_{\alpha} E(\alpha, k, \theta, p). \quad (7)$$

При использовании GSA минимизация энергии производится итеративно. При этом происходит обновление k и θ по текущей сегментации и использование новых k и θ для получения новой сегментации. Итерация прекращается при выполнении критерия сходимости.

Оператор Собеля [25] — это математический оператор, который используется для обнаружения краев на цифровых изображениях. Он оценивает градиент интенсивности изображения в каждом пикселе. По сути, он измеряет, насколько быстро изменяется интенсивность изображения от одного пикселя к другому. Для обнаружения краев используются две маски 3x3, одна из которых оценивает изменение интенсивности по горизонтали, а другая — по вертикали. Горизонтальная и вертикальная маски обозначаются как G_x и G_y , соответственно. Маски свертываются с изображением для вычисления производных изображения, G_x и G_y имеют вид:

$$G_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

и

$$G_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Величина градиента и фаза определяются следующим образом:

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (10)$$

и

$$\theta_s = \arctan\left(\frac{G_y}{G_x}\right). \quad (11)$$

Для повышения эффективности фильтра Собеля обычная маска заменяется локальной дисперсией изображения. Локальная дисперсия [26] определяет изменчивость или разброс интенсивности пикселя и работает вокруг значений соседних пикселей. Если дисперсия велика, то значения интенсивности пикселей, скорее всего, быстро меняются, что указывает на наличие границы. Локальная дисперсия изображения оценивается как

$$I_{Lvar} = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (I(x, y) - \mu)^2, \quad (12)$$

где μ — среднее значение яркостей элементов изображения $I(x, y)$ в локальной окрестности. Таким образом, предлагаемый улучшенный фильтр Собеля может быть выражен:

$$G'_x = \begin{bmatrix} -I_{Lvar} & 0 & I_{Lvar} \\ -2 & 0 & 2 \\ -I_{Lvar} & 0 & I_{Lvar} \end{bmatrix}; \quad (13)$$

$$G'_y = \begin{bmatrix} I_{Lvar} & 2 & I_{Lvar} \\ 0 & 0 & 0 \\ -I_{Lvar} & -2 & -I_{Lvar} \end{bmatrix}. \quad (14)$$

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Эффективность предложенного метода grab-cut, улучшенного с помощью оператора Собеля, была исследована на самостоятельно подготовленных образцах бетона с трещинами. В предлагаемых методах сначала используется алгоритм grab-cut для выделения части трещины, которая называется областью интереса бетонной конструкции. После этого для выделения краев или границ области трещин используется улучшенный фильтр Собеля. Целью предлагаемого метода является обнаружение трещин на цифровых изображениях. Этапы подготовки образцов бетона с трещинами были рассмотрены в данном разделе. Кроме того, была проведена оценка эффективности метода на основе сравнительной оценки трещин между другими существующими методами и предлагаемым методом. Для сравнительного анализа использовались такие существующие методы, как оператор Превитт [27], оператор Роберта [27], оператор LoG [27], оператор Zero-cross [27], оператор Кэнни [27], Sobel [25] и метод Оцу [9]. На рис. 6 и 7 показан результат выполнения всех шагов предложенного метода.

Целью предлагаемого метода является обнаружение трещин на цифровых изображениях бетонных конструкций. Эта задача решается с помощью предложенного метода — grab-cut improved Sobel. Здесь алгоритм grab-cut используется для выделения трещины, а улучшенный алгоритм Собеля выделяет края трещины. Поскольку здесь не проводится измерение размеров и глубины трещины, эффективность предлагаемого метода оценивается только качественно, т.е. визуально. Предлагаемый метод включает в себя этапы выделения области трещины и последующего обнаружения трещины в бетонных конструкциях, поэтому для иллюстрации результатов выполнения этапов предлагаемого метода использованы рис. 6 и 7. Предложенный метод позволяет обнаружить мелкие трещины на цифровых изображениях бетонных конструкций. Поскольку природа каждой трещины различна, на полученных изображениях можно увидеть различные типы трещин. Поэтому для лучшего анализа и оценки эффективности предложенного метода был проведен сравнительный анализ только шести образцов из множества сформированных образцов. Сравнительный анализ существующего и предлагаемого метода представлен на рис. 8—13. Эти результаты очень важны для лучшего анализа и проверки работы. В работе Lee и др. [20] для диагностики поверхностных трещин использовался метод морфологической обработки изображений. Однако эффективность метода была ограничена, поскольку область трещин выделялась вручную. Кроме того, процесс расширения с последующей эрозией сильно зависел от шума изображения, что влияло на оценку мелких трещин. В предлагаемом методе используются функции фильтра grab-cut и улучшенного фильтра Собеля, где grab-cut обеспечивает выделение области трещин, а улучшенный фильтр Собеля — их обнаружение. Кроме того, предложенный метод нечувствителен к шуму благодаря выделению области трещин, а также правильно выделяет читаемые особенности, такие как края или границы. Таким образом, предложенный метод позволяет обнаруживать мелкие, умеренные и большие трещины в бетонных конструкциях.

Самое первое изображение (а) на рис. 6 и 7 представляет собой изображение самостоятельно подготовленных образцов с трещинами. Эти образцы с трещинами были разделены на передний и

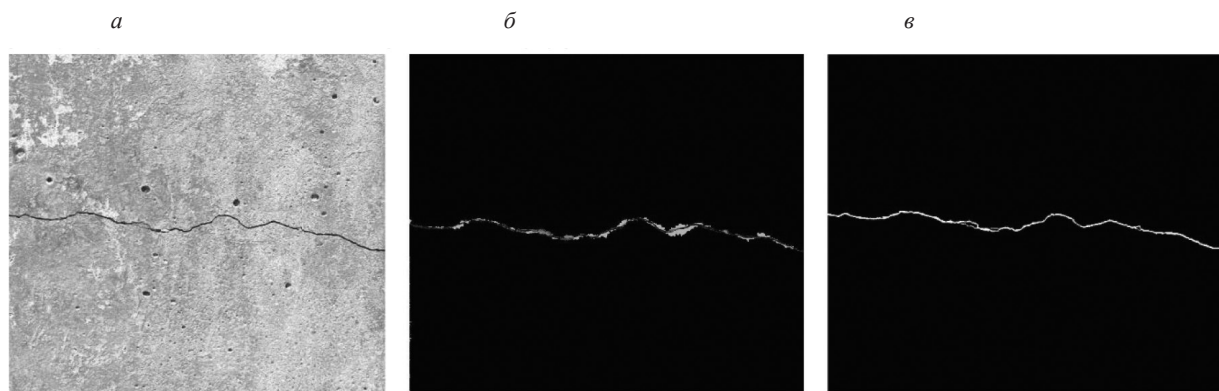


Рис. 6. Образец бетона 1 размерами 100×100×500 мм (а); отделение переднего и заднего плана методом grab-cut (б) и контроль трещин по предложенной методике (в).

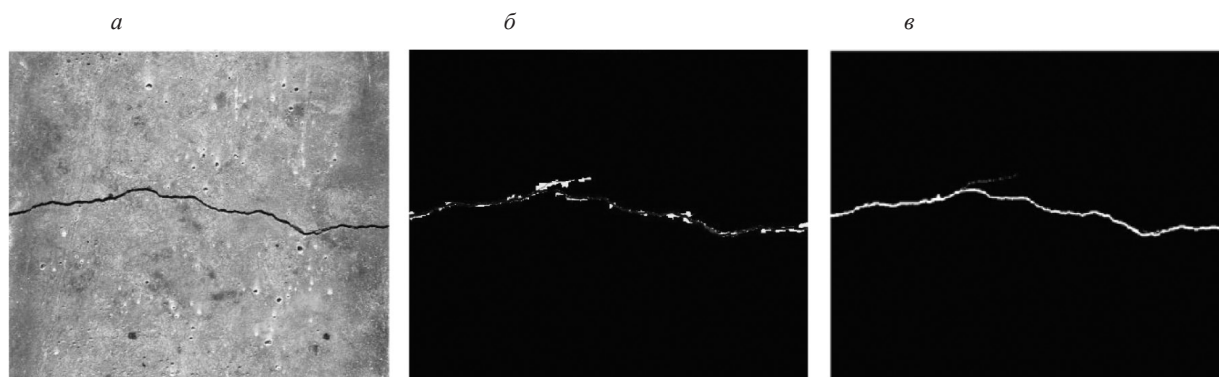


Рис. 7. Образец бетона 2 размерами 100×100×500 мм (а); отделение переднего и заднего плана методом grab-cut (б) и контроль трещин по предложенной методике (в).

задний планы с помощью метода grab-cut, как показано на изображениях (б) рис. 6 и 7 соответственно. Этот этап является чрезвычайно важным, поскольку он позволяет выделить область пикселей с трещинами для обнаружения трещин. Кроме того, он позволяет выделить нужную интересующую область из ряда других помех, таких как шум и размытие изображения. Затем сегментированные изображения обрабатываются предложенным методом для выявления трещин, как показано на изображениях (в) рис. 6 и 7 соответственно.

На рис. 8—13 показан сравнительный анализ трещин по сравнению с другими существующими и предлагаемым методом для образцов бетона 1—6 соответственно. Изображение (а) на рис. 8—13 иллюстрирует изображения самостоятельно подготовленных образцов с трещинами. Кроме того, изображения (б—з) на рис. 7—12 демонстрируют результаты анализа трещин по методам Превитт [27], Роберта [27], LoG [27], Zero-cross [27], Кэнни [27], Собеля [25] и Оцу [9] соответственно. На последнем изображении (и) рис. 8—13 показан результат распознавания трещин с помощью предложенного метода grab-cut, улучшенного Собелем. Сравнительная оценка других существующих и предлагаемого метода проводилась на одной и той же экспериментальной установке. Для сравнительного анализа были выбраны такие методы, которые дают только визуальный или качественный анализ, но не количественный. Для проведения эксперимента использовались одинаковые изображения трещин, язык программирования и среда, т.е. сначала выделяется область трещины с помощью алгоритма grab-cut. Затем к сегментированной области применяются различные существующие и предлагаемые методы для идентификации трещины. Кроме того, в состав схемы эксперимента также входит метод удаления шумов. Все это было сделано для того, чтобы сохранить единообразие при сравнительном анализе.

На основе сравнительного иллюстративного анализа было установлено, что предложенный метод является наиболее подходящим для распознавания трещин на изображениях бетонных объ-

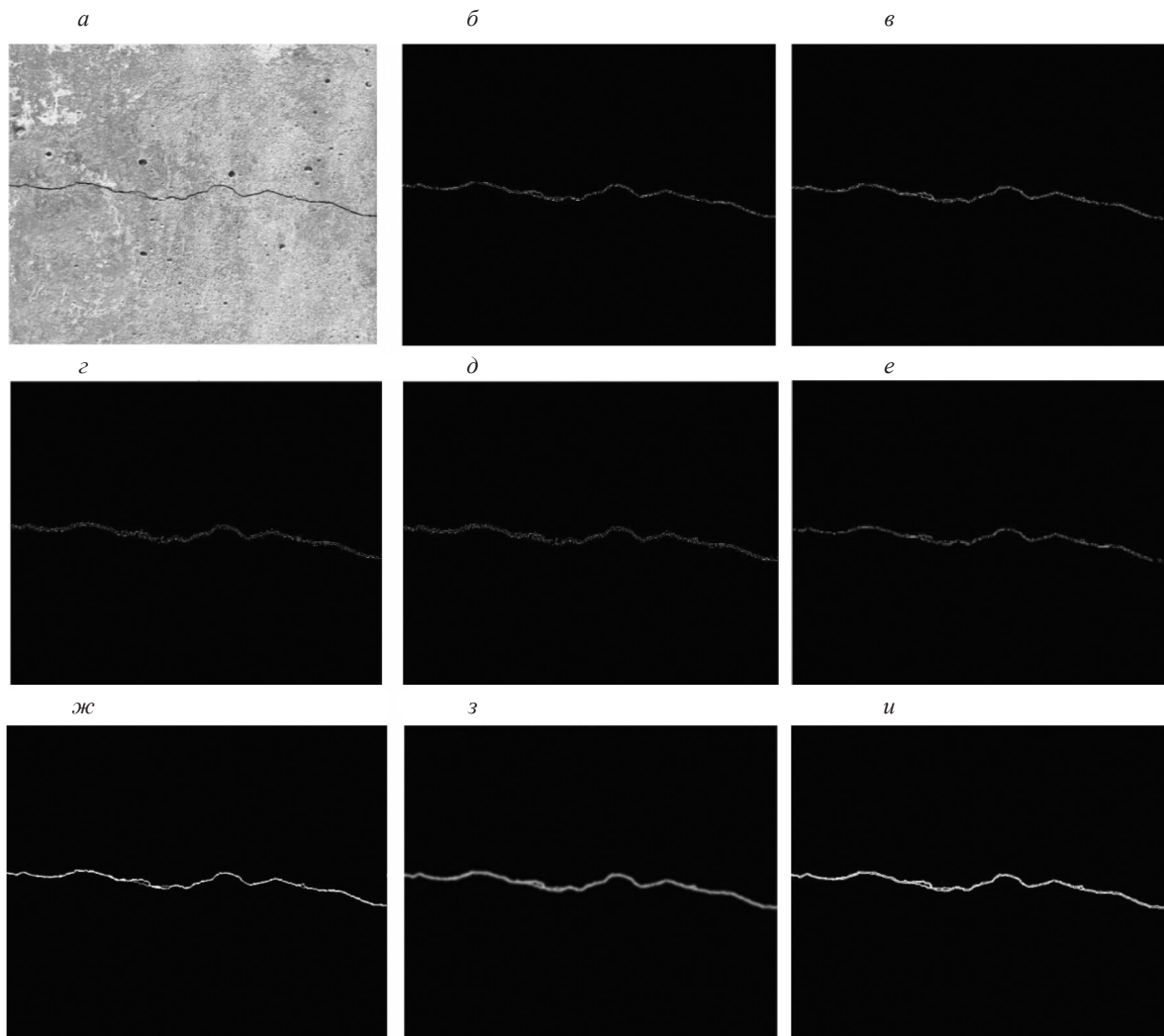


Рис. 8. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 1 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

ектов. На изображениях, полученных с помощью предложенного метода, хорошо видны края, границы и резкие изменения интенсивности трещин. Результаты применения таких алгоритмов, как LoG [27], Zero-cross и Кэнни, демонстрируют нечеткость и размытость изображения. Кроме того, результаты выполнения алгоритмов Превитт и Роберта показывают наложение трещин друг на друга, что приводит к ложному детектированию трещин. Кроме этих методов, результаты методов Собеля и Оцу демонстрируют недостаточное и избыточное сглаживание изображения, что приводит к неправильному определению трещин. В методе Оцу всегда требуется ручная настройка порога. В некоторых случаях, как показано на рис. 9, результаты применения этих методов демонстрируют потерю информации.

Для облегчения реализации предложенного метода было разработано веб-приложение. Он обеспечивает визуальный анализ изображений, что позволяет в режиме реального времени обнаруживать трещины в бетонных конструкциях. Веб-приложение создано с помощью конструктора приложений MATLAB. После обработки программа генерирует файл '.mlapp'. В данном веб-приложении описана интеграция предложенного метода с приложением в реальном времени. Разработанное веб-приложение иллюстрирует сравнительный качественный анализ существующего и предлагаемого методов. Однако веб-приложение для контроля состояния конструкций требует только входного изображения и результата работы предложенного метода, как показано на

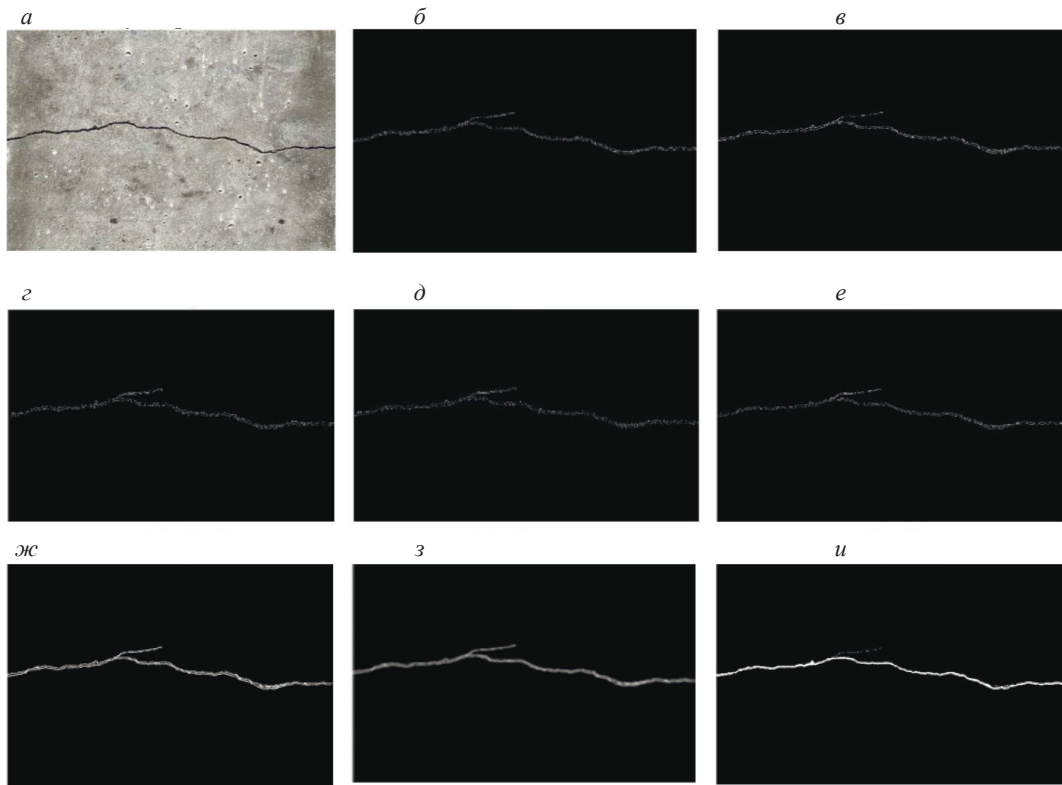


Рис. 9. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 2 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

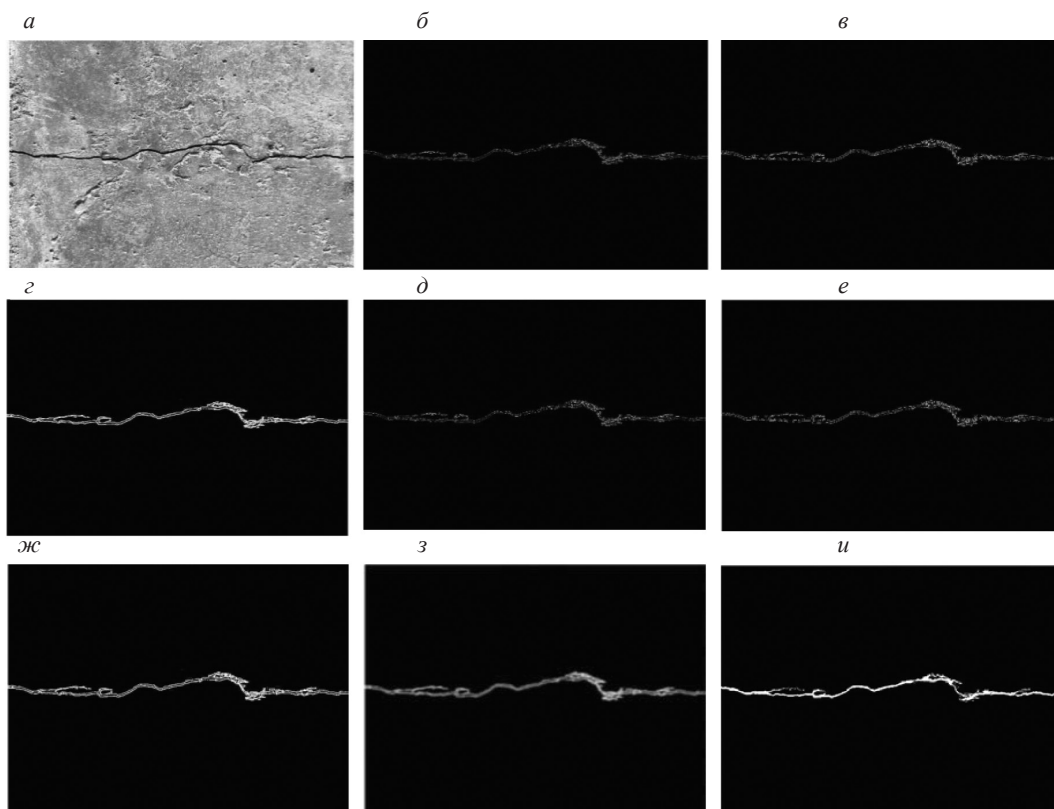


Рис. 10. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 3 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

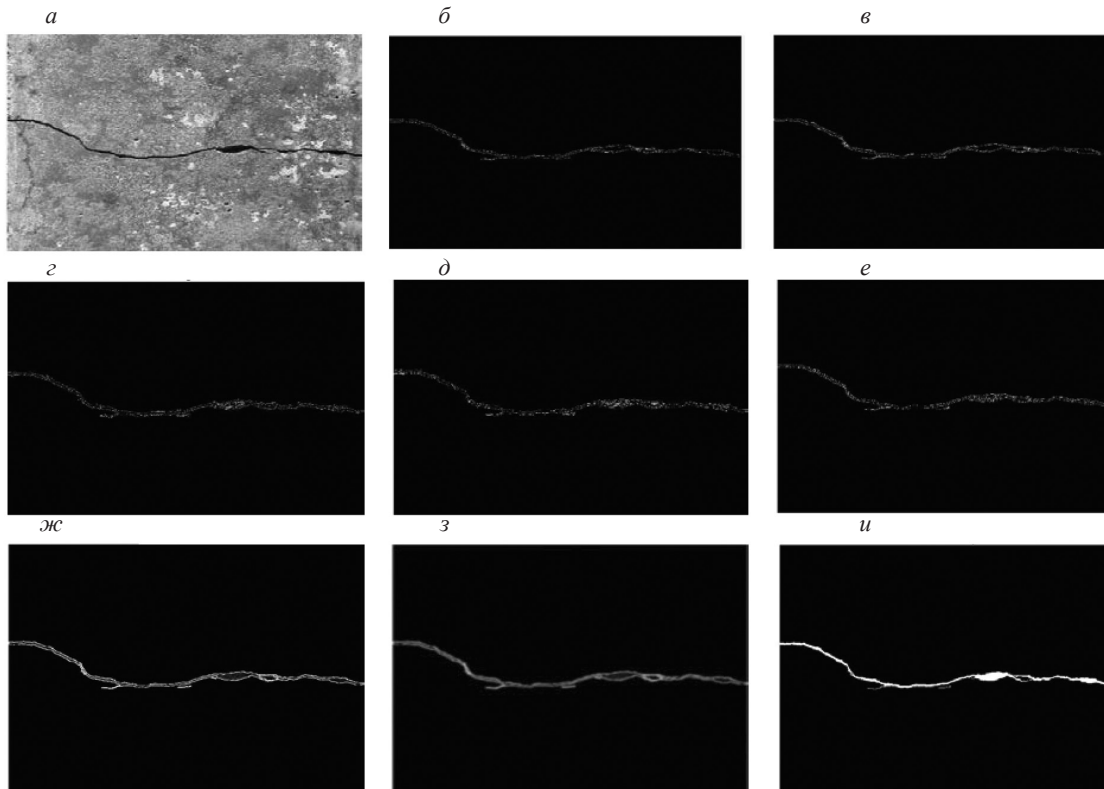


Рис. 11. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 4 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

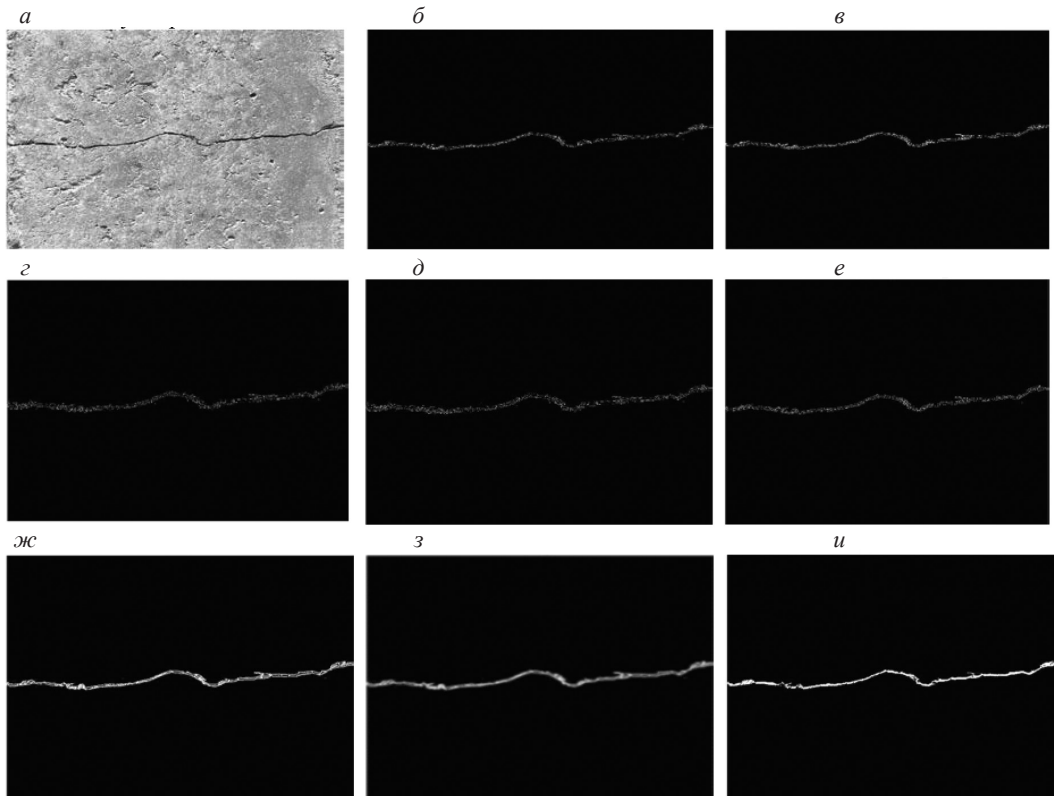


Рис. 12. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона 5 (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

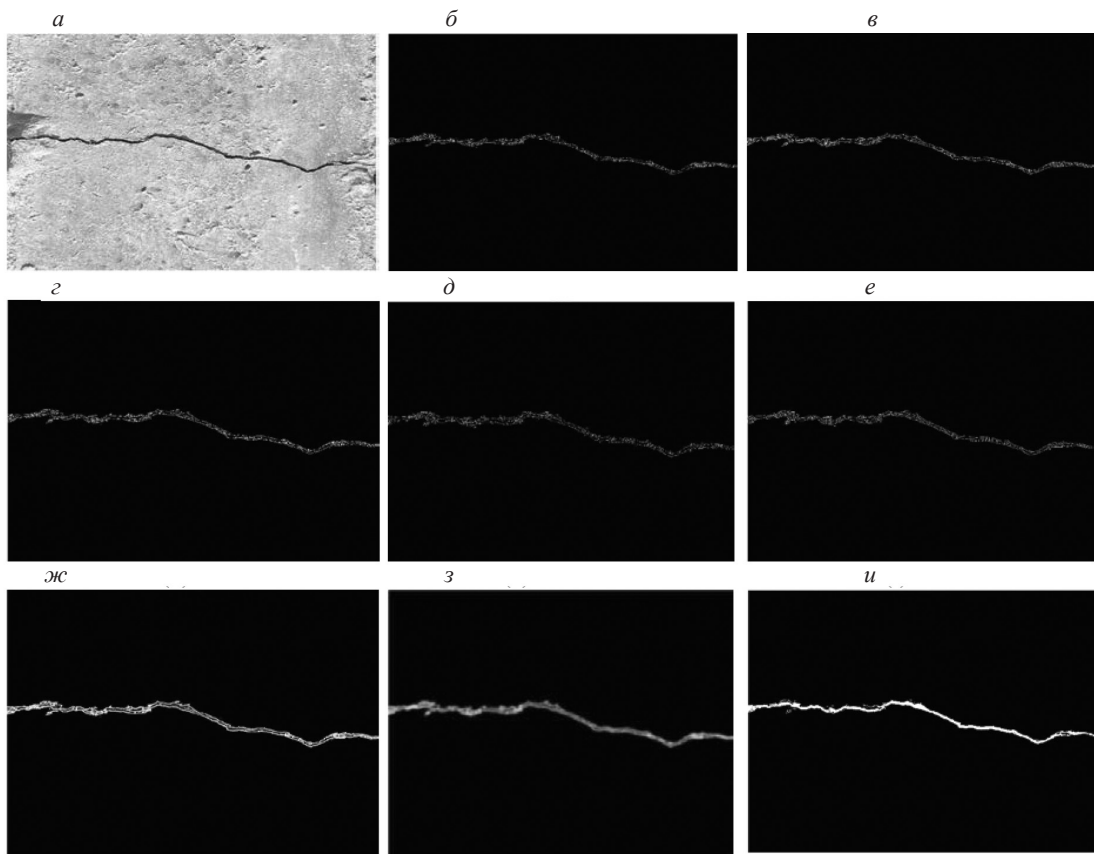


Рис. 13. Сравнительный анализ результатов выявления трещин, где образец бетона б (исходное изображение) (а); результат применения алгоритма Превитт (б); Роберта (в); LoG (г); Zero-cross (д); Кэнни (е); Собеля (ж); Оцу (з) и предлагаемой методики (и).

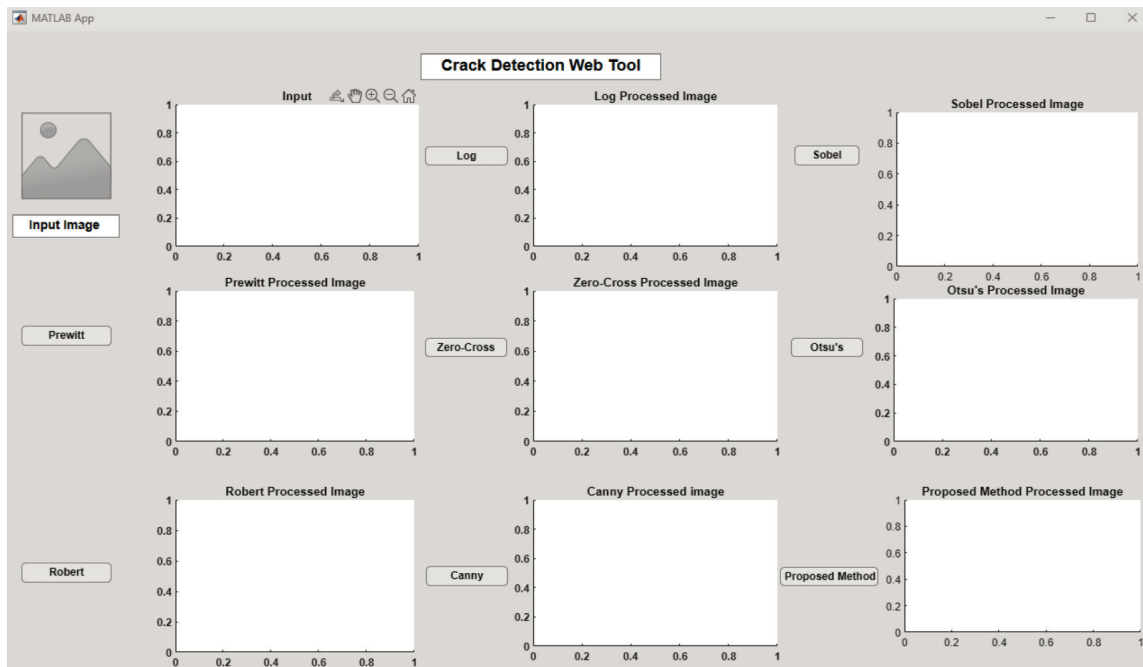


Рис. 14. Предлагаемая концепция веб-приложения для распознавания трещин при проведении сравнительного качественного анализа.

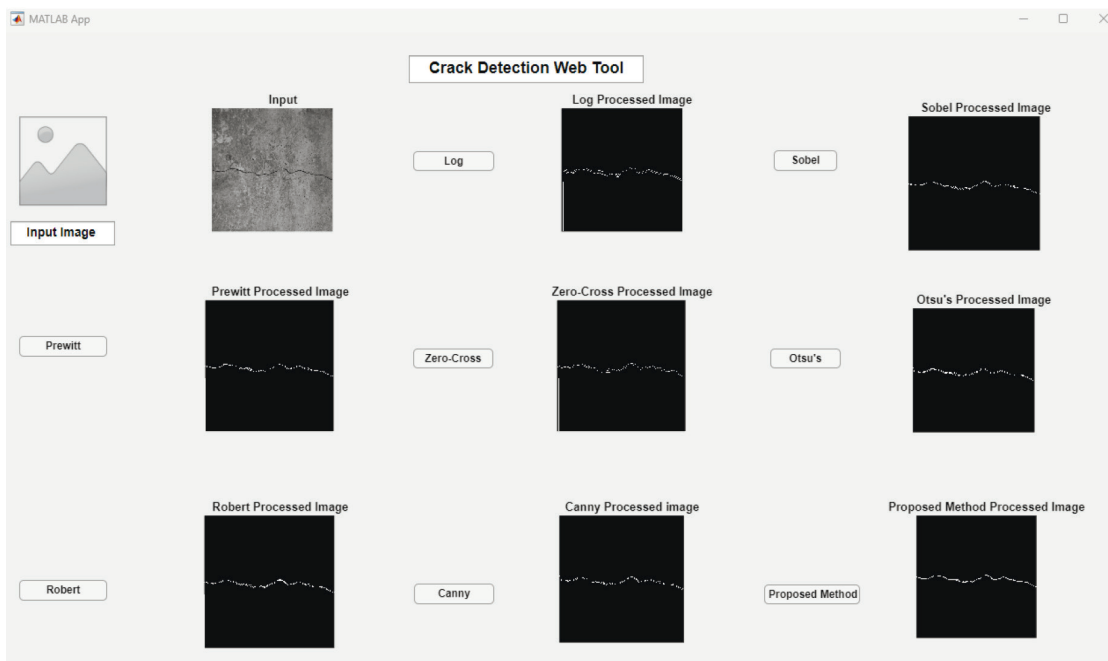


Рис. 15. Результат сравнительного качественного анализа предложенного веб-приложения для обнаружения трещин.

рис. 16. На рис. 14 показана демонстрационная версия веб-приложения, а на рис. 15 — результат сравнительного качественного анализа, полученный с помощью веб-приложения. Данное веб-приложение может быть использовано службой мониторинга состояния конструкций для удобства практического применения в режиме реального времени. Автоматизация, о которой идет речь в заголовке, в основном подразумевает разработку алгоритмов, позволяющих автоматически обна-

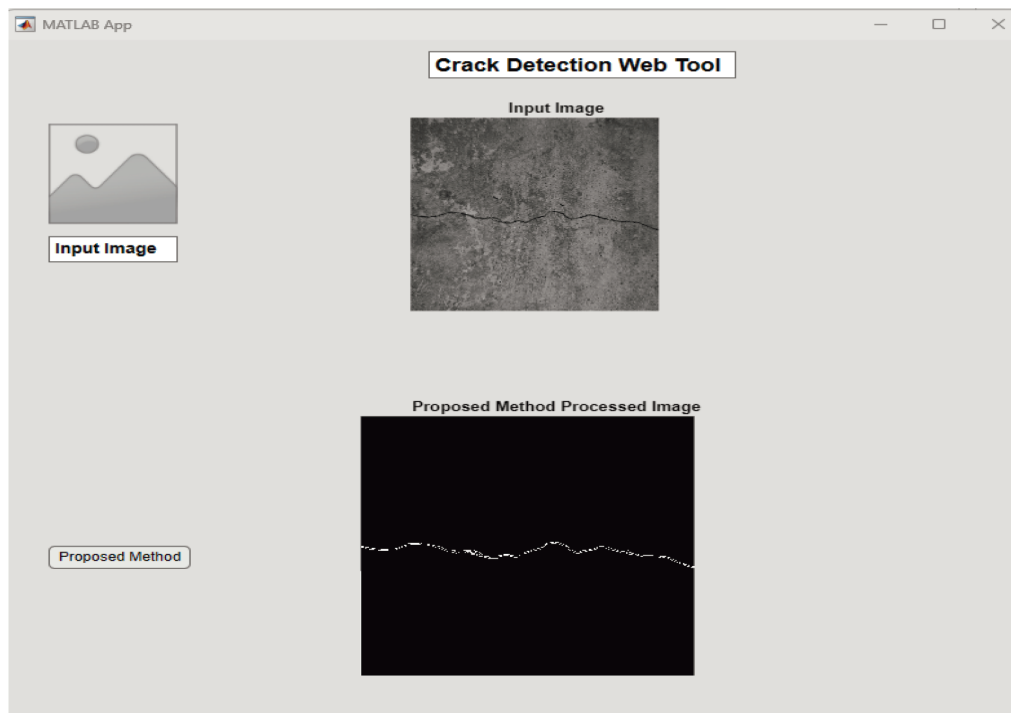


Рис. 16. Результат работы предлагаемого веб-приложения по выявлению трещин.

руживать трещины на изображениях при минимальном вмешательстве человека. Это позволяет получить второе заключение дефектоскописта, а также подтвердить результат ручной проверки. Разработанное веб-приложение описывает, каким образом предложенный метод может быть использован в приложениях реального времени и как мы можем извлечь из него пользу. Веб-приложение просто предлагает предварительный сравнительный анализ существующего и предлагаемого методов. Более того, он также обеспечивает прямую связь между входным изображением и результатом, полученным с помощью предлагаемого метода. Для агентства по мониторингу состояния конструкций разработанное веб-приложение необходимо, поскольку оно позволяет подтвердить обнаружение трещин на основе сравнительного анализа, а также путем отдельного анализа.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Существующие методы обнаружения трещин, такие как ручной и визуальный осмотр, требуют большого вмешательства человека. Поэтому для автоматизации процесса выявления трещин в данной работе предлагается новый подход, основанный на методе обработки изображений, т.е. grab-cut, улучшенный Собелем, для обнаружения трещин в бетонных конструкциях. Поскольку полученные изображения для анализа трещин характеризуются низким контрастом, неравномерной освещенностью и шумами, для выделения области интереса был использован метод grab-cut. Он сегментирует область на основе особенностей переднего и заднего планов изображения. Кроме того, для корректной оценки трещин был разработан усовершенствованный метод Собеля. Усовершенствованный метод Собеля включает в себя модифицированную горизонтальную и вертикальную маску на основе локальной дисперсии.

На основании сравнительного анализа можно утверждать, что предложенный метод является наиболее подходящим для обнаружения трещин на изображениях бетонных конструкций. Он превосходит другие существующие методы, такие как метод Превитта, Роберта, LoG, Zero-cross, Кэнни, Собеля и Оцу соответственно. Предложенный метод обнаружения трещин может быть использован в системе мониторинга состояния конструкций. Для удобства и практического применения было разработано веб-приложение предлагаемого метода на базе MATLAB. Его можно использовать для оценки трещин в мостах, плотинах, железных дорогах, водопропускных трубах, каменной кладке зданий, поверхностях стен, дорогах и т.д. Преимуществом данного метода является четкое и точное выявление трещин на изображениях. Предложенный метод может быть легко интегрирован во многие модели обнаружения и категоризации трещин, разработанные в будущем, поскольку трещины успешно отделяются от фона.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mohan A., Poobal S.* Crack detection using image processing: A critical review and analysis // *Alexandria Engineering Journal*. Jun. 2018. V. 57. No. 2. P. 787—798. DOI: 10.1016/j.aej.2017.01.020
2. *Yao Y., Tung S.-T. E., Glisic B.* Crack detection and characterization techniques—An overview // *Struct Control Health Monit.* Dec. 2014. V. 21. No. 12. P. 1387—1413. DOI: 10.1002/stc.1655
3. *Munawar H.S., Hammad A.W.A., Haddad A., Soares C.A.P., Waller S.T.* Image-Based Crack Detection Methods: A Review // *Infrastructures (Basel)*. Aug. 2021. V. 6. No. 8. P. 115. DOI: 10.3390/infrastructures6080115
4. *Golewski G.L.* The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review // *Buildings*. Mar. 2023. V. 13. No. 3. P. 765. DOI: 10.3390/buildings13030765
5. *Fujita Y., Hamamoto Y.* A robust automatic crack detection method from noisy concrete surfaces // *Mach. Vis. Appl.* Mar. 2011. V. 22. No. 2. P. 245—254. DOI: 10.1007/s00138-009-0244-5
6. *Dwivedi S.K., Vishwakarma M., Prof. Soni A.* Advances and Researches on Non Destructive Testing: A Review // *Mater. Today Proc.* 2018. V. 5. No. 2. P. 3690—3698. DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.620
7. *Ai D., Jiang G., Lam S.-K., He P., Li C.* Computer vision framework for crack detection of civil infrastructure—A review // *Eng. Appl. Artif. Intell.* Jan. 2023. V. 117. P. 105478. DOI: 10.1016/j.engappai.2022.105478
8. *Abdel-Qader I., Abudayyeh O., Kelly M.E.* Analysis of Edge-Detection Techniques for Crack Identification in Bridges // *Journal of Computing in Civil Engineering*. Oct. 2003. V. 17. No. 4. P. 255—263. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2003)17:4(255)
9. *Talab A.M.A., Huang Z., Xi F., HaiMing L.* Detection crack in image using Otsu method and multiple filtering in image processing techniques // *Optik (Stuttg.)*. Feb. 2016. V. 127. No. 3. P. 1030—1033. DOI: 10.1016/j.ijleo.2015.09.147

10. *Hutchinson T.C., Chen Z.* Improved Image Analysis for Evaluating Concrete Damage // *Journal of Computing in Civil Engineering*. May 2006. V. 20. No. 3. P. 210—216. DOI: 10.1061/(ASCE)0887-3801(2006)20:3(210)
11. *Yamaguchi T., Hashimoto S.* Fast crack detection method for large-size concrete surface images using percolation-based image processing // *Mach. Vis. Appl.* Aug. 2010. V. 21. No. 5. P. 797—809. DOI: 10.1007/s00138-009-0189-8
12. IEEE Staff and IEEE Staff. 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing.
13. *Dube U., Subramaniam S., Subramaniam S.* Cost Effective Railway Track Fault Detection Using Image Processing // *SSRN Electronic Journal*. 2021. DOI: 10.2139/ssrn.3882749
14. *Lattanzi D., Miller G.R.* Robust Automated Concrete Damage Detection Algorithms for Field Applications // *Journal of Computing in Civil Engineering*. Mar. 2014. V. 28. No. 2. P. 253—262. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000257
15. *Kabir S., Rivard P., He D.-C., Thivierge P.* Damage assessment for concrete structure using image processing techniques on acoustic borehole imagery // *Constr. Build. Mater.* Oct. 2009. V. 23. No. 10. P. 3166—3174. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.013
16. *Lee J.H., Lee J.M., Kim H.J., Moon Y.S.* Machine Vision System for Automatic Inspection of Bridges // In 2008 Congress on Image and Signal Processing. IEEE. 2008. P. 363—366. DOI: 10.1109/CISP.2008.672
17. *Kim H., Lee J., Ahn E., Cho S., Shin M., Sim S.-H.* Concrete Crack Identification Using a UAV Incorporating Hybrid Image Processing // *Sensors*. Sep. 2017. V. 17. No. 9. P. 2052. DOI: 10.3390/s17092052
18. *Khan Md. A.-M., Kee S.-H., Pathan A.-S. K., Nahid A.-A.* Image Processing Techniques for Concrete Crack Detection: A Scientometrics Literature Review // *Remote Sens (Basel)*. May 2023. V. 15. No. 9. P. 2400. DOI: 10.3390/rs15092400
19. *Fujita Y., Mitani Y., Hamamoto Y.* A Method for Crack Detection on a Concrete Structure // In 18th International Conference on Pattern Recognition (ICPR'06). IEEE. 2006. P. 901—904. DOI: 10.1109/ICPR.2006.98
20. *Lee B.Y., Kim Y.Y., Yi S.-T., Kim J.-K.* Automated image processing technique for detecting and analysing concrete surface cracks // *Structure and Infrastructure Engineering*. Jun. 2013. V. 9. No. 6. P. 567—577. DOI: 10.1080/15732479.2011.593891
21. *Giakoumis I., Nikolaidis N., Pitas I.* Digital image processing techniques for the detection and removal of cracks in digitized paintings // *IEEE Transactions on Image Processing*. Jan. 2006. V. 15. No. 1. P. 178—188. DOI: 10.1109/TIP.2005.860311
22. *Kumar R.R., Kumar A., Srivastava S.* Anisotropic Diffusion Based Unsharp Masking and Crispening for Denoising and Enhancement of MRI Images // In 2020 International Conference on Emerging Frontiers in Electrical and Electronic Technologies (ICEFEET). IEEE. Jul. 2020. P. 1—6. DOI: 10.1109/ICEFEET49149.2020.9186966
23. *Wang Z., Lv Y., Wu R., Zhang Y.* Review of GrabCut in Image Processing // *Mathematics*. Apr. 2023. V. 11. No. 8. P. 1965. DOI: 10.3390/math11081965
24. *Gao Z., Shi P., Karimi H.R., Pei Z.* A mutual GrabCut method to solve co-segmentation // *EURASIP J Image Video Process.* Dec. 2013. V. 2013. No. 1. P. 20. DOI: 10.1186/1687-5281-2013-20
25. *Kanopoulos N., Vasanthavada N., Baker R.L.* Design of an image edge detection filter using the Sobel operator // *IEEE J Solid-State Circuits*. Apr. 1988. V. 23. No. 2. P. 358—367. DOI: 10.1109/4.996
26. *Kumar A., Srivastava S.* Restoration and enhancement of breast ultrasound images using extended complex diffusion based unsharp masking // *Proc. Inst. Mech. Eng. H.* Jan. 2022. V. 236. No. 1. P. 12—29. DOI: 10.1177/09544119211039317
27. *Öztürk Ş., Akdemir B.* Comparison of Edge Detection Algorithms for Texture Analysis on Glass Production // *Procedia Soc. Behav. Sci.* Jul. 2015. V. 195. P. 2675—2682. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.477