Оригинальная статья

УДК 004.42 © К.И. Петерс✉[1], А.Д. Кузнецов[2], 2025

[1] ООО ВЗРЫВ ГРУПП»,650054, г. Кемерово, Россия
[2] ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет, 650000, г. Кемерово, Россия
✉ e–mail: k.peters@vgroup.one

Original Paper

UDC 004.42 © K.I. Peters✉[1], A.D. Kuznetsov[2], 2025

[1] VZRYV GRUPP LLC, Kemerovo, 650054, Russian Federation
[2] Kemerovo State University, Kemerovo, 650000, Russian Federation
✉ e–mail: k.peters@vgroup.one

Специализированное программное обеспечение для проектирования буровзрывных работ: архитектура, функциональность, назначение*

Specialized software for drilling and blasting operations design: architecture, functionality, purpose

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2025-12-125-131

В статье рассматривается разработка специализированного веб-приложения для цифрового проектирования буровзрывных работ (БВР) на открытых горных работах. Описана архитектура программного обеспечения, включающего сервер с базой данных и клиентский 3D-интерфейс, что обеспечивает многопользовательский доступ и централизованное хранение данных. Приведены реализованные модули: проектирование бурения (в т.ч. автоматизация расстановки скважин с учетом цифровой модели рельефа) и верификация фактически пробуренных скважин (контроль отклонений на основе GNSS-навигации и телеметрии буровых станков). Особое внимание уделено инновационным решениям – интеграции с системами позиционирования и сбора данных, использованию Big Data, планируемому модулю имитационного моделирования взрывов и применению методов искусственного интеллекта для оптимизации параметров. Представлены результаты опытной эксплуатации, подтвердившие сокращение времени планирования на 50-60% и повышение точности соблюдения проектных параметров. Обсуждаются перспективы развития системы до конца 2025 г., включая добавление функционала расчета зарядов и автоматизации процесса взрывания, что позволит создать полноценный отечественный программный комплекс для БВР.

Ключевые слова: *буровзрывные работы, цифровое проектирование, веб-приложение, 3D-моделирование, телеметрия бурения, цифровой двойник, имитационное моделирование, Big Data, автоматизация БВР.*

ПЕТЕРС К.И.
Заместитель директора по перспективному развитию технологий БВР, ООО ВЗРЫВ ГРУПП», 650054, г. Кемерово, Россия, e-mail: k.peters@vgroup.one

КУЗНЕЦОВ А.Д.
Директор Центра геодезии, аэросъемки и кадастровых работ Института цифры, ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет», 650000, г. Кемерово, Россия, e-mail: adkuz@inbox.ru

** Исследование выполнено в рамках мероприятия «Геоинформационная система цифрового регионального управления» комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения» утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 11 мая 2022 г. № 1144-р. Правообладатель веб-приложения для цифрового проектирования буровзрывных работ – ООО «ВЗРЫВ ГРУПП».*

Для цитирования: Петерс К.И., Кузнецов А.Д. Специализированное программное обеспечение для проектирования буровзрывных работ: архитектура, функциональность, назначение // Уголь. 2025;(12):125-131. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-125-131.

Abstract

The article discusses the development of a specialized web application for the digital design of drilling and blasting operations in open-pit mining. The architecture of the software is described, which includes a data storage server and a 3D client interface, which provides multi-user access and centralized data storage. The implemented modules are presented: drilling design (including automation of well placement taking into account the digital relief model) and verification of actually drilled wells (control of deviations based on GNSS navigation and telemetry of drilling rigs). Special attention is paid to innovative solutions such as integration with positioning and data acquisition systems, the use of Big Data, the planned explosion simulation module, and the use of artificial intelligence methods to optimize parameters. The results of trial operation are presented, confirming a 50-60% reduction in planning time and an increase in the accuracy of compliance with design parameters. Prospects for the development of the system by the end of 2025 are being discussed, including the addition of charge calculation and automation of the detonation process, which will create a full-fledged domestic software package for DBO.

Keywords: *drilling and blasting, digital design, web application, 3D modeling, drilling telemetry, digital twin, simulation modeling, Big Data, DBO automation.*

Acknowledgements

The research was carried out within the framework of the event "Geoinformation system of digital regional management" of the comprehensive scientific and technical program of the full innovation cycle "Development and implementation of a complex of technologies in the fields of exploration and extraction of solid minerals, industrial safety, bioremediation, creation of new products of deep processing from coal raw materials while consistently reducing the environmental impact and risks to life of the population" approved by Decree of the Government of the Russian Federation dated May 11, 2022 No. 1144-r.

For citation

Peters K.I., Kuznetsov A.D. Specialized software for drilling and blasting operations design: architecture, functionality, purpose. *Ugol'*. 2025;(12):125-131. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-12-125-131.

ВВЕДЕНИЕ

Современная горнодобывающая промышленность сталкивается с комплексом серьезных вызовов, включая ограниченность ресурсов, усложнение добычи из-за более глубокого залегания полезных ископаемых, а также усиление государственного регулирования в сфере охраны труда и окружающей среды [1]. В ответ на эти вызовы в отрасль активно внедряются цифровые технологии, с помощью которых могут быть дополнительно оптимизированы такие компоненты горнодобывающей промышленности, как планирование, управление и использование ресурсов, особенно нестабильных; максимизация эффективности добычи и переработки; смягчение истощения местных ресурсов; исследования и разработка альтернатив; планирование и эксплуатация на основе данных; улучшенная переработка [2]. Например, технологии создания цифровых двойников позволяют осуществлять мониторинг и моделирование поведения горных пород в режиме реального времени, а машинное обучение открывает новые возможности для оценки их параметров [3]. Однако процесс цифровизации затрудняется недостатком ресурсов для анализа накопленных данных и отсутствием эффективной коммуникации между различными направлениями деятельности [4]. Тем не менее использование цифровых технологий создает основу для повышения эффективности добычи, оптимизации производственных процессов и улучшения экологической безопасности, что делает цифровизацию ключевым фактором развития отрасли в современных условиях.

Буровзрывные работы (БВР) являются одним из самых сложных и затратных этапов разработки месторождения при открытой добыче. Так, в себестоимости добычи доля подготовки массовых взрывов достигает ~30% от общих затрат. Качество проектирования БВР напрямую влияет на последующие процессы – чем оптимальнее параметры взрыва, тем ниже затраты на выемку, транспортировку и переработку горной массы. Традиционно проектирование ведется «на бумаге» или с использованием разрозненных программ, что замедляет работу и чревато неточностями [5]. Цифровая трансформация отрасли призвана решить эти проблемы, обеспечив интеграцию данных и автоматизацию расчетов.

Как отмечают исследователи, до недавнего времени БВР выполнялись без применения цифровых технологий, что ограничивало возможности снижения затрат и повышения эффективности. Создание единой цифровой платформы для проектирования позволяет оптимизировать процессы подготовки массового взрыва и повысить уровень промышленной безопасности [6]. Государственная программа развития до 2035 г. относит к приоритетам цифровизации угольной отрасли создание интерактивной системы проектирования скважин, применение аэросъемки и 3D-моделирования [7]. Первые пилотные проекты уже продемонстрировали преимущества: использование 3D-моделей месторождения при планировании горных работ сокращает время выполнения задач на ~60% и повышает точность модели на 15-20% [8].

Зарубежный опыт также подчеркивает, что современное планирование и продвинутый софт для проектирования взрывов являются ключевыми факторами повышения производительности и безопасности горных работ [9]. Например, в работе [10] продемонстрированы результаты проверки проекта буровых работ с помощью программного обеспечения на основе данных аэрофотосъемки – в результате выявлено, что цифровое решение обеспечивает детальный анализ выполнения бурения и позволяет адаптировать параметры проведения взрывных работ к конкретной ситуации на месторождении, тем самым повышая степень безопасности выполнения взрыва.

Настоящая статья посвящена созданию и развитию веб-приложения для цифрового проектирования БВР на открытых горных работах. В первом разделе рассмотрены архитектура программного обеспечения и его отличия от традиционных настольных (desktop) систем. Далее описаны реализованные модули (проектирование бурения и верификация скважин), пользовательский интерфейс и сценарии работы. Особое внимание уделено инновационным решениям – интеграции с геоинформационными данными, применению телеметрии бурения и перспективам имитационного моделирования. В заключение обсуждаются планы развития системы (полный функционал проектирования массовых взрывов к концу 2025 г.) и ожидаемый эффект от ее внедрения. Статья выполнена в научно-техническом стиле, без углубления в частные методики расчета зарядов и взрывных эффектов, фокусируясь на программных решениях и технологиях проектирования.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Архитектура программного обеспечения

Разрабатываемое программное обеспечение для проектирования БВР является доработанной версией ПО «Геоинформационная система цифрового регионального управления», созданного в рамках реализации мероприятия комплексной научно-технической программы полного инновационного цикла «Разработка и внедрение комплекса технологий в областях разведки и добычи твердых полезных ископаемых, обеспечения промышленной безопасности, биоремедиации, создания новых продуктов глубокой переработки из угольного сырья при последовательном снижении экологической нагрузки на окружающую среду и рисков для жизни населения», и реализовано в виде веб-приложения, что выгодно отличает его от традиционных настольных САПР: решение в «онлайн»-формате не имеет проблемы совместимости, позволяет обновлять данные в режиме реального времени для всех пользователей и поддерживает интерактивную визуализацию, повышая доступность и совместную работу при инженерном моделировании [11]. Веб-архитектура системы подразумевает центральный сервер с базой данных и прикладной логикой, а также клиентский интерфейс, доступный через веб-браузер. Это обеспечивает одновременный доступ нескольких пользователей (инженеров-технологов, маркшейдеров, взрывников) к единому информационному пространству в режиме реального времени.

На текущем этапе реализованы два основных модуля – проектирование бурения и верификация фактически пробуренных скважин. Они аккумулируют профильные данные и обмениваются ими через общий сервер, исключая разрозненные расчеты и ручную передачу информации.

Основой системы является единая база данных скважин, цифрового рельефа и горно-геологической обстановки. Все исходные пространственные данные хранятся в геоинформационной базе: цифровая модель рельефа уступа или всего месторождения, триангуляционные поверхности на основе облака точек и маркшейдерских данных, контуры взрывных блоков, координатная привязка скважин и т.д. Клиентское приложение построено с использованием WebGL-технологий, что позволяет отображать интерактивную 3D-модель участка прямо в браузере. Благодаря этому пользователи могут работать с трехмерным представлением уступа, добавлять и редактировать скважины, видеть рельеф в местах бурения. Веб-интерфейс интегрирован с ГИС-компонентом: так, в одном из пилотных проектов 3D-модели блока до и после взрыва были загружены в веб-приложение для удаленного анализа результатов [8]. Эта архитектура соответствует современному тренду на создание единого информационного пространства БВР.

В разработанном ПО заложена возможность интеграции с внешними датчиками и системами: модуль веб-сервиса через API может получать телеметрическую информацию от буровых станков (координаты, глубины скважин, параметры бурения) и данные маркшейдерии (например, облака точек лазерного сканирования местности). Архитектура системы расширяема – планируется добавление новых модулей (например, расчета зарядов и схем взрывания) без изменения ядра, посредством подключения дополнительных веб-сервисов к общей платформе.

Реализованные модули системы

Модуль проектирования бурения. Данный модуль обеспечивает интерактивное создание проекта буровых работ на выбранном блоке *(см. рисунок)*.

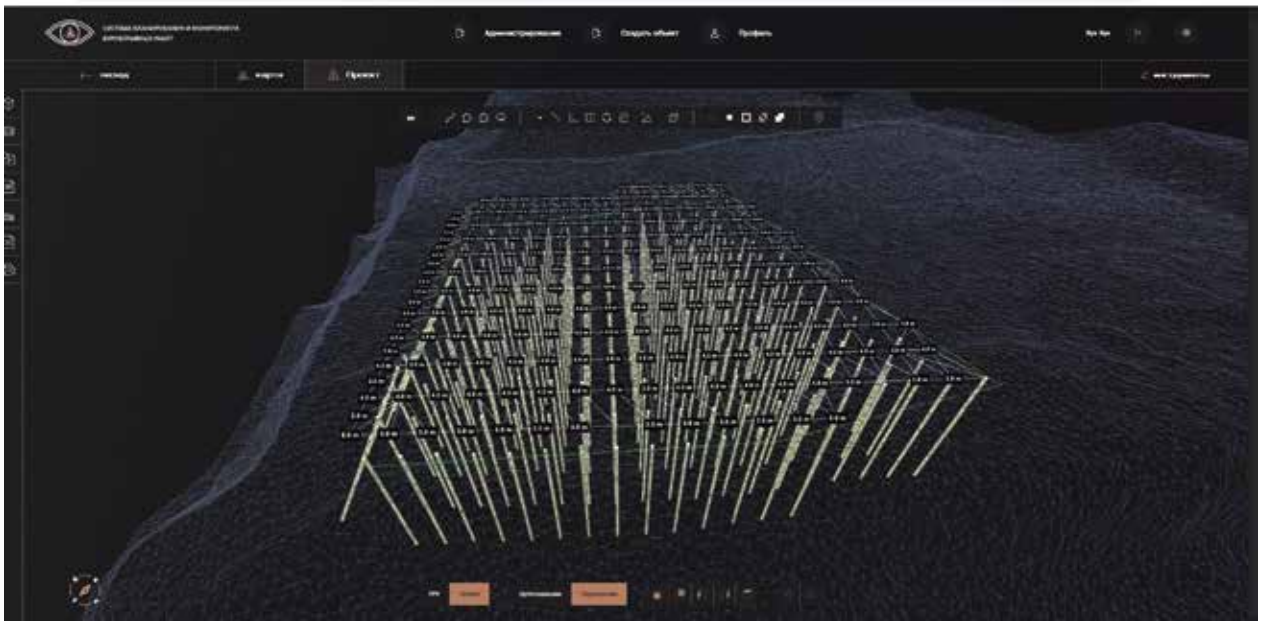
Алгоритм использования модуля предполагает:

1) проектирование границ блока на 3D-модели уступа, ввод ключевых параметров сетки бурения: расстояние между скважинами в ряду, расстояние между рядами, глубина скважин, угол наклона (если наклонное бурение), диаметр и др.; функционал программы позволяет автоматически сгенерировать расстановку скважин по заданной схеме (прямоугольная или треугольная решетка, шахматный порядок) [3] либо использовать инструменты для интерактивного добавления/удаления отдельных скважин и редактирования их положения в ручном режиме. Все сгенерированные скважины отображаются на 3D-модели; цветом или метками обозначаются ключевые атрибуты (например, различия в длине скважин относительно проектной);

2) редактирование параметров скважин в случае выявления неточностей; для повышения точности расчетов модуль использует актуальную цифровую модель поверхности: длины скважин рассчитываются автоматически относительно фактического рельефа, чтобы обеспечить требуемую глубину в проектный горизонт [3];

3) формирование паспорта бурения – комплекта документации, включающего таблицу скважин, схемы расположения и разрезы, необходимые для выполнения работ.

Модуль верификации бурения. Данный компонент предназначен для оперативного учета фактически пробуренных скважин и сравнения их параметров с проектными. В систему могут загружаться данные инструментального контроля: результаты маркшейдерской съемки скважин (координаты фактических устьев и глубины) или телеметрические данные с буровых станков. Современные буровые установки, оснащенные системами навигации и сбора данных, в реальном времени передают координаты и параметры каждой пробуренной скважины с точностью до нескольких сантиметров [12, 13]. Разработанное



Интерфейс модуля проектирования бурения (пример визуализации сетки скважин и параметров блока)
Interface of the drilling design module (an example of visualizing the borehole grid and block parameters)

веб-приложение принимает эти данные (например, через импорт файлов или по сети) и автоматически формирует базу данных фактических скважин [14]. При этом фиксируются отклонения: смещения устья от проектного положения, недобур или перебур по глубине, отклонение по углу. Система визуализирует пробуренные скважины на схеме другим цветом и может соединять их с проектными точками, наглядно показывая расхождения.

При включении режима верификации интерфейс программы переключается на сравнительный вид: проектные скважины отображаются условным знаком (например, контур окружности), а фактические – сплошным цветным кругом. Для каждой фактической скважины при наведении курсора всплывает подсказка с ее параметрами и отклонениями от проекта.

С помощью программы инженер получает возможность проанализировать качество выполнения бурения: встроенные инструменты позволяют быстро оценить критичность отклонений – например, программа может подсветить скважины, глубина которых меньше требуемой, что может привести к непробитому «цоколю» после взрыва. Таким образом, модуль верификации замыкает цикл контроля: план – выполнение – анализ.

Еще одним важным функционалом системы является сбор данных о породе в процессе бурения. Станки с датчиками осевого давления и давления на вращение способны выдавать информацию о структурных и прочностных свойствах пород (скорость проходки, энергоемкость бурения и др.). Программа сохраняет эти показатели и может отобразить их в разрезе массива (например, цветовой индикацией скважин по категории буримости) [14].

На текущем этапе результаты верификации используются для корректировки последующих проектов: если выявлено систематическое отклонение (например, недобур глубины в породе определенной крепости), инженер может учесть это и изменить параметры сетки скважин, увеличить проектную глубину или заряд на подобных участках блока в будущем.

Реализованные модули уже сейчас позволяют существенно сократить трудоемкость подготовки БВР и повысить точность проводимых работ. Проект бурения формируется значительно быстрее за счет автоматизации рутинных операций (расчет длины скважин, расстановка по сетке, оформление паспорта). По опыту внедрения подобных систем, время проектирования и расчета параметров удается снизить в разы [8]. Верификация в цифровом виде избавляет маркшейдера от необходимости вручную обрабатывать журналы бурения – все измеренные координаты загружаются и обрабатываются автоматически. В результате исключается ручной пересчет, а достоверность данных повышается. Отказ от бумажных носителей и переход к электронному обмену также экономят время: паспорт бурения сразу доступен машинисту станка в цифровом виде [12], результаты бурения мгновенно поступают к инженеру для анализа. Таким образом, введенные модули создают основу для «цифрового двойника» процесса бурения – виртуальной модели, полностью соответствующей реальному положению скважин в поле.

Интерфейс и сценарии использования

Интерфейс веб-приложения разработан с упором на наглядность и простоту для инженерно-технических работников. Основное окно приложения представляет собой интерактивную трехмерную модель текущего полигона взрывных работ, совмещенную с двумя проекциями (план и профиль). На карте представлены интерактивные инструменты, позволяющие выполнять на модели различные измерения, в том числе строить профиль уступа, измерять расстояние и площадь для оценки обуренного участка и сравнения его с проектом.

Одним из сценариев использования системы является оперативное принятие решений при изменении обстановки: если в процессе бурения выявились отклонения (на-

пример, скважина вскрыла более прочный слой породы и не достигла требуемой глубины), инженер в офисе может сразу скорректировать проект (добавить дополнительную скважину рядом, изменить глубину соседних) через интерфейс, и эти изменения мгновенно станут видны буровым бригадам [15]. Таким образом, веб-интерфейс обеспечивает сквозной рабочий процесс: от дистанционного планирования до мониторинга выполнения и обратной связи. Это особенно актуально для крупных месторождений, где участие многих специалистов требует единого информационного пространства.

Практический пример сценария работы: инженер-проектировщик утром создает проект бурения нового блока через веб-интерфейс, задав основные параметры сетки. Проект автоматически отправляется машинистам буровых установок в виде электронного паспорта (на планшет или бортовой компьютер станка). В течение дня станки выполняют бурение с использованием систем позиционирования GNSS – устья скважин размечаются виртуально, без необходимости вывода пикетов и разметки вручную [16]. Все данные о прогрессе бурения поступают в систему: каждая завершенная скважина отмечается, фиксируются ее фактическая глубина и координаты с точностью ~5 см [12]. Маркшейдер может подтвердить положение скважин с помощью съемки с БПЛА или тахеометра, загрузив облако точек в систему. К концу смены инженер открывает модуль верификации и видит, что, например, 2 скважины из 50 недобурены на 1–2 м из-за особо прочного междупластья. Он отмечает эти точки для корректировки – на следующий день будет принято решение о дополнительном бурении в районе этих скважин. Таким образом, цифровое рабочее пространство объединяет всех участников: технолог получает достоверную картину выполненных работ, маркшейдер – удобный инструмент учета, буровой мастер – точное задание, а руководство – прозрачный контроль прогресса.

Кроме того, интерфейс позволяет анализировать накопленные данные по взрывам. Например, встроенный модуль статистики (в разработке) будет отображать сравнительные графики: планируемая и фактическая скорость бурения по скважинам, объем взорванной горной массы, полученный при взрыве, и т.п. Это повышает информативность и помогает выявлять узкие места. Отмечено, что применение таких цифровых инструментов уже приносит ощутимый эффект: на разрезе «Междуречье» автоматизация буровых работ с помощью системы «DrillManager» позволила увеличить выход взорванной горной массы на 8,3% на погонный метр скважины за счет оптимизации сетки (расстояние между скважинами удалось увеличить на 0,2 м без потери качества дробления) [16].

Инновации и отличительные особенности

Разрабатываемая система воплощает ряд инновационных решений, которые выделяют ее среди существующих средств проектирования БВР.

Во-первых, это веб-ориентированность: большинство современных САПР взрывных работ – настольные приложения, устанавливаемые локально (например, модуль БВР в Micromine или специализированные программы BlastMaker, SHOTPlus и др.). Данный подход обеспечивает кросс-платформенность и централизованное хранение данных: пользователи всегда работают с актуальной версией проекта, исключается дублирование файлов и проблемы совместимости версий ПО. Кроме того, упрощается сопровождение – обновление программного кода происходит на сервере и сразу доступно всем.

Во-вторых, система изначально интегрирована с технологиями позиционирования и сбора данных. Если традиционные подходы предполагали ручную разметку блока, то в разработанной системе заложена связка «проект – GNSS на буровой установке – передача фактических координат обратно». Навигационный модуль буровой установки (например, на базе GNSS) автоматически ведет станок по координатам из проекта, что устраняет трудоемкую разметку и повышает точность позиционирования скважин до считанных сантиметров [6]. Практика показывает, что это существенно экономит время (исключаются ~1,5–2 часа на разметку каждого блока) и позволяет бурить круглосуточно, включая ночные смены, без потери точности [7]. Импорт данных бурения в систему дает возможность адаптивного управления: все отклонения сразу видны, и система накапливает «память» о свойствах массива. Такой замкнутый цикл «проектирование – мониторинг – анализ» реализует концепцию цифрового двойника взрывных работ, когда каждое решение подкреплено данными предыдущих операций. Как отмечают разработчики промышленных решений, полнота информации о всех спроектированных и проведенных взрывах, а также о параметрах бурения, открывает путь к адаптивной системе управления БВР [6]. Иными словами, система обучается на накопленных данных и позволяет постоянно оптимизировать процессы.

В-третьих, развитие разработанного ПО предполагает внедрение модуля имитационного моделирования взрывов. В мировой практике только начинают появляться решения, которые моделируют разлет породы и фрагментацию в цифровом виде. Например, в отечественной ГГИС «ГЕОМИКС» реализован модуль расчета развала, позволяющий по заданным параметрам взрыва предсказать распределение кусков породы на уступе и даже их скатывание по уклонам ниже расположенных берм [17]. В программе закладывается аналогичная функциональность: используя данные о структуре массива (полученные при бурении и из 3D-модели трещиноватости массива), программа сможет рассчитывать ключевые показатели результата взрыва – радиус разлета, гранулометрический состав, профиль образовавшейся воронки и т.п. Подобное моделирование будет полезно для подбора оптимальных параметров: например, варьируя замедления между взрываемыми рядами скважин или распределяя массовый взрыв на подсерии, можно на компьютере спрогнозировать несколько сценариев и выбрать тот, что дает минимальную долю негабарита или оптимальную форму развала [15]. На данный момент система интегрирована со средствами 3D-моделирования массива по данным лазерного сканирования [8], что является первым шагом к созданию корректной математической модели взрыва.

По мере накопления в базе проектов и результатов взрывов планируется задействовать в системе методы машинного обучения для оптимизации параметров БВР. Такой подход обсуждается в новейших работах: так, Рыльникова

и др. (2025) предлагают собирать все данные о бурении, свойствах пород, параметрах взрыва и его результатах в единую Big Data, чтобы на их основе выявлять тренды и закономерности [6]. В разработанном ПО уже сейчас реализован сбор максимально широкого набора параметров (вплоть до показателей вибрации и сейсмических эффектов, при установке соответствующих датчиков). В перспективе на этой основе можно обучать модели для прогнозирования результатов – по сути, система сама будет рекомендовать настройки взрыва под заданные критерии (например, минимизация сейсмического воздействия при достаточной степени дробления породы). Зарубежные эксперты подтверждают, что сочетание IoT-сенсоров, аналитики данных и ИИ – залог повышения эффективности взрывных работ [9]. Разрабатываемая система ориентирована стать платформой, готовой к внедрению таких технологий: открытая архитектура API позволяет подключать модули аналитики, передавать данные во внешние сервисы и получать рекомендации обратно.

Наконец, одной из инноваций является полная отечественная разработка с учетом специфики российских нормативов и практик взрывного дела. Импортозамещение ПО – актуальная задача, и представленное веб-приложение станет одним из первых отечественных комплексных решений для БВР. При создании учтены требования российских нормативных документов (Единые правила безопасности, ГОСТы на оформление паспортов и др.), чтобы обеспечить удобство внедрения на предприятиях без необходимости адаптации под иностранные стандарты. Внедрение системы планируется осуществлять совместно с профильными научными организациями и производственными партнерами, что позволит сразу апробировать инновационные функции на практике.

К концу 2025 г. завершены разработки системы для создания полнофункциональной системы автоматизированного проектирования буровзрывных работ (САПР БВР), которая объединит три ключевых модуля: модуль проектирования и верификации бурения, модуль проектирования взрывных работ. В модуль проектирования взрыва войдут подсистемы: расчет зарядов скважин (по выбранной методике – по удельному расходу или по постоянной высоте заряда и т.д.), планирование схемы инициирования (выбор типа системы инициирования, расчет замедлений), а также автоматизированная подготовка всей необходимой технологической документации для производства взрыва [18]. Особое внимание будет уделено интеграции с системами управления смесительно-зарядными машинами для контроля процесса заряжания в реальном времени. Разработанный комплекс, адаптированный к российским условиям и имеющий веб-интерфейс, сможет конкурировать с зарубежными аналогами, а заложенные технологии (Веб, Big Data, имитационное моделирование) позволят создать основу для единой цифровой платформы карьера. Внедрение системы законченного цикла цифрового проектирования БВР снизит трудоемкость проектирования более чем вдвое, повысит точность соблюдения параметров, уменьшит расход взрывчатых веществ и улучшит показатели дробления, обеспечивая при этом повышение безопасности производственных процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка веб-ориентированного программного комплекса для цифрового проектирования БВР на открытых горных работах подтверждает высокую актуальность цифровизации взрывного дела. В ходе работы:

1. Обоснована необходимость перехода от разрозненных и ручных методов к единой цифровой системе проектирования БВР, интегрированной с процессами бурения и маркшейдерии. Это соответствует мировым тенденциям и приоритетам, заложенным в отечественные программы развития отрасли.

2. Описана архитектура веб-приложения, включающего модули проектирования бурения, верификации скважин и (в перспективе) проектирования взрывных работ.

3. Реализованы и апробированы ключевые модули. Модуль проектирования бурения автоматизирует расстановку скважин с учетом 3D-модели рельефа, формирует электронный паспорт бурения. Модуль верификации позволяет на основе данных GNSS-навигации и съемки автоматически фиксировать фактическое положение скважин и контролировать отклонения от проекта. Это дало существенный выигрыш во времени и точности: подтверждено сокращение времени планирования примерно на 50-60% и устранение ряда источников ошибок (человеческий фактор) [8, 12].

4. Описаны пользовательский интерфейс и сценарии работы системы. Показано, что сквозная цифровая цепочка «проектирование – выполнение – анализ» реализуется в реальном времени, обеспечивая прозрачность и управляемость процесса БВР. Приведенные примеры демонстрируют удобство интерфейса: интерактивная 3D-среда, инструменты измерений и профилирования позволяют специалистам эффективно работать с данными взрывного блока на всех этапах.

5. Выделены инновационные особенности системы: веб-формат, интеграция с телеметрией буровых установок, накопление данных для Big Data-анализа, планируемое внедрение модуля имитационного моделирования взрывов. Все эти решения направлены на создание интеллектуальной системы, способной адаптироваться и оптимизировать параметры БВР на основе обратной связи. Такой подход соответствует концепции «умный разрез» и не имеет прямых аналогов среди распространенного ПО.

6. Намечены перспективы развития до конца 2025 г. – завершение функционала проектирования массового взрыва и выход на полный цикл автоматизации. Ожидается, что внедрение системы в промышленную эксплуатацию позволит снизить затраты на БВР (за счет экономии буровых работ, оптимального расхода ВВ и снижения потерь от негабарита) и повысить безопасность за счет исключения ручных операций в опасной зоне. Первые результаты опытных внедрений подтверждают экономический эффект, в частности рост производительности буровзрывного цикла и снижение себестоимости добычи [6, 16].

Цифровая система проектирования БВР закладывает основу для перехода отрасли на новый уровень управления горными работами. От разрозненных решений мы переходим к комплексной платформе, где все стадии – от планирования до анализа результатов – увязаны воедино.

Это обеспечит горнодобывающим предприятиям существенный выигрыш во времени, точности и эффективности производства, а научному сообществу даст инструмент для внедрения прогрессивных методов (Big Data, машинное обучение, моделирование) непосредственно в практику. Предстоит большая работа по тиражированию и совершенствованию системы, однако уже сейчас ясно, что будущее буровзрывных работ неразрывно связано с цифровыми технологиями и интеллектуальными системами поддержки принятия решений.

Список литературы • References

1. Hazrathosseini A., Moradi Afrapoli A. The advent of digital twins in surface mining: Its time has finally arrived. *Resources Policy*. 2023;(80): DOI: 10.1016/j.resourpol.2022.103155.
2. Farrell J., Davis R. The future of mining: Challenges and opportunities. *Resources Policy*. 2021;(71). DOI: 10.1016/j.resourpol.2021.101927.
3. Khan A., Li Y., Shoaib M., Sajjad U., Rui F. Utilizing Machine Learning and Digital Twin Technology for Rock Parameter Estimation from Drilling Data. *Journal of Intelligent Construction*. 2025;3(2):1-23. DOI: 10.26599/Jic.2025.9180088.
4. Sattarvand J., Ghahramanieisalou M. Digital Twins and the Mining Industry. *Technologies in Mining*. 2024. DOI: 10.5772/intechopen.1005162.
5. Корниенко А. В. Развитие методов автоматизированного проектирования карьерных массовых взрывов на основе моделирования условий взрывания и параметров разрушения: дис. канд. техн. наук. Апатиты, 2011. 158 с. URL: http://earthpapers.net (дата обращения: 15.11.2025).
6. Система оптимизации параметров буровзрывных работ и механической подготовки горных работ к выемке на основе непрерывного анализа данных и современных ГГИС / М.В. Рыльникова, Д.А. Клебанов, С.Г. Кабелко и др. // Уголь. 2025. № 1. С. 75-81. DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-75-81.
   Rylnikova M.V., Klebanov D.A., Kabelko S.G., Storozhenko E.A. A system for optimization of drilling and blasting parameters and mechanical preparation for stoping operations based on continuous data analysis and modern Mining and Geological Information Systems. *Ugol'*. 2025;(1):75-81. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2025-1-75-81.
7. Федеральный закон «О внесении изменений в Федеральный закон «О недрах» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.06.2016 № 206-ФЗ (последняя редакция). КонсультантПлюс: справ.-правовая система. [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_355484/ (дата обращения: 15.11.2025).
8. Рада А.О., Петерс К.И., Кузнецов А.Д. Проектирование буровзрывных работ на основе 3D-модели выемочного блока // Уголь. 2024. № 6. С. 87-91. DOI: 10.18796/0041-5790-2024-6-87-91.
   Rada A.O., Peters K.I., Kuznetsov A.D. Design of drilling and blasting operations based on a 3D model of a excavation block. *Ugol'*. 2024;(6): 87-91. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041 5790-2024-6-87-91.
9. Sri Chandrahas N., Surendra Babu A., Malleshwara Rao T., Hareesh Babu S., Singh K. Role of Digital Transformation in Mining Industry: Enhancing Efficiency, Safety and Sustainability. *Revista Minelor – Mining Revue*. 2025;31(1):1-11.
10. Gheorghiosu E., Becuț S. Design and execution of drilling and blasting works using modern scanning techniques. *Revista Minelor – Mining Revue*. 2024;(30):70-77. DOI: 10.2478/minrv-2024-0042.
11. Fonseca Í.A., Gaspar H.M. A Prime On Web-Based Simulation. *Proceedings of the European Conference on Modelling and Simulation (ECMS)*. 2019:23–29. DOI: 10.7148/2019-0023.
12. Кузбассразрезуголь разрабатывает цифровую систему управления буровзрывными работами [Электронный ресурс]. Российская газета: официальный сайт. 2024. URL: https://rg.ru/2024/09/26/reg-sibfo/kuzbassrazrezugol-razrabatyvaet-cifrovuiu-sistemu-upravleniia-burovzryvnymi-rabotami.html (дата обращения: 15.11.2025).
13. Программно-технический комплекс «Blast Maker» на MiningWorld Russia 2023. [Электронный ресурс]. MiningWorld Russia: официальный сайт. [Электронный ресурс]. URL: https://miningworld.ru/ru/media/news/2023/march/23/blast-maker/ (дата обращения: 15.11.2025).
14. Григоровский И.В. Использование ГГИС при проектировании буровзрывных работ на открытых горных работах. [Электронный ресурс] // Золото и технологии. 2018. № 2. С. 96-101. URL: http://zolteh.ru (дата обращения: 15.11.2025).
    Grigorovsky I.V. The use of GIS in the design of drilling and blasting operations in open-pit mining. [Electronic resource]. *Gold and Technology*. 2018;(2):96-101. Available at: http://zolteh.ru (accessed 15.11.2025). (In Russ.).
15. Кутузов Б.Н., Белин В.А. Проектирование и организация взрывных работ: учебник. М.: Горная книга, 2012. 416 с.
16. Цифровое бурение: настоящее и будущее горной индустрии. [Электронный ресурс]. ВНИИМГ «ВнЕдра»: официальный сайт. URL: https://www.vnedra.ru/tehnologii/informacionnye-tekhnologii/czifrovoe-burenie-nastoyashhee-i-budushhee-gornoj-industrii-14370/ (дата обращения: 15.11.2025).
17. Обзор новейших систем проектирования БВР. [Электронный ресурс]. RIT-IT: официальный сайт. URL: https://rit-it.com/2021/09/29/obzor-novejshih-sistem-proektirovanija-bvr/ (дата обращения:15.11.2025).
18. Кузнецов В.А. Обоснование удельного расхода ВВ в условиях уступной отбойки // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2007. С. 53-63.
    Kuznetsov V.A. Substantiation of the specific consumption of explosives in the conditions of ledging. *Mining information and analytical bulletin*. 2007:53-63. (In Russ.).

Authors Information

Peters K.I. – Deputy Director for Advanced Development of Drilling and Blasting Technologies, VZRYV GRUPP LLC, 650054, Kemerovo, Russia, e-mail: k.peters@vgroup.one

Kuznetsov A.D. – Head of the Center of Geodesy, Aerial Surveying and Cadastral Works, Institute of Digital, Kemerovo State University, 650000, Kemerovo, Russia, e-mail: adkuz@inbox.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 3.10.2025
Поступила после рецензирования: 15.11.2025
Принята к публикации: 28.11.2025

Paper info

Received October 3, 2025
Reviewed November 15, 2025
Accepted November 28, 2025