

УДК 622.271.2

**ВЛИЯНИЕ СПОСОБОВ ДОБЫЧИ ШТУЧНОГО КАМНЯ  
В КАРЬЕРЕ ХЕВРА НА КАЧЕСТВО ОТДЕЛЯЕМЫХ БЛОКОВ**

**Ю. Маджид<sup>1</sup>, М. З. Эмад<sup>1</sup>, Г. Рехман<sup>2</sup>, М. Аршад<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Инженерно-технологический университет,*

*E-mail: yasirbinmajeed@gmail.com, г. Лахор, Пакистан*

<sup>2</sup>*Международный университет Каракорума, г. Гилгит, Пакистан*

На примере соляного карьера Хевра в провинции Пенджаб (Пакистан) исследовано влияние способов добычи штучного камня на качество извлекаемых блоков при помощи клиньев и перьев, расширяющегося цемента и управляемого взрыва. В полевых условиях указанными методами выполнена выемка блоков призматической формы с последующей оценкой чистоты их отделения и качества. Лабораторными исследованиями выявлены физико-механические свойства блоков, включающие: выход керна, прочность на одноосное сжатие и растяжение (бразильский метод), динамический модуль упругости Юнга, качество и скорость продольных волн. Установлено, что наилучшие качественные показатели обеспечивает клиновой способ.

*Каменная соль, выемка блока, клинья, расширяющийся цемент, управляемые взрывные работы, физико-механические свойства камня*

DOI: 10.15372/FTPRPI20190412

Во всем мире каменная соль извлекается подземным или открытым способом в зависимости от глубины залегания, мощности перекрывающих пород и расположения залежи каменной соли. Ее добыча может осуществляться такими методами, как буровзрывные работы, механическая выемка с использованием проходческих комбайнов, технология растворения, теплового и вакуумного выпаривания. Буровзрывные работы — наиболее распространенный прием, при котором каменную соль получают в кусковой форме. При подземной разработке глубокозалегающих залежей каменной соли обычно применяют камерно-столбовую систему, которая обеспечивает около 40 % от общего объема запасов, в то время как 60 % теряются в междуэтажных целиках [1].

В Пакистане имеются огромные залежи каменной соли, представленные соляным хребтом в провинции Пенджаб [2, 3]. В [4, 5] эти образования описываются как “соляная свита” и “соляная свита Пенджаба” соответственно. Впоследствии они были названы “соляной хребет”. Соляной хребет — зона надвига активного фронта Гималайской горной гряды [6, 7]. Добыча каменной соли и связанный с ней бизнес играют важную роль в экономике Пакистана — годовая выработка соли составляет около 3 500 000 т [8]. Согласно оценкам, 85 % каменной соли от общего объема потребляется местной промышленностью, в то время как менее 15 %

экспортируется в виде готовых декоративных изделий, отделочной плитки и т. д. на рынки Канады, США, Европы и Австралии. Более того, в мире появилась тенденция использовать плитку и куски каменной соли в декоративных целях, в частности для производства соляных ламп, отделочной плитки, пресс-папье и скульптур [9, 10]. В соответствии с [11] добыча соляных блоков для коммерческих назначений полностью зависит от количества микро-трещин и разломов. Повреждение структуры штучного камня вследствие воздействия энергии взрыва даже на микроуровне сильно влияет на выход конечного продукта обрабатывающей фабрики.

Для повышения объемов экспорта предприятиям по изготовлению декоративной продукции необходима поставка блоков большего размера, правильной формы и высокого качества без микро- и макротрещин. На карьерах по добыче штучного камня применяются различные методы раскалывания породы, такие как клинья и перья, расширяющийся цемент, управляемые взрывные работы, лазерная, гидроабразивная резка и алмазной проволокой, а также взрывание наружными зарядами. Данные способы дают возможность получить соляные блоки желаемого качества для производства высококачественных декоративных изделий. Среди всех доступных приемов раскалывания камня клинья и перья, расширяющийся цемент и управляемые взрывные работы экономически выгодны и наиболее подходящие для выемки каменных блоков в условиях подземной разработки. В настоящее время практически на всех карьерах штучный камень извлекают при помощи закладывания дробящего взрывчатого вещества в скважины малого диаметра.

Метод клиньев и перьев, известный как клин со щечками, является древнейшим: в 1820 г. этот прием употребляли в ходе проекта по прокладыванию гранитного пути в районе горы Хейтор [12]. Согласно [13], еще со времен египетской цивилизации применялись различные его виды. Египтяне практиковали эту технологию для получения блоков известняка и песчаника. В [14] описывается, что такой метод предполагал использование ручного инструмента для вырубания на поверхности камня V-образных борозд, в которые вставляли деревянные клинья, расширяющиеся при намокании. В [15] утверждается, что в прошлом одним из распространенных способов было просверливание группы отверстий или выдалбливание углублений на поверхности камня с последующим раскалыванием клиньями. Другое средство раскалывания, которое применяется в настоящее время, включает рассверливание отверстий вдоль линий предполагаемого раскола. После этого в каждое отверстие вставляется по два пера, между которыми помещают клин. Он вбивается молотком, и под воздействием давления на перья камень разламывается. Кроме количества и размера отверстий, необходимых для выемки определенных блоков, при раскалывании также учитываются размер и сочетание клиньев и перьев, выбор которых зависит от типа камня и текстуры при обработке. Чтобы инициировать раскол камня, отверстия необходимо просверливать в установленном порядке вдоль определенной линии [16]. В [17] приведен механизм гидравлического и механического раскалывания в процессе добычи блочного камня с применением клиньев и перьев.

Метод при помощи расширяющегося цемента подразумевает использование невзрывчатого расширяющегося материала, который приводит к медленному распространению трещин и часто применяется на карьерах по изъятию блоков штучного камня. Данный прием является абсолютно бесшумным и не приводит к возникновению вибраций по сравнению со взрыванием. Процесс выполнения работ также более контролируемый и безопасный [18]. Этот способ включает последовательное просверливание отверстий в каменном блоке с одинаковыми глу-

биной, диаметром и расстоянием между ними. Спустя 2–24 ч после заполнения скважин невзрывчатым расширяющимся материалом раствор начинает расширяться и создает возрастающее статическое давление внутри отверстий. При их правильном расположении между соседними скважинами появляются трещины, и камень раскалывается вдоль линии наибольшей концентрации напряжения [18–22]. Расстояние между отверстиями зависит от типа материала, диаметр определяет результаты раскола [23]. Если диаметр отверстий мал, то оптимальный результат может не произойти, а если диаметр слишком большой, может случиться непланируемый разрыв породы. Чтобы достичь необходимого эффекта, перед началом работ рекомендуется провести ряд экспериментов и испытаний для проверки свойств расширяющегося цемента. Время реакции между началом расширения раствора и появлением трещин может составлять 24–76 ч. Данный диапазон обоснован рядом факторов, к ним относятся: тип раскалываемого материала, план расположения отверстий, температура внешней среды в месте проведения работ [23, 24]. Температура окружающего воздуха влияет на время формирования первой трещины и срок образования трещин, достаточных для отделения блока от окружающего материала без ударного воздействия [25].

Буровзрывной метод применяется для получения блоков правильной формы с наименьшими затратами энергии при отделении от породного массива [26]. Его преимущества — низкая начальная стоимость и высокая производительность. Однако при данной технологии неизбежно появляются трещины в камне и значительные объемы отходов. Кроме того, буровзрывные работы небезопасны для человека и окружающей среды [27]. В [28] отмечено, что традиционные буровзрывные операции приводят к образованию нежелательных трещин в породе, тогда как управляемые взрывные работы инициируют макротрещины в необходимом направлении и уменьшают появление микротрещин в окружающем породном массиве. Согласно [29, 30], добычу блочного камня буровзрывным способом с наименьшим количеством трещин обеспечивает детонирующий шнур с бумажной оплеткой. Оценка плотности трещин для определения качества извлекаемых блоков проводилась несколькими исследователями. В табл. 1 представлено краткое описание проведенных работ по определению плотности трещин в образцах породы, а также в других материалах, включая бетон, с применением различных средств обнаружения трещин.

В настоящее время в Пакистане большие объемы каменной соли получают преимущественно с помощью буровзрывных работ. Данная технология неэффективна и провоцирует случайное образование трещин в блоках каменной соли во время стандартных операций по добыче. Такие блоки используются в производстве декоративных изделий (ламп, скульптур, плитки и т. д.), где главное требование — отсутствие трещин в материале, так как их наличие ведет к значительным потерям соли в процессе обработки и снижает рыночную стоимость блоков каменной соли. В исследовании рассматриваются приоритетные способы, включая клинья и перья, расширяющийся цемент и буровзрывные работы, для выявления наиболее эффективного приема, обеспечивающего производство блоков геометрически правильной формы с наименьшим количеством трещин. Для оценки плотности трещин, образовавшихся в извлеченных соляных блоках, применялись лабораторные методы по определению физико-механических свойств горных пород. До настоящего времени не опубликовано каких-либо исследований по добыче призматических блоков каменной соли, что является актуальной проблемой, учитывая растущий спрос предприятий по изготовлению декоративных изделий в Пакистане на блоки каменной соли.

ТАБЛИЦА 1. Краткое описание исследований по определению плотности трещин с применением различных методик

Методы определения плотности трещин в породных образцах	Ссылка
Для определения трещин использовали сканирующий электронный микроскоп и проводили мониторинг фотографических снимков. Сделан вывод: трещины проявляются в виде белых пятен в области повреждения. Качественным анализом установлена связь между белым пятном и развитием маленьких трещин	Miler et al. [31]
Обсуждалось установление стадий образования трещин в процессе развития, это одна из наиболее трудных задач механики разрушения горных пород. Имея представление о таких стадиях, как возникновение трещины, разрушение и раскалывание, можно лучше понять поведение породы	Rojat et. al. [32]
Представлен обзор различных методов исследования плотности трещин, включая анализ изображений с поддержкой масштабирования, оптико-электронную микроскопию, дифракционные картины, ультразвуковое сканирование, лазерное измерение помех, электрическое сопротивление, оптическое распознавание и определение звуковой эмиссии.	Andersson et. al. [33]
Выявление стадий и характера трещинообразования (сдвиг, напряжение) основывалось на установлении фрактографических особенностей и производилось при помощи высокоскоростной съемки трещин	Wong and Einstein [34]
Отмечено, что наиболее простым методом, описывающим качество пород, является показатель качества пород, учитывающий наличие разрывов, трещин и нарушений сплошности. В трещиноватой горной породе естественным образом формируются сложные структурные нарушения, такие как трещины, разломы, отслоения и т. д., которые приводят к ослаблению напряженного состояния в породе и нежелательным образом влияют на плотность породы	Abdullatif et. al. [35]
Показано, что накопленное акустическое излучение, направленное на весь образец, может применяться для распознавания трещин и их локализации. Путем сравнения результатов анализа с акустическим излучением и изображениями посредством высокоскоростной съемки стало возможным установить время между развитием и распространением видимых трещин, а также определить энергию трещинообразования и площадь растрескивания	Eberhardt et. al. [36]
Основной и наиболее важный параметр в определении образования трещин — проницаемость горной породы. В процессе деформации и разрушения горных пород изменение проницаемости путем разности давлений может снизить степень развития мелких трещин в породе. Для пород с малой проницаемостью, таких как гранито-гнейс, в качестве текучей среды используют газ с целью более быстрого и точного установления проницаемости	Wang et. al. [37]
Указана необходимость пересмотра методов, предложенных Международным обществом по механике горных пород, и включения надлежащих процедур для создания напряжений, приводящих к трещинообразованию. Технологии определения трещин включают употребление как объемного, так и поперечного напряжения	Nicksiar and Martin [38]
Описана методика обработки изображений при определении плотности трещин. Основное ее преимущество — точность получаемых результатов по сравнению с традиционными ручными способами	Patrik [39]
Выделены критические этапы, так называемые уровни трещинообразования в процессе развития напряженно-деформированного состояния в образцах пород, подвергшихся лабораторным испытаниям на одноосное и трехосное воздействие. Определение уровня трещинообразования во время лабораторных испытаний на сжатие включает потребление сопротивлений электрическому напряжению при расчетах незначительных изменений деформации в образце, которые могут быть связаны с закрытием или раскрытием трещин	Isler [40]
Проведен критический разбор различных методов выявления трещин на бетонной поверхности с привлечением изображений. Приведены проблемы, связанные с выявлением трещин при помощи изображений, для их изучения в будущих исследовательских проектах	Mohan and Poobal [41]

### ИСХОДНАЯ БАЗА

В Пакистане находятся значительные запасы каменной соли в виде соляной формации вдоль соляного хребта, расположенного в северной части провинции Пенджаб [2]. Соляной хребет простирается от горы Тилла-Джоган на востоке, через прииски Варча в центральной

части до Калабагха на востоке Пенджаба. Литологический состав соляной формации представлен тремя видами отложений: сахивальским мергелем, гипсом Бхандар Каса и солью Биллианвалы. Соляная составляющая включает красный железосодержащий мергель и пласты каменной соли толщиной более 650 м. Залежи обнажены вдоль южного откоса соляного хребта на трех участках (Хевра, Варча и Калабагх), на которых ведется подземная разработка каменной соли. Общие ее запасы расположены в районе этих трех приисков и составляют 85 млн т, из которых 82 млн т находятся в Хевре [2]. Соляная шахта Хевра выбрана для данного исследования, так как является второй по величине в мире и самой большой подземной шахтой в Пакистане. Она расположена в восточной части соляного хребта провинции Пенджаб, недалеко от города Хевра [42, 43]. Годовая выработка шахты составляет ~465 000 т, а предполагаемый срок эксплуатации оценивается приблизительно в 350 лет.

### ПОЛЕВЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ ДОБЫЧИ СОЛЯНЫХ БЛОКОВ

Для достижения цели настоящего исследования разработана стратегия, включающая выбор возможных способов, полевые работы и лабораторные испытания. Чтобы получить соляные блоки, не имеющие трещин, выбраны три простейшие немеханизированные техники — клинья и перья, расширяющийся цемент и управляемые взрывные работы. Сначала спроектировали деревянные клинья (рис. 1а), ранее употреблявшиеся на соляных шахтах Хевра. Затем изготовили 14 комплектов железных клиньев (рис. 1б). Для исследования выбран расширяющийся цемент марки SCA-I 10–25 °С. Для проведения контролируемых взрывных работ на разрабатываемом участке решено использовать в качестве взрывчатого вещества черный порох, который уже применялся для добычи каменной соли на шахте Хевра.

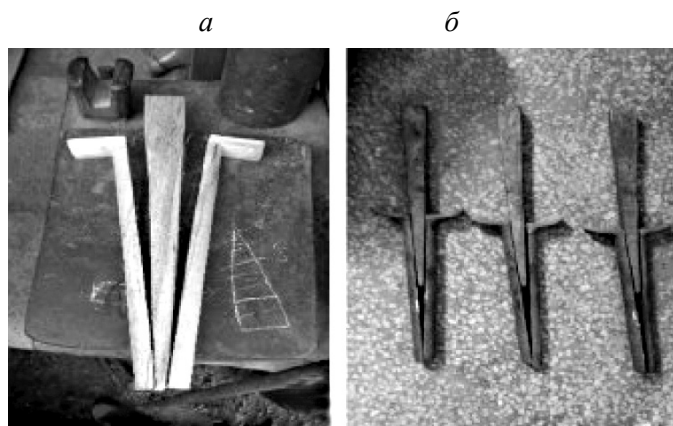


Рис. 1. Общий вид клиньев: а — деревянных; б — железных

Натурные испытания с применением трех выбранных способов добычи блочного камня проводились в районе действующего забоя соляной шахты Хевра для получения образцов соляных блоков в соответствии с условиями эксперимента, представленными в табл. 2. Было запланировано извлечение четырех блоков объемом около одного кубического фута с равной величиной сторон. Согласно условиям испытаний из табл. 2, просверлено 12 отверстий диаметром 2.5 см и глубиной 30.5 см. При этом 8 отверстий сделаны в верхней части забоя, 4 — по внешней стороне. С целью изучения эффективности исследуемых методов выемки расстояние между центрами отверстий в верхней части уступа забоя варьировалось от 10.2, 15.2, 20.3 до 25.4 см.

ТАБЛИЦА 2. Экспериментальные условия для проведения полевых работ на соляной шахте Хевра

Клинья и перья	Расширяющийся цемент	Управляемые взрывные работы
	Эксперимент 1	
Расстояние между центрами отверстий 10.2 см Глубина отверстия 30.5 см Диаметр отверстия 2.5 см Количество отверстий 12 (8 — в верхней части и 4 — у основания уступа забоя) Наименование блока W4	Расстояние между центрами отверстий 10.2 см Глубина отверстия 30.5 см Диаметр отверстия 2.5 см Количество отверстий 12 (8 — в верхней части и 4 — у основания уступа забоя) Наименование блока E4	Расстояние между центрами отверстий 10.2 см Глубина отверстия 30.5 см Диаметр отверстия 2.5 см Заряжание 10.2 см Забойка 20.3 см Количество отверстий 12 (8 — в верхней части и 4 — у основания уступа забоя) Наименование блока B4
	Эксперимент 2	
Расстояние между центрами отверстий 15.2 см Наименование блока = W6 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 15.2 см Наименование блока E6 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 15.2 см Наименование блока B6 (остальные параметры см. в эксперименте 1)
	Эксперимент 3	
Расстояние между центрами отверстий 20.3 см Наименование блока W8 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 20.3 см Наименование блока E8 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 20.3 см Наименование блока B8 (остальные параметры см. в эксперименте 1)
	Эксперимент 4	
Расстояние между центрами отверстий 25.4 см Наименование блока W10 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 25.4 см Наименование блока E10 (остальные параметры см. в эксперименте 1)	Расстояние между центрами отверстий 25.4 см Наименование блока B10 (остальные параметры см. в эксперименте 1)

В испытаниях с клиньями и перьями высверливали отверстия согласно экспериментальному плану, представленному в табл. 2. После подготовки в отверстия помещали перья, затем между ними один за другим вколачивали клинья, чтобы вызвать появление трещины вдоль линии отверстий. Этапы проведения выемки с использованием данного способа показаны на рис. 2.

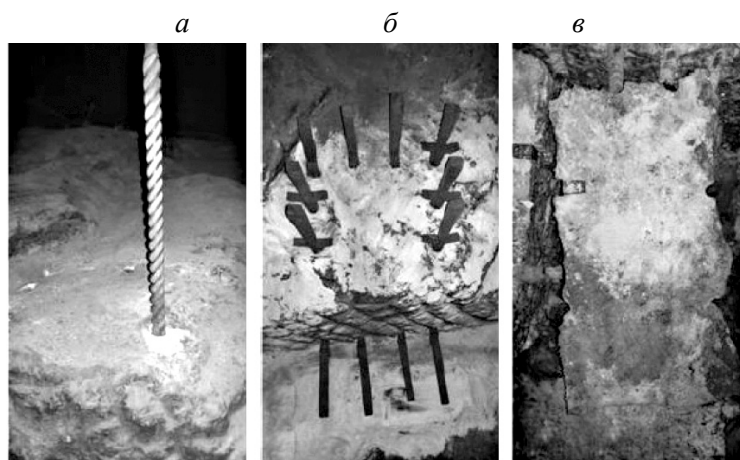


Рис. 2. Порядок выполнения работ по добыче блоков каменной соли с помощью метода клиньев и перьев: высверливание отверстий (а); внедрение клиньев и перьев в отверстия (б); извлечение блока каменной соли (в)

Натурные испытания с расширяющимся цементом осуществлялись в соответствии с параметрами, приведенными в табл. 2. Цемент подготавливался непосредственно на месте (5 кг цемента на 1.5 л воды) и заливался в предварительно просверленные отверстия.

Согласно экспериментальному плану, для исследования способа контролируемого взрыва просверлены отверстия (табл. 2). Сначала подготовили заряды с черным порохом диаметром 2.2 см и длиной 10.2 см с огнепроводным шнуром. В качестве материала для забойки применяли штыб выбуренной породы.

#### ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для изучения качества блоков каменной соли, полученных с помощью исследуемых приемов добычи блочного камня, применялись три различные технологии, включая анализ изображений программой WipFrag, методики окрашивания трещин керосином, а также лабораторные физико-механические испытания. Анализ изображений и керосиновая проба показали свою неэффективность при установлении плотности трещин на всех испытываемых блоках. В итоге проведены лабораторные испытания по определению выхода керна и предела прочности при одноосном сжатии (ППОС) и при растяжении по бразильскому методу, измерены резонансная частота и скорость продольных волн  $V_p$ . Для испытаний физико-механических свойств породы из добытых блоков каменной соли отобраны образцы керна. Принцип работы этих испытаний использовалась при определении плотности трещин для блоков, извлеченных с применением всех трех способов. Высокие значения выхода керна означают, что плотность трещин в блоке низкая и структура камня не повреждена, в то время как низкие значения выхода керна указывают на наличие повреждений и высокую плотность трещин. Выход керна находится из следующего уравнения (в %):

$$B_k = L_{yk} / L_b, \quad (1)$$

где  $L_{yk}$  — длина неповрежденного участка извлеченного керна, м;  $L_b$  — общая длина блока, м.

Тесты на ППОС проводились строго в соответствии с процедурой испытаний, предложенной ISRM [44]. Подготовленные образцы керна с соотношением диаметра и длины примерно 1.0:2.5 подвергались сжатию между двумя плитами универсальной испытательной машины (Shimadzu 200 т) вплоть до момента разрушения. Прочность породы на одноосное сжатие рассчитывалась путем деления максимально допустимой пиковой нагрузки на первоначальную площадь поперечного сечения.

Определение предела прочности на растяжение по бразильскому методу проводилось в соответствии с процедурой проведения испытаний [45]. Каменные диски стандартного размера NX (диаметр 54 мм) с соотношением диаметра к высоте 2.0 подвергались воздействию нагружения универсальной испытательной машины (Shimadzu 200 т) вплоть до момента разрушения. Значение предела прочности при растяжении устанавливалось при помощи стандартного уравнения.

Измерение резонансной частоты проводили в соответствии с требованиями стандартов ASTM-C215 [46], используя образцы диаметром NX при соотношении длины к диаметру приблизительно 3.0. С этой целью измеряли собственную поперечную, продольную и крутильную резонансную частоту колебаний, проходящих через образцы, с последующими расчетами динамического модуля Юнга  $E_d$  и качества породы  $Q$ . Колебания зарегистрированы на частоте 7 кГц, взяты средние значения полученных результатов. Значение модуля и качество породы рассчитывались по следующим формулам:

$$E_d = 519.14 \frac{L}{D^2} M F_r^2, \quad (2)$$

где  $L$  — длина образца керна, м;  $D$  — диаметр образца керна, м;  $M$  — масса образца керна, кг;  $F_r$  — частота, проходящая через образец, Гц.

$$Q = \frac{\text{Резонансная частота}}{\text{Ширина полосы частот}}. \quad (3)$$

Скорость продольных волн  $V_p$  измеряли в соответствии с процедурой испытаний, предложенной ISRM [47]. Портативный ультразвуковой контрольно-измерительный прибор PUNDIT применялся для передачи звуковых волн через образцы каменной соли путем размещения излучателя дефектоскопа на промасленных концах образцов с целью измерения времени прохождения звуковых импульсов. В результате рассчитывали  $V_p$  с использованием стандартного уравнения.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Подробные результаты испытаний с применением трех предложенных способов разработки штучного камня представлены в табл. 3 и 4. Экспериментальная работа включает исследование физических (выход керна, динамический модуль Юнга  $E_d$ , качество породы  $Q$  и  $V_p$ ) и механических свойств породы (ППОС, бразильский метод определения предела прочности при растяжении), которое проводилось на образцах, взятых из каждого блока каменной соли на месте образования раскола в процессе отделения блока ( $e$ ), а также из центральной части блока ( $b$ ).

Физико-механические испытания позволяют определить качество блоков каменной соли с помощью выбранных способов добычи. В табл. 3 представлены результаты исследований физико-механических свойств блоков каменной соли ( $W4$ ,  $W6$ ,  $W8$  и  $W10$ ), полученных клиньями и перьями на расстояниях между центрами отверстий 10.2, 15.2, 20.3 и 25.4 см. В случае выемки блоков с использованием расширяющегося цемента расстояние между отверстиями составляло 10.2 ( $E4$ ), 15.2 ( $E6$ ) и 20.3 см ( $E8$ ), результаты испытаний отражены в табл. 3. Отделение блоков с применением расширяющегося цемента невозможно в том случае, когда расстояние между центрами отверстий составляет 25.4 см, так как не происходит объединение трещин, образующихся в соседних отверстиях. Аналогичным образом при проведении испытаний с контролируемым взрывом (табл. 3) добыты сильно поврежденные блоки неправильной формы ( $B4$  и  $B6$ ) при межцентровом расстоянии отверстий 10.2 и 15.2 см (рис. 3а). Это выявлено в ходе эксперимента по выходу керна: изъяты дискообразные обломки высотой 2–4 см (рис. 3б) вместо полноразмерных неповрежденных образцов керна. Однако блоки каменной соли  $B8$  и  $B10$ , извлеченные методом контролируемого взрыва, имели правильную форму.

В табл. 4 описана процедура испытаний физико-механических свойств породы и приведены общие усредненные результаты для блоков на основе табл. 3. Обсуждение результатов сконцентрировано на оценке наиболее подходящего способа добычи штучного камня с учетом степени распространения трещин во время выемки блока. Для этого выполнен анализ при помощи простой линейной регрессии и статистических методов проверки гипотез. Кроме того, проводилось итоговое сравнение исследуемых средств.



ТАБЛИЦА 3. Физико-механические свойства блоков каменной соли, полученных разными методами

Место отбора керна	Выход керна, %		ППОС, МПа		Бразильский метод, МПа		$E_d$ , ГПа		$Q$		$V_p$ , м/с	
	Образец	Блок	Образец	Блок	Образец	Блок	Образец	Блок	Образец	Блок	Образец	Блок
<i>W4e</i>	50.14	64.12	3.74	5.35	0.68	0.87	36.91	50.08	15.98	16.38	3913.57	4308.04
<i>W4б</i>	71.10		6.16		6.16		0.97		0.97		56.67	
<i>W6e</i>	67.95	72.87	5.89	6.51	0.85	1.02	38.16	66.14	15.84	17.48	4855.22	5223.24
<i>W6б</i>	75.34		6.82		6.82		1.10		1.10		75.12	
<i>W8e</i>	75.89	78.63	6.04	6.70	1.00	1.12	64.89	79.83	18.55	20.48	5060.08	5699.39
<i>W8б</i>	80.00		7.02		7.02		1.18		1.18		87.30	
<i>W10e</i>	78.21	85.64	6.21	7.06	1.14	1.24	78.05	92.46	20.91	22.15	5189.71	6185.09
<i>W10б</i>	89.36		7.49		7.49		1.29		1.29		99.67	
<i>E4e</i>	45.21	56.44	3.66	4.55	0.55	0.66	31.79	44.15	14.67	15.20	3632.38	4000.72
<i>E4б</i>	62.06		4.99		4.99		0.73		0.73		50.34	
<i>E6e</i>	46.97	62.12	4.38	4.92	0.61	0.73	38.17	55.77	15.62	17.05	3975.21	4557.99
<i>E6б</i>	69.69		5.19		5.19		0.79		0.79		64.56	
<i>E8e</i>	63.09	69.39	3.72	5.22	0.85	0.93	50.80	66.45	16.43	17.28	4096.71	4911.35
<i>E8б</i>	72.54		5.97		5.97		0.98		0.98		74.28	
<i>E10</i>	Блок не извлечен: из-за отсутствия соединения между трещинами соседних отверстий не образована разделяющая трещина											
<i>B4e</i>	6.70	7.17	Сильно поврежден блок неправильной формы									
<i>B4б</i>	7.41											
<i>B6e</i>	13.36	13.83	Поврежден блок неправильной формы									
<i>B6б</i>	14.07											
<i>B8e</i>	45.83	51.85	3.51	3.85	0.45	0.49	14.02	43.70	13.08	13.93	3105.30	3439.59
<i>B8б</i>	54.86		4.03		4.03		0.51		0.51		58.53	
<i>B10e</i>	60.49	62.85	3.71	4.44	0.76	0.78	26.99	52.28	13.65	15.76	3843.05	4097.86
<i>B10б</i>	64.02		4.81		4.81		0.79		0.79		64.93	

Примечание. Блоки каменной соли, полученные методом клиньев и перьев, — *W4*, *W6*, *W8* и *W10*; расширяющегося цемента — *E4*, *E6*, *E8* и *E10*; контролируемого взрыва — *B4*, *B6*, *B8* и *B10* при расстоянии между центрами отверстий 10.2, 15.2, 20.3 и 25.4 см соответственно; образцы, взятые в месте образования раскола в процессе отделения каждого блока (*e*), из центральной части каждого блока (*б*)

Чтобы сравнить качество блоков каменной соли, добытых с применением исследуемых способов выемки штучного камня, проведен регрессионный анализ. На рис. 4*a–e* представлены графики регрессии межцентрового расстояния отверстий (10.2, 15.2, 20.3 и 25.4 см) с исследованиями физико-механических свойств (выход керна, ППОС, бразильский метод,  $E_d$ ,  $Q$  и  $V_p$ ), проведенными в рамках данной работы.

ТАБЛИЦА 4. Общие результаты исследования физико-механических свойств блоков каменной соли, полученных с использованием исследуемых способов добычи

Метод добычи блока	Выход керна, %	ППОС, МПа	бразильский метод, МПа	$E_d$ , ГПа	$Q$	$V_p$ , м/с
Клинья и перья	75.31	6.40	1.06	72.12	19.12	5353.93
Расширяющийся цемент	62.64	4.89	0.77	55.45	16.51	4490.01
Контролируемый взрыв	57.34	4.14	0.63	47.98	14.84	3768.72

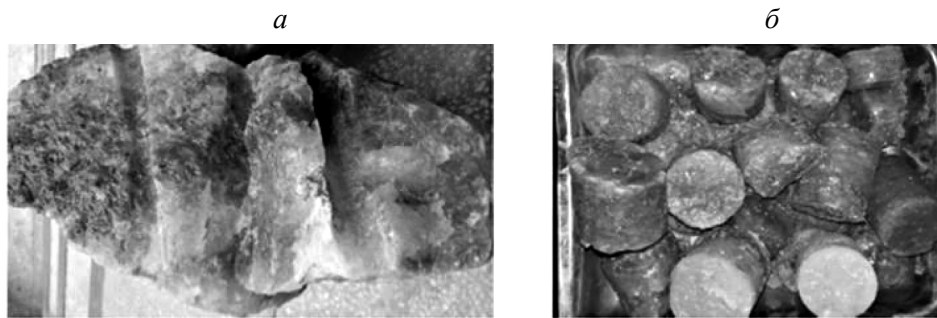


Рис. 3. Блок каменной соли, полученный методом контролируемого взрыва при межцентровом расстоянии отверстий 10.2 см (B4), имеющий неправильную форму и содержащий большое количество нежелательных трещин (а); образцы с низким значением выхода керна (б)

В результате итогового сравнения блоки, извлеченные с применением клиньев и перьев (W4, W6, W8 и W10), показали высокие значения практически во тестах по сравнению со значениями, найденными при испытании блоков, добытых методами расширяющегося цемента (E4, E6, E8 и E10) и контролируемого взрыва (B4, B6, B8 и B10). Таким образом, с учетом испытаний физико-механических свойств можно сделать заключение о том, что клинья и перья оказались наиболее перспективными в плане более высокого качества блоков. Аналогичным образом по результатам испытаний (рис. 4а–е) способы с использованием расширяющегося цемента и контролируемого взрыва оказались соответственно на втором и третьем месте по качеству блоков. Кроме того, технология расширяющегося цемента выявила ограничения по добыче блоков при межцентровом расстоянии отверстий 25.4 см.

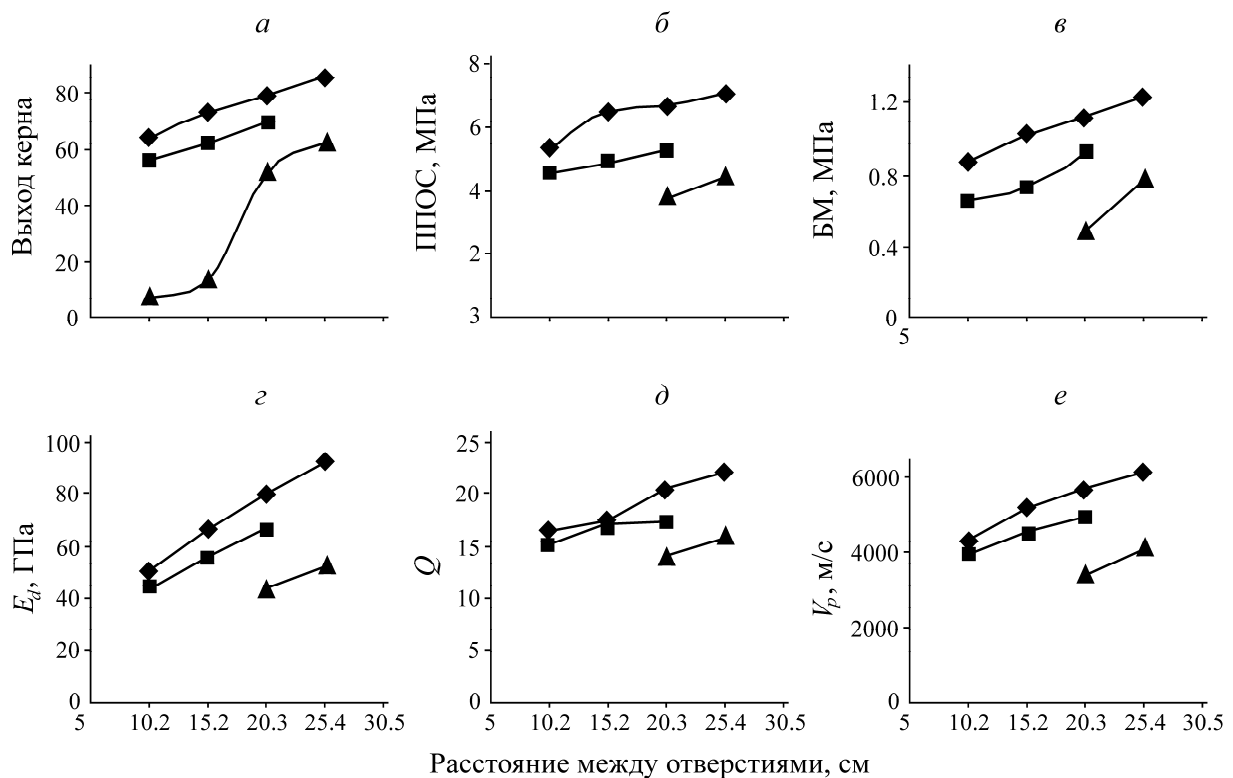


Рис. 4. Сравнение качества блоков, извлеченных исследуемыми способами добычи штучного камня с помощью результатов испытаний физико-механических свойств: выход керна (а); ППОС (б); бразильский метод (в);  $E_d$  (г);  $Q$  (д);  $V_p$  (е)

Применение способа контролируемого взрыва не выявило никаких ограничений во взаимодействии соседних отверстий при образовании трещины, однако при межцентровом расстоянии отверстий 10.2 и 15.2 см извлеченные блоки (B4 и B6) были сильно повреждены и имели неправильную форму. Для понимания результатов испытаний рассмотрим механизмы действия всех трех приемов добычи блочного камня. На рис. 5а показан метод клиньев и перьев, при котором несколько наборов клиньев и перьев помещаются в отверстия по линии. Под воздействием ударов молотка клинья передаются нормальная нагрузка, которая преобразуется в горизонтальное напряжение. Далее горизонтальное напряжение создает растягивающую нагрузку вдоль плоскости разлома, которая превышает предел прочности породы, что приводит к разделению панели. На рис. 5б продемонстрировано устройство действия расширяющегося цемента, которое похоже на механизм действия клиньев и перьев, не считая того факта, что радиальная сила возникает вокруг отверстия. Разлом происходит вследствие создающегося растягивающего напряжения. При радиальном усилии также возникает сжимающее напряжение между соседними отверстиями вдоль плоскости раскалывания. Это является причиной возникновения нежелательных трещин вдоль плоскости разлома. На рис. 5в показан механизм контролируемого взрыва. Согласно теории раскалывания камня, при помощи контролируемого взрывания, детонация зарядов в отверстиях мгновенно создает ударные волны, за которыми следует квазистатическое нагружение по причине давления газа.

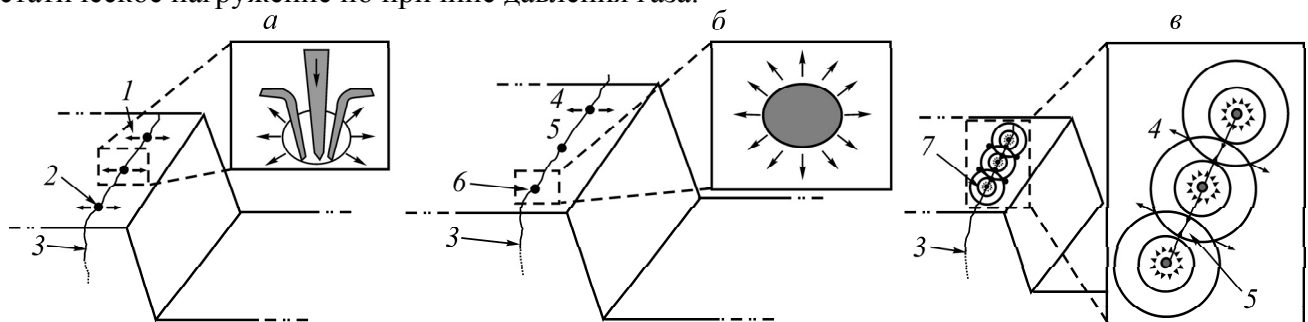


Рис. 5. Механизмы раскалывания камня: клинья и перья (а); расширяющийся цемент (б); методика контролируемых взрывных работ (в). 1 — растягивающее напряжение; 2 — отверстие с клином и перьями; 3 — раскол; 4 — растяжение; 5 — сжатие; 6 — отверстие, заполненное расширяющимся цементом; 7 — взрыв в отверстиях

Радиальное напряжение, возникающее в отверстиях вследствие ударной волны, является по природе динамическим, а распространение образовавшихся трещин происходит под воздействием давления газа. Радиальное усилие частично преобразуется в растягивающее напряжение, которое приводит к раскалыванию поверхности по линии расположения отверстий, что в результате позволяет извлечь каменный блок. Это создает дробление породы в промежутках между отверстиями. Все перечисленные механизмы воздействия свидетельствуют о том, что при использовании клиньев и перьев образуется наименьшее количество нежелательных трещин вокруг отверстий.

Для выявления отличий значений, полученных в ходе физико-механических испытаний образцов из блоков, добытых методом клиньев и перьев, от значений, обнаруженных при испытании образцов, извлеченных с применением двух других способов, выполнена проверка гипотез со средними значениями. Для этой цели введен критерий Стьюдента при условии, что распределения совокупностей являются нормальными (распределение Гаусса) и имеют равные дисперсии. В  $t$ -статистике, когда распределение совокупностей неизвестно, оно рассчитывается путем объединения независимых выборочных дисперсий;  $T$ -показатель вычисляется при помощи уравнения

$$T = \frac{(\bar{X} - \bar{Y}) - \mu_0}{S_p \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}, \quad (4)$$

где  $S_p$  — объединенная дисперсия (средневзвешенное значение независимой дисперсии совокупностей);  $n_1$  — объем первой рабочей выборки;  $n_2$  — объем второй рабочей выборки;  $\bar{X}$  — среднее значение первой выборки;  $\bar{Y}$  — среднее значение второй выборки [48, 49].

Рассчитывались отклонения в средних значениях, которые получены в ходе индивидуальных испытаний физико-механических свойств блоков каменной соли, извлеченных рассматриваемыми способами. Уровень значимости статистической проверки гипотез определен как  $\alpha = 0.15$  (85 %). Чтобы определить вероятную значимость результатов испытания, вычислены  $p$ -значения для сравнения средних величин: это вероятность обнаружения значения статистики, они равны значению выборки при условии, что нулевая гипотеза  $H_0$  верна. Если значение  $p$  меньше или равно заданному уровню значимости  $\alpha$ , то нулевая гипотеза отвергается в пользу альтернативной или новой гипотезы  $H_1$  [50]. Нулевая гипотеза  $H_0$  (5) и (6) для данного исследования основана на том факте, что вычисленные средние значения для всех физико-механических испытаний образцов блоков, извлеченных методами клиньев и перьев, расширяющегося цемента и управляемые взрывные работы, являются равными. С другой стороны, альтернативная гипотеза  $H_a$  (5) и (6) подразумевала, что значения, найденные в ходе физико-механических испытаний, будут различными для образцов блоков, добытых исследуемыми способами (клинья и перья, расширяющийся цемент и управляемые взрывные работы).

$$H_0 = \mu_{WF} - \mu_{EC} = 0, \quad (5)$$

$$H_a = \mu_{WF} - \mu_{EC} \neq 0, \quad [\text{Для значений, полученных в результате всех проведенных физико-механических испытаний, включая выход}$$

$$H_0 = \mu_{WF} - \mu_{CB} = 0, \quad [\text{керна, ППОС, бразильский метод, } E_d, Q \text{ и } V_p] \quad (6)$$

$$H_a = \mu_{WF} - \mu_{CB} \neq 0.$$

Исходя из  $T$ -показателя соответствующей выборки, рассчитаны  $p$ -значения для всех физико-механических свойств породы при сравнении блоков, добытых с помощью клиньев и перьев и расширяющегося цемента, а также клиньев и перьев и управляемых взрывных работ (табл. 5). При межцентровом расстоянии отверстий 10.2 см выяснилось, что только 33.33 %  $p$ -значений статистически значимы при  $\alpha = 0.15$  в случае блоков каменной соли, изъятых методами клиньев и перьев и расширяющегося цемента, таким образом подтвердив нулевую гипотезу (5). Это означает, что большинство значений, полученных во время испытаний физико-механических свойств (выход керна, ППОС,  $E_d$  и  $V_p$ ), статистически не отличаются друг от друга в случае применения обоих обозначенных способов выемки камня. Однако при расстояниях между центрами отверстий 15.2 и 20.3 см 66.67 и 83.33 %  $p$ -значений оказались статистически значимыми при  $\alpha = 0.15$  (табл. 5), нулевая гипотеза была отвергнута. Следовательно, большинство значений, найденных в ходе физико-механических испытаний, выше для блоков каменной соли, извлеченных клиньями и перьями, чем для блоков, изъятых посредством расширяющегося цемента. Аналогичным образом из табл. 5 становится понятно, что при расстояниях между центрами отверстий, равных 20.3 и 25.4 см, 100 %  $p$ -значений оказались статистически значимыми

при  $\alpha = 0.15$  в случае сравнения блоков, добытых с помощью клиньев и перьев и контролируемого взрыва, нулевая гипотеза отвергается (6). Это снова свидетельствует о том, что большинство значений, полученных в ходе физико-механических испытаний, выше для блоков каменной соли, извлеченных клиньями и перьями, чем для блоков, добытых управляемыми взрывными работами. Результаты статистического анализа в целом подтвердили тот факт, что при выемке блоков каменной соли клиньями и перьями образуется наименьшее количество нежелательных трещин по сравнению с двумя другими способами (расширяющийся цемент и управляемые взрывные работы).

ТАБЛИЦА 5. *P*-значения средних показателей, найденные в ходе физико-механических испытаний блоков каменной соли, с помощью клиньев и перьев

Межцентровое расстояние отверстий, см	Выход керна	ППОС	бразильский метод	$E_d$	$Q$	$V_p$
С расширяющимся цементом						
10.2	0.232	0.227	<b>0.115</b>	0.303	<b>0.192</b>	0.259
15.2	<b>0.129</b>	<b>0.034</b>	<b>0.024</b>	0.298	0.357	<b>0.102</b>
20.3	<b>0.068</b>	<b>0.096</b>	<b>0.054</b>	0.198	<b>0.032</b>	<b>0.138</b>
25.4	Нельзя рассчитать из-за невозможности извлечения блока E10 в силу отсутствия соединения между соседними отверстиями и образования общей трещины					
С методикой контролируемого взрыва						
10.2	<b>0.00075</b>	Блок B4 имел сильные повреждения и большое количество нежелательных трещин				
15.2	<b>0.00001</b>	Блок B6 имел повреждения и большое количество нежелательных трещин				
20.3	<b>0.00193</b>	<b>0.00334</b>	<b>0.00065</b>	<b>0.05384</b>	<b>0.00591</b>	<b>0.00556</b>
25.4	<b>0.00388</b>	<b>0.00522</b>	<b>0.00251</b>	<b>0.03824</b>	<b>0.00442</b>	<b>0.01912</b>

Примечание. Выделенные полужирным шрифтом значения отображают статистически различные показатели при уровне значимости  $\alpha = 0.15$

В итоге проведено сравнение предложенных способов добычи на основе средних значений, найденных в ходе испытаний физико-механических свойств блоков каменной соли (табл. 4). Результаты статистического анализа представлены на рис. 6а–е, где клинья и перья в целом показали более высокие показатели тестирования (включая испытания на выход керна, ППОС, бразильский метод,  $E_d$ ,  $Q$  и  $V_p$ ), чем при использовании двух других методов. Также расширяющийся цемент, согласно полученным в результате испытаний значениям, показал более высокое качество блоков по сравнению с управляемыми взрывными работами.

На основе проведенного исследования рекомендовано использование сканеров на месте проведения работ для выявления плотности трещин в пласте и их ориентации. Отбор керна непосредственно на месте залегания также поможет исключить наличие естественных трещин в породе. В будущем возможно проведение ряда исследований в области экономического анализа, испытаний других способов, оптимизации существующих методов добычи и проектирования новых врубовых машин для соляных блоков безупречного качества и т. д. Кроме того, следует провести исследования по созданию оборудования для обработки соляных блоков высокого качества, которые можно экспортировать в другие страны.

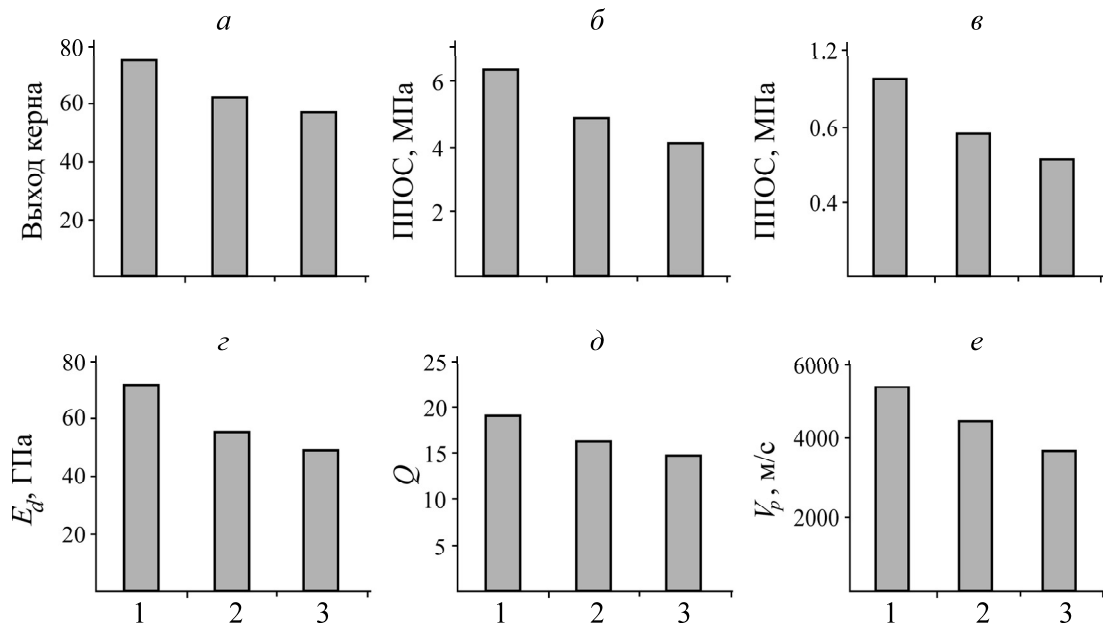


Рис. 6. Сравнение исследуемых способов добычи штучного камня на основе показателей, полученных в ходе испытаний: выход керна (а), ППОС (б), бразильский метод (в),  $E_d$  (г),  $Q$  (д) и  $V_p$  (е).

1 — клинья и перья; 2 — расширяющийся цемент; 3 — контролируемый взрыв

## ВЫВОДЫ

Изучено применение трех известных технологий добычи штучного камня (клинья и перья, расширяющийся цемент и управляемые взрывные работы) для получения соляных блоков призматической формы с наименьшим количеством нежелательных трещин. Описаны работы, проводившиеся непосредственно на месте разработки в соляной шахте Хевра (Пенджаб, Пакистан) указанными способами при различных расстояниях между центрами высверленных отверстий (10.2, 15.2, 20.3 и 25.4 см). Оценено качество извлеченных блоков на основе испытаний физико-механических свойств камня в лабораторных условиях (выход керна, ППОС, бразильский метод,  $E_d$ ,  $Q$  и  $V_p$ ).

С помощью регрессионного анализа (зависимость результатов физико-механических испытаний от межцентрового расстояния отверстий) выявили, что клинья и перья позволили изъять блоки правильной призматической формы с наименьшим количеством нежелательных трещин по сравнению с использованием расширяющегося цемента и управляемыми взрывными работами.

Не удалось извлечь соляной блок методом расширяющегося цемента при межцентровом расстоянии отверстий 25.4 см. Кроме того, при проведении управляемых взрывных работ в случае, когда расстояние между центрами отверстий составляло 10.2 и 15.2 см, получены сильно поврежденные блоки неправильной формы.

Результаты испытаний физико-механических свойств породы блоков с применением исследуемых способов статистически подтверждены. Во время сравнения методов клиньев и перьев и расширяющегося цемента выявлено, что при межцентровом расстоянии отверстий 15.2 и 20.3 см соответственно 66.67 и 83.33 %  $p$ -значений статистически значимы при  $\alpha = 0.15$  и превышали значения, полученные в ходе испытаний блоков, извлеченных с помощью клиньев. Однако при межцентровом расстоянии отверстий 10.2 см всего лишь 33.33 %  $p$ -значений статистически отличны, это означает, что добыча с использованием обоих приемов проведена

в равной степени хорошо. Также статистическое сравнение клиньев и перьев и управляемых взрывных работ показало, что при межцентровом расстоянии отверстий 15.2 и 25.4 см 100 %  $p$ -значений оказались статистически значимыми при  $\alpha = 0.15$ , а также были выше у клиньев и перьев. Следовательно, подтверждено, что клинья и перья обеспечивают выемку блоков с наименьшим количеством нежелательных трещин по сравнению с двумя другими технологиями.

Проведено общее сравнение способов добычи, которое показало, что клинья и перья являются наиболее перспективным для соляных блоков призматической формы при учете результатов выполненных исследований.

Авторы благодарят руководителей компании Pakistan Mineral Development Corporation (PMDC), разрабатывающей соляную шахту Хевра, за оказанную поддержку в проведении данного исследования, в частности инженеров Ирфана Чаудхри (руководитель проекта), Азгхара Икбал-Хаттака (помощник руководителя) и Хафиза Мухамеда Саида (помощник руководителя). Большую благодарность авторы выражают сотрудникам горнотехнического факультета Инженерно-технологического университета (Лакхор, Пакистан) за оказание содействия в исследованиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Hustrulid W. B. R. C.** Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies, Littleton, Colo., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2001.
2. **Shah S. M. I.** Stratigraphy of Pakistan MEMOIRS of the geological survey of Pakistan, Quetta, 2009, Vol. 22. — P. 1–355.
3. **Baloch M., et al.** A study on natural radioactivity in Khewra salt mines, Pakistan, J. Radiation Research, 2012, Vol. 53, No. 3. — P. 411–421.
4. **Wynne A.** On the geology of the Salt Range in the Punjab, India, Geological Survey Memoirs, 1878, Vol. 14. — P. 313.
5. **Gee E. R.** The age of the saline series of the Punjab and of Kohat, National Academy Sci., India, Section B, 1945, Vol. 14. — P. 269–310.
6. **Asrarullah P.** Geology of the Khewra Dome, In Proceedings of 18<sup>th</sup> and 19<sup>th</sup> Combined Session of all Pakistan Science Conference Part III, Hyderabad, Pakistan, 1967.
7. **Leathers M. R.** Balanced structural cross section of the central Salt Range and Potwar Plateau of Pakistan — Shortening and overthrust deformation, Corvallis, in Geology, Oregon State University, 1988.
8. **Mines and minerals**, important minerals occurring in Punjab, Available at.: [https://mnm.punjab.gov.pk/important\\_minerals\\_occurring\\_in\\_punjab#17](https://mnm.punjab.gov.pk/important_minerals_occurring_in_punjab#17), 2015.
9. **Naz H. and Haleem D. J.** Exposure to illuminated salt lamp increases 5-HT metabolism: A serotonergic perspective to its beneficial effects, Pak. J. Biochem. Mol. Biol., 2010, Vol. 43, No. 2. — P. 105–108.
10. **Rashleigh R., Smith S. M. S., and Roberts N. J.** A review of halotherapy for chronic obstructive pulmonary disease, Int. J. Chronic Obstructive Pulmonary Disease, 2014, Vol. 9. — P. 239–246.
11. **Olsson M. and Bergqvist I.** Crack length from explosive in multiple hole blasting, In Proceedings of 5<sup>th</sup> Int. Symposium on Rock Fragmentation by Blasting-FRAGBLAST-5, Montreal, Quebec, Canada, 1996.
12. **Industrial Dartmoor**, Available at, <http://www.dartmoor-npa.gov.uk/au-archpt4.pdf>, cited 14<sup>th</sup> July, 2009.
13. **French L.** Stone by design: The artistry of Lew French, Gibbs Smith, ISBN13: 978-1-58685-443-0, 2005.
14. **Mancini R., Cardu M., and Fornaro M.** Hard dimension stone production by splitting and cutting methods in Italian quarries, In Proceedings of the 4<sup>th</sup> Mine Planning and Equipment Selection Conference, Singhal, R.K. et al (eds), Balkema, Rotterdam, 1995.
15. **Dougan D.** Splitting and cutting tools, Available at, [https://dondougan.homestead.com/The\\_Process4\\_History.html](https://dondougan.homestead.com/The_Process4_History.html), 2004, cited 29<sup>th</sup> May 2018.

16. **Smith M. R.** Stone: Building stone, rock fill and armourstone in construction, Geological Society of London, 1999.
17. **Hora Z. D.** Dimension stone “Marble-RO4”, in selected British Columbia mineral deposit profiles, British Columbia Geological Survey, Victoria, B. C., Canada, 2007.
18. **Gholinejad M. and Arshadnejad S.** An experimental approach to determine the hole pressure — under expansion load, South African J. of Min. and Metallurgy, 2012, Vol. 112. — P. 631–635.
19. **Hoek E. and Bieniawski Z. T.** Application of the photoelastic coating technique to study the stress redistribution associated with plastic flow around notches, South African Mechanical Eng., 1963, Vol. 12, No. 8. — P. 222–226.
20. **Konik Z., et al.** Production of expansive additive to Portland cement, J. European Ceramic Society, 2007, Vol. 27, No. 2–3. — P. 605–609.
21. **Ahn C. H. and Hu J. W.** Investigation of key parameters of rock cracking using the expansion of vermiculite material, Materials, 2015, Vol. 8, No. 10. — P. 6950–6961.
22. **Yu H., et al.** Effects of fibers on expansive shotcrete mixtures consisting of calcium sulfoaluminate cement, ordinary Portland cement and calcium sulfate, J. Rock Mech. and Geotechnical Eng., 2018, Vol. 10, No. 2. — P. 212–221.
23. **Hanif M. and Al-Maghrabi M.N.N.H.** Effective use of expansive cement for the deformation and fracturing of granite, G. U. J. of Sci., 2007, Vol. 20, No. 1. — P. 1–5.
24. **Chandler H. W., et al.,** Enhancing the mechanical behavior of cement based materials, J. of the European Ceramic Society, 2000, Vol. 20, No. 8. — P. 1129–1133.
25. **Laefer D. F., Cooper N. A., Huyunh M. P., Midgette J., Cerihesi S., and Wortman J.** Expansive fracture agent behaviour for concrete cracking, Magazine of Concrete Research, London, 2010.
26. **Bhandari S. and Rathore S.** Extraction of marble blocks by control blasting techniques: A case study, In Proceedings of the 10<sup>th</sup> Int. Symposium on Mine Planning and Equipment Selection, New Delhi, India, 2001.
27. **Rao K. U. M., et al.** Recent trends of dimensional stone mining in India; Artisan mining of coal in the Garo Hills, Meghalaya, in mining on a small and medium scale, Practical Action Pub., 1997. — P. 235–252.
28. **Bhandari S. and Rathore S. S.** Development of macro crack by blasting while protecting damages to remaining rock, In Proceedings of the 7<sup>th</sup> Int. Symposium on Rock Fragmentation by Blasting (Fragblast-7), Beijing, 2002. — P. 1176–181.
29. **Khoshrou S. H.** Theoretical and experimental investigation of wall control blasting methods, Available from: full&object\_id=108801, 1996.
30. **Ahmadinejad S.** Application of stress analysis and fracture mechanics in controlled blasting for hard rock quarry mining, In Proceedings of 1<sup>st</sup> Symposium of Dimension Stone, Mahallat, 2009.
31. **Miller J. T. and Einstein H. H.** Crack coalescence tests on granite, In Proceedings of the 42<sup>nd</sup> U.S. Rock mechanics symposium (USRMS), San Francisco, June 29–July 2, 2008.
32. **Rojat F., Labiouse V., Kaiser P. K., and Descoedres F.** Brittle rock failure in steg lateral adit of the lötschberg base tunnel, Rock Mechanics and Rock Eng., 2009, Vol. 42. — P. 341–359.
33. **Andersson C., Martin C. D., and Stille H.** The Äspö pillar stability experiment: Part II — Rock mass response to coupled excavation-Induced and thermal-induced stresses, J. Rock Mech. Min. Sci., 2009, Vol. 46, No. 5 — P. 865–878.
34. **Wong L. N. Y. and Einstein H. H.** Crack coalescence in molded gypsum and Carrara marble: Part I Macroscopic observations and interpretation, Rock Mechanics and Rock Eng., 2009, Vol. 42, No. 3 — P. 475–511.
35. **Abdullatif O.** Geomechanical properties and rock mass quality of the carbonate Rus Formation, Dammam Dome, Saudi Arabia, The Arabian J. of Sci. and Eng., 2009, Vol. 35, No. 2A. — P. 173–197.
36. **Eberhardt E., Stead D., Stimpson B., and Read R.** Identifying crack initiation and propagation thresholds in brittle rocks, Can Geotech J., 2010, Vol. 35, No. 2 — P. 222–233.



37. **Wang H. L., Chu W. J., and He M.** Anisotropic permeability evolution model of rock in the process of deformation and failure, *J. of Hydrodynamics*, 2012, Vol. 24, No. 1. — P. 25–31.
38. **Nicksiar M. and Martin C. D.** Factors affecting crack initiation in low porosity crystalline rocks, *Rock Mechanics and Rock Eng.*, 2014, Vol. 47, No. 4. — P. 1165–1181.
39. **Patrik B.** Surface crack detection in welds using thermography, *NDT & E Int.*, 2013, Vol. 57. — P. 69–73.
40. **Isler M.** Sticks, stones, and shadows: Building the Egyptian Pyramids, University of Oklahoma Press, ISBN978-0806133423, 2001.
41. **Mohan A. and Poobal S.** Crack detection using image processing: A critical review and analysis, *Alexandria Eng. J.*, 2018, Vol. 57, No. 2 — P. 787–798.
42. **Baloch M., et al.** A Study on natural radioactivity in Khewra salt mines, Pakistan, *J. of Radiation Research*, 2012, Vol. 53, No. 3. — P. 411–421.
43. **Khewra Salt Mines** Available at: <http://www.pmdc.gov.pk/?p=KhewraSaltMines>, 2018, [cited 2018 29<sup>th</sup> May 2018].
44. **ISRM.** Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials, *Int. J. of Rocks Mechanics and Min. Sci. and Geomech.*, 1979, Vol. 16. — P. 135–140.
45. **ISRM.** Suggested methods for determining tensile strength of rock materials, *J. Rocks Mech. and Min. Sci. and Geomech.*, 1978, Vol. 15. — P. 99–103.
46. **ASTM-C215.** Test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional frequencies of concrete specimens, *Annual Book of ASTM Standards, Concrete and Aggregates*, Philadelphia, PA, 1994, Vol. 4, No. 2.
47. **ISRM.** Suggested methods for determining sound velocity, *J. of Rocks Mech. and Min. Sci. and Geomech.*, 1978, Vol. 15. — P. 53–58.
48. **Samaranayake V. A.** Statistical data analysis, STAT-353 course, Missouri University of Sci. and Technology, Rolla, MO, USA, 2009.
49. **Lyman R. and Longnecker M.** An introduction to statistical methods and data analysis, 6<sup>th</sup> Edition, Brooks / Cole Cengage Learning, Canada, 2010.
50. **Abu Bakar M. Z. and Gertsch L. S.** Radial pick cutting performance in dry and saturated sandstone, *Society for Min., Metallurgy and Exploration*, 2012, Vol. 332. — P. 396–405.
51. **Gomez C. and Mura T.** Stresses caused by expansive cement in borehole, *J. of Eng. Mech.*, 1984, Vol. 110, No. 6. — P. 1001–1005.
52. **Jiang Y., Li B., and Yamashita Y.** Simulation of cracking near a large underground cavern in a discontinuous rock mass using the expanded distinct element method, *J. of Rock Mechanics and Min. Sci.*, 2009, Vol. 46, No. 1. — P. 97–106.
53. **Zhang J. C. and Chang C.** On damage mechanism of micro crack zone in rockblasting and its measurements, In *Proceedings of 6<sup>th</sup>, Int. Symposium for Rock Fragmentation by Blasting*, Johannesburg: The South African Inst. of Mining and Metallurgy, 1999.
54. **ASTM-D4543.** Standard practices for preparing rock core as cylindrical test specimens and verifying conformance to dimensional and shape tolerances, American Society for Testing Materials, 2008.

*Поступила в редакцию 03/XII 2018*

*После доработки 01/VII 2019*

*Принята к публикации 03/VII 2019*