

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МИСиС»

ИСАЕВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ  
СТРОИТЕЛЬСТВА ШАХТНЫХ СТВОЛОВ  
МЕХАНИЗИРОВАННЫМИ ПРОХОДЧЕСКИМИ КОМПЛЕКСАМИ**

Специальность 25.00.22 – «Геотехнология  
(подземная, открытая и строительная)»

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Панкратенко Александр Никитович**

Москва – 2021

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность и степень разработанности темы исследования.** Для освоения новых месторождений и реконструкции действующих горных предприятий требуется сооружение глубоких и сверхглубоких вертикальных стволов. Продолжительность их строительства достигает 8 - 10 лет при многомиллиардных капитальных вложениях. Для уменьшения сроков окупаемости этих затрат необходима разработка и внедрение эффективных технических и технологических решений по увеличению скорости проходки стволов.

На протяжении последних 35 лет стволы большой протяженности в России и странах СНГ сооружались буровзрывным способом. Одним из основных недостатков этой технологии является отсутствие возможности совмещения наиболее трудоемких проходческих процессов в забое ствола: буровзрывных работ и уборки породы. Из-за этого средние темпы сооружения стволов не превышали 30 - 50 м/мес., что в 2-3 раза ниже, чем горизонтальных и наклонных выработок, при проходке которых широко применяются механизированные щитовые комплексы и комбайны.

Перспективным направлением решения этой проблемы является широкое внедрение при проходке глубоких стволов механизированных комплексов нового поколения отечественного (СПКВ, АСП) и зарубежного (Herrenknecht AG и др.) производства с механическим разрушением горных пород (далее механизированными комплексами). Однако их более широкое внедрение сдерживается рядом нерешенных вопросов, связанных с обоснованием области применения механизированных стволопроходческих комбайнов и комплексов, а также эффективных параметров технологий проходки применительно к вертикальным стволам.

Последние масштабные научные исследования, посвященные обоснованию применения безвзрывных технологий разрушения пород в забое при проходке протяженных стволов, выполнялись еще в прошлом веке ведущими отечественными учеными и специалистами ШСК «Донецкшахтопроходка» и ЦНИИподземмаш (Тюркян Р.А., Стоев И.С., Новик Е.Б., Левит В.В. и др.). Их итогом стало успешное внедрение комплекса СК-1у при проходке клетчатого ствола № 3 шахты им. М.И. Калинина. Максимальные темпы проходки составили 160 м/мес.

Достигнутые результаты не получили дальнейшего развития из-за сложной экономической ситуации в стране. При этом вопросы, связанные с определением оптимальных параметров механизированной проходки и особенностями ее влияния на процесс взаимодействия крепи и породного массива в стволе, остались не изученными.

В работах Амусина Б.З., Баклашова И.В., Боликова Е.В., Булычева Н.С., Картозия Б.А., Левита В.В., Панкратенко А.Н., Плешко М.С., Прокопова А.Ю., Протосени А.Г., Саммаля А.С., Харисова Т.Ф., Ягодкина Ф.И. и др. рассмотрены особенности взаимодействия крепи и породного массива в призабойной зоне выработок с учетом технологии проходки, влияния прилегающих и соседних выработок, специальных способов работ и других факторов. Полученные результаты были успешно адаптированы применительно к буровзрывной технологии проходки стволов по совмещенной и параллельным схемам.

В то же время проходка стволов с применением высокопроизводительного оборудования для механического разрушения пород в забое характеризуется другой последовательностью раскрытия поперечного сечения ствола и временными периодами вступления постоянной и временной крепи в работу, отсутствием негативного влияния на конструкции в стволе и окружающий породный массив взрывных работ, дополнительными воздействиями на крепь и массив от проходческого комплекса и другими особенностями. В этой связи обоснование эффективных технических и технологических решений строительства шахтных стволов механизированными комплексами является весьма актуальным.

**Цель работы:** обоснование рациональных параметров и области эффективного применения технологий строительства шахтных стволов на основе использования механизированных стволопроходческих комплексов в различных горнотехнических условиях.

**Задачи исследования:**

1. Определение организационно-технических параметров сооружения шахтных стволов механизированными комплексами.
2. Анализ напряженно-деформированного состояния системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив» в призабойной зоне ствола.
3. Численное моделирование системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив» в различных горнотехнических условиях.
4. Экспериментальные исследования деформаций крепи и массива в призабойной зоне ствола в период проходки.
5. Практическое применение результатов диссертационного исследования и разработка рекомендаций по проектированию механизированной технологии проходки шахтных стволов.

**Идея работы** заключается в исследовании взаимодействия элементов геотехнологической системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив» и использовании выявленных закономерностей для обеспечения

высоких технико-экономических показателей строительства и благоприятного режима эксплуатации шахтных стволов.

**Научная новизна работы:**

1. Разработана методика определения параметров скоростной проходки шахтных стволов механизированными комплексами, учитывающая горно-геологические условия, технические характеристики комплекса, а также технологическую эффективность принятой схемы проходки ствола.

2. Получены зависимости изменения напряжений в крепи ствола, сооружаемого по совмещенной технологической схеме, от скорости разработки забоя и его конфигурации, с учетом специфики передаваемых механизированным проходческим комплексом нагрузок на породы приконтурного массива.

3. Установлены закономерности взаимодействия временной и постоянной крепи с породным массивом при параллельной технологической схеме проходки, учитывающие влияние механизированного комплекса на процесс разгрузки горных пород в призабойной зоне ствола.

**Практическая значимость работы:** разработана методика обоснования параметров технологии проходки шахтных стволов с применением механизированных стволопроходческих комплексов в различных горнотехнических условиях.

**Методы исследований** базируются на использовании статистического анализа; теоретических положений механики подземных сооружений; математическом моделировании процесса взаимодействия системы «механизированный комплекс - крепь – породный массив»; натурных исследований напряженно-деформированного состояния крепи стволов, технико-экономического анализа эффективности применяемых технологий.

**Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Область применения механизированных стволопроходческих комплексов увеличивается с глубиной и ограничивается возможностью обеспечения скоростей проходки не ниже нормативных величин в основных интервалах горно-геологических условий с учетом влияния коэффициента эффективности технологической схемы.

2. Параметры крепления ствола, сооружаемого механизированным комплексом по совмещенной технологической схеме, следует определять с учетом скорости безвзрывного разрушения пород в забое ствола и его формы, а также дополнительных воздействий от механизированного комплекса, которые приводят к увеличению напряжений в крепи на 10 - 15%.

3. При проходке ствола механизированным комплексом по параллельной технологической схеме со скоростью 4 м/сут и более, с обоснованными

параметрами временной крепи, учитывающими воздействия комплекса на породный массив, напряжения в постоянной крепи уменьшаются в 2,5 - 3,0 раза.

**Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций** подтверждается корректной постановкой задач исследований, значительным объемом проанализированных статистических данных по проходкам шахтных стволов (обработаны данные по 234 шахтным стволам); удовлетворительной сходимостью результатов аналитических расчетов и численного моделирования (погрешность результатов не более 3%), подтверждением полученных теоретических результатов натурными измерениями деформаций крепи при проходке стволов, реализацией полученных результатов при обосновании проектных решений в конкретных горнотехнических условиях.

**Реализация работы.** Отдельные результаты и рекомендации диссертационной работы использованы при вариантном проектировании схем вскрытия глубоких запасов Эльгинского угольного месторождения.

**Апробация работы.** Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных научных конференциях: «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (ТулГУ, Тула, 2018 г.), «Неделя горняка – 2019, 2020, 2021» (НИТУ МИСИС, г. Москва, 2019 – 2021 гг.); «Транспорт» (РГУПС, Ростов-на-Дону, 2019 г.), «Горное дело в XXI веке: технологии, наука, образование» (Санкт-Петербургский горный университет, 26-28 октября 2021 года).

**Публикации.** Основные выводы и результаты диссертации отражены в 5 публикациях автора, в том числе 3 статьи в журналах, входящих в перечень ВАК и БД Скопус.

**Структура и объем диссертации.** Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 149 страницах машинописного текста. Состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 121 наименования, двух приложений. Содержит 15 таблиц, 58 рисунков.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Шахтные стволы являются важнейшими капитальными выработками, связывающими промышленную площадку горного предприятия с подземными горизонтами. От их надежной и долговечной работы во многом зависит эффективность эксплуатации всей шахты или рудника в целом.

В первой главе диссертационной работы выявлены современные проблемы строительства шахтных стволов в России и за рубежом, проанализи-

рован отечественный и мировой опыт механизированной проходки стволов, обобщены результаты работ, посвященные изучению влияния технологии проходки стволов на напряженно-деформированное состояние крепи и породного массива вокруг выработки, сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во второй главе проанализированы организационно-технические параметры сооружения стволов механизированным способом и сформулированы критерии оценки его эффективности.

С позиций достижения максимальных технико-экономических показателей сооружения шахтных стволов большой протяженности наиболее эффективным является поточный метод с критическими работами, обеспечивающий минимальную продолжительность строительства.

При строительстве шахты или рудника со вскрытием полезного ископаемого комплексом глубоких вертикальных стволов критическим этапом является проходка вспомогательного ствола. Его реализация позволяет незамедлительно перейти ко второму основному периоду строительства горного предприятия при параллельной допроходке остальных стволов.

С целью оценки эффективности технологии проходки стволов механизированными комплексами принимаются критерии:

$$\begin{cases} t_{\text{пр}} \leq t_D; \\ V_{Ti} \geq V_N, \end{cases} \quad (1)$$

где  $t_D$  – директивная продолжительность проходки стола;

$V_N$  – нормативная техническая скорость проходки ствола по СП 69.13330.2016. Составляет 55 м/мес., при этом проходке стволов в породах прочностью свыше 10 МПа допускается ее уменьшение до 25%;

$t_{\text{пр}}$  – фактическая продолжительность проходки ствола механизированным комплексом, определяется как суммарное время проходки отдельных участков ствола в различных горно-геологических условиях с установленными техническими скоростями:

$$t_{\text{пр}} = \sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{Ti}}, \quad (2)$$

здесь  $h_i$  – протяженность участка в конкретных горно-геологических условиях, м, при проходке которого обеспечивается техническая скорость  $V_{Ti}$ , м/мес.

$V_{Ti}$  – техническая скорость проходки ствола на участке:

$$V_{Ti} = \frac{24Q(k_k + k_t)}{S_{\text{вч}}}, \text{ м/сут} \quad (3)$$

где  $Q$  – теоретическая производительность механизированного комплекса, м<sup>3</sup>/ч

$S_{вч}$  – площадь поперечного сечения ствола вчерне,  $m^2$ ;

$k_k$  – коэффициент конструктивной эффективности стволопроходческого комплекса:

$$k_k = \frac{T_{р.з}}{(T_{р.з} + T_{пер} + T_p)}, \quad (4)$$

здесь  $T_{р.з}$  – чистое время на разработку забоя с заданной технической производительностью в общей продолжительности проходческого цикла, ч;

$T_{пер}$  – несовмещенное с временем  $T_{р.з}$  время на перемещение стволопроходческого комплекса на новую заходку, ч;

$T_p$  – несовмещенное время на выполнение плановых и непредвиденных ремонтных работ, приведенное к одному проходческому циклу, ч;

$k_T$  – коэффициент эффективности технологической схемы проходки ствола:

$$k_T = \frac{T_{р.з}}{(T_{р.з} + T_{п} + T_{кр} + T_{всп})}, \quad (5)$$

здесь  $T_{п}$  – несовмещенное время на уборку и подъем породы на поверхность, ч;

$T_{кр}$  – несовмещенное время на возведение постоянной крепи, ч;

$T_{всп}$  – несовмещенное время на выполнение вспомогательных процессов, ч.

Таким образом, в конкретных горно-геологических условиях техническая скорость проходки ствола принятым механизированным комплексом будет зависеть от коэффициента  $k_T$ . При сравнении нескольких технологических схем целесообразно построение графиков изменения скоростей проходки на участках ствола в различных породах. Примеры графиков для ствола диаметром вчерне 8,0 м представлены на рисунке 1.

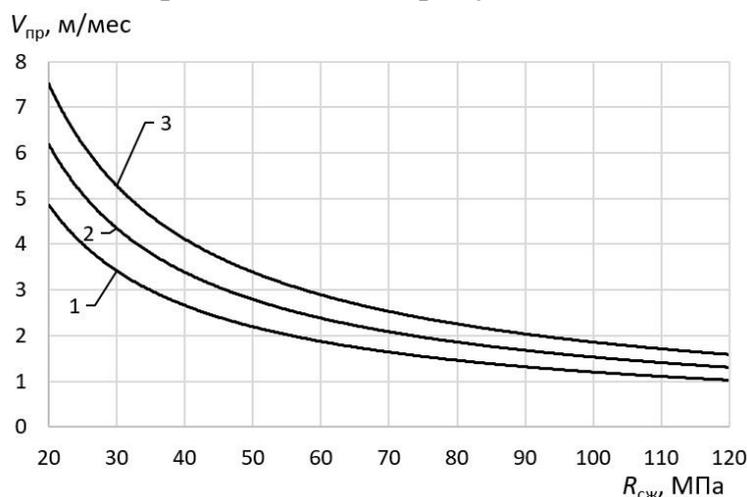


Рисунок 1 – Технические скорости механизированной проходки ствола в породах различной прочности при значениях коэффициента  $k_T$ :

1 – 0,2; 2 – 0,5; 3 – 0,8

Сравнительные расчеты для шахтных стволов диаметром в свету 6 - 8 м, закрепленных монолитной бетонной крепью, по приведенным строительно-эксплуатационным расходам показывают, что в случае соблюдения условий (1) механизированный способ строительства стволов протяженностью свыше 500 м будет более эффективным, по сравнению с буровзрывным.

При невыполнении условия  $V_{Ti} \geq V_N$  на отдельных участках ствола, целесообразно проведение дополнительного технико-экономического сравнения механизированной и буровзрывной технологий. Проведенное исследование позволило установить, что область эффективного применения механизированных стволопроходческих комплексов с ростом глубины ствола увеличивается.

**Полученные результаты позволили сформулировать первое научное положение.**

На следующем этапе исследований выполнен анализ напряженно-деформированного состояния системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив» в призабойной зоне ствола при совмещенной схеме проходки (рис. 2).

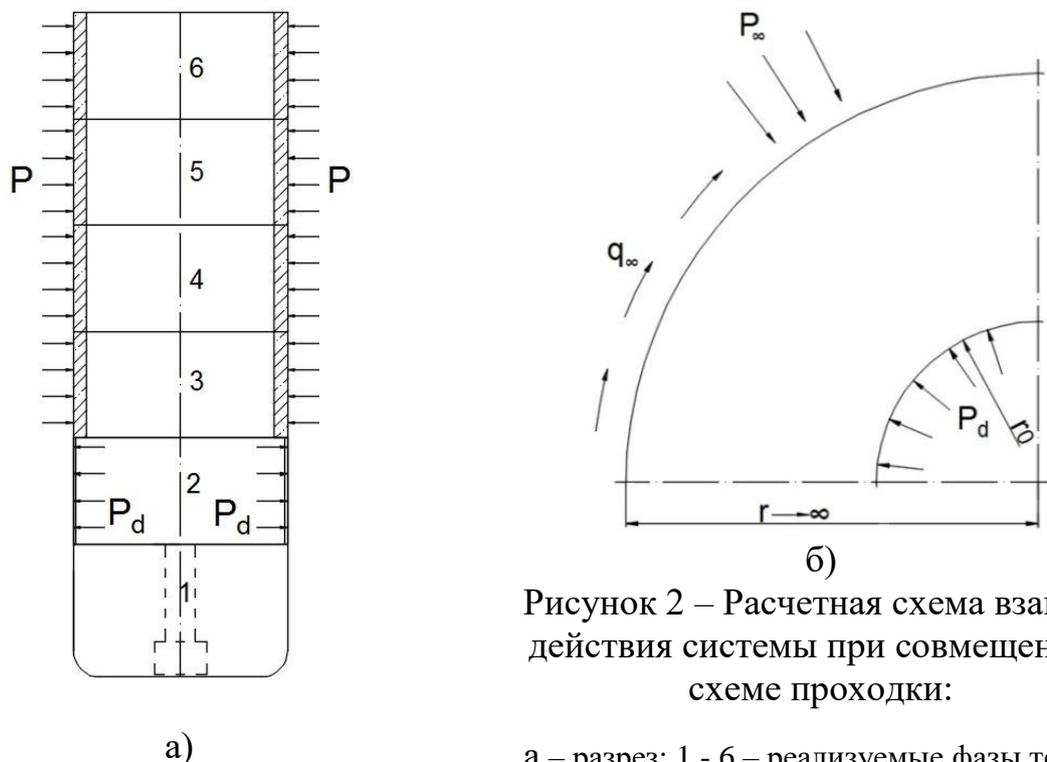


Рисунок 2 – Расчетная схема взаимодействия системы при совмещенной схеме проходки:

а – разрез; 1 - 6 – реализуемые фазы технологической схемы; б – сечение (фаза 2)

В фазе 1 производится разработка забоя ствола исполнительным органом механизированного комплекса. Породные стенки ствола на данном участке при их достаточной устойчивости не закреплены и свободно дефор-

мируются.

В фазе 2 домкратная система комплекса обеспечивает устойчивость комплекса и передает на породные стенки давление  $P_d$ , ограничивающее дальнейшую разгрузку породного массива. Таким образом, она кратковременно выполняет функцию активной временной крепи.

В третьей фазе возводится и вступает в работу путем восприятия горного давления  $P$  крепь ствола. При применении сборной крепи прочностные и деформационные характеристики колец фаз 3 - 6 можно принять одинаковыми. В случае крепления ствола монолитным бетоном параметры крепи определяются фактическим возрастом бетона, скоростью его твердения и возрастают от 3 к 6 кольцу.

Взаимная увязка и учет влияния фаз друг на друга в соответствии с классическими представлениями механики подземных сооружений возможен с помощью корректирующего коэффициента  $\alpha$  к величине горизонтальных напряжений в породном массиве. Так, выражение для определения реализованных смещений массива до вступления крепи в работу можно представить в виде:

$$u_t = \frac{r_0}{2G} [(1 - \alpha_1)\lambda\gamma H + (\alpha_1 - \alpha_2)(\lambda\gamma H - P_d)], \quad (6)$$

где  $\alpha_i$  ( $i=1, 2$ ) – корректирующие коэффициенты, определяемые с учетом скорости проходки для рассматриваемых фаз взаимодействия;

$\gamma$  – объемный вес пород;

$\lambda$  – коэффициент бокового распора пород;

$H$  – глубина расчетного участка ствола.

На процесс разгрузки массива оказывает влияние скорость проходки ствола и воздействие механизированного комплекса  $P_d$ .

Для оценки качественного влияния этих факторов на напряженно-деформированное состояние крепи ствола использованы безразмерные коэффициенты:

$$k_V = \frac{Vt_i}{r_0}; \quad k_P = \frac{0,1\lambda\gamma H}{P_d}, \quad (7)$$

где  $V$  – скорость разработки забоя ствола, м/сут;

$t_i$  – рассматриваемый период времени, сут.

Примеры полученных зависимостей относительных напряжений в крепи  $N_{rel}$  от этих коэффициентов представлены на рис. 3. Параметр  $N_{rel}$  представляет собой отношение нормальных тангенциальных напряжений, определённых соответственно с учетом влияния рассматриваемых факторов и без такового, то есть при рассмотрении обычной плоской контактной задачи взаимодействия системы «крепь – породный массив». Таким образом, он позво-

ляет наглядно продемонстрировать влияние технологических факторов на величину напряжений в крепи.

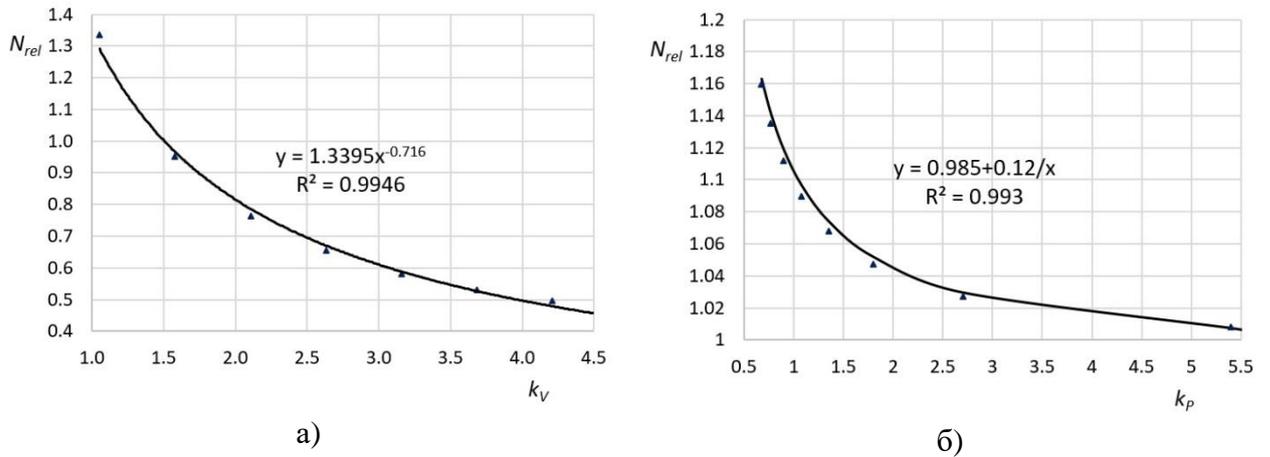


Рисунок 3 – Графики зависимостей: а –  $N_{rel}(k_v)$ ; б –  $N_{rel}(k_p)$

Полученные зависимости с удовлетворительной степенью достоверности аппроксимации описывается степенными функциями. Их анализ показывает, что фактор влияния скорости проходки оказывает благоприятное влияние на величину напряжений в крепи. Напротив, давление домкратов комплекса сдерживает разгрузку массива, что приводит к уменьшению значения смещений  $u_t$  и приводит к приросту напряжений в основной крепи.

С целью подтверждения полученных результатов и анализа остальных влияющих факторов выполнено математическое моделирование методом конечных элементов в программном комплексе в Midas GTS NX в пространственной постановке задачи (рис. 4).

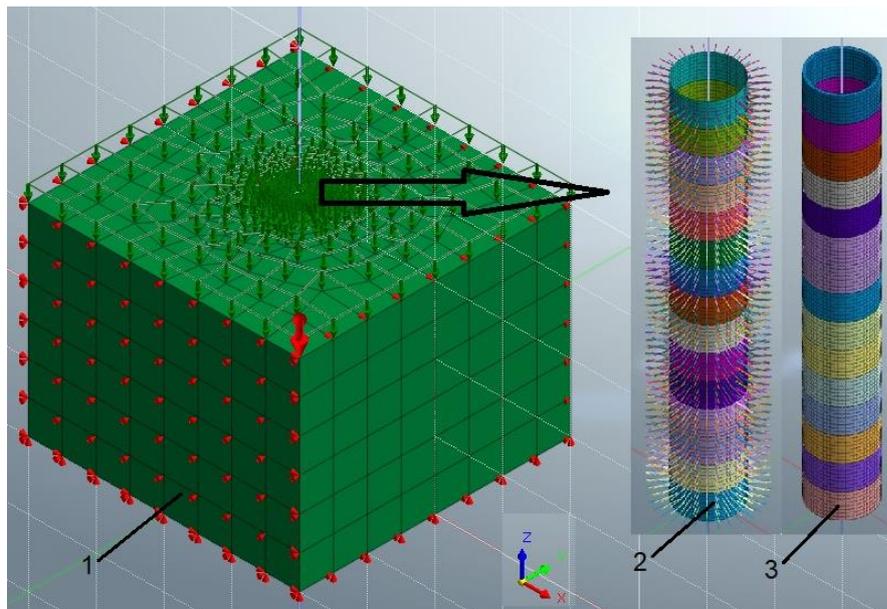


Рисунок 4 – Конечно-элементная модель ствола:  
1 – общий вид; 2 – набрызгбетонная крепь с анкерами;  
3 – основная крепь

Влияние механизированного комплекса представлено системой горизонтальных и вертикальных сил на крепь и массив, прикладываемых с учетом развития технологического цикла проходки ствола.

С помощью стадийного расчета модели рассмотрено взаимодействие системы на различных этапах проходческого цикла.

На рис. 5 представлены графики изменения напряжений в крепи ствола в течение двух суток после ее вступления ее в работу.

Анализ результатов расчёта показал, что после снятия давления домкратной системы происходит прирост напряжений в крепи, не характерный для обычного взаимодействия крепи и массива.

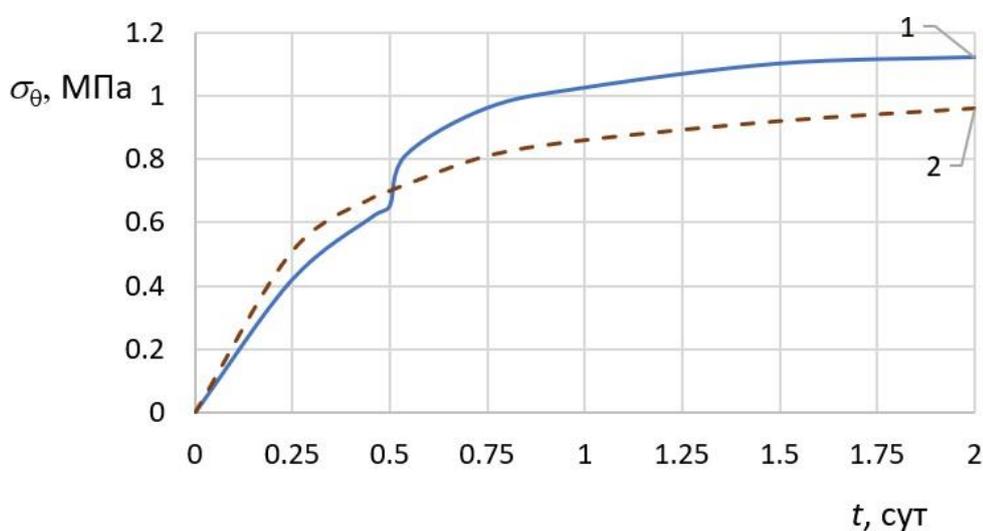


Рисунок 5 – Графики изменения нормальных тангенциальных напряжений в крепи:

- 1 – с учетом влияния горизонтального давления домкратной системы комплекса
- 2 – без учета влияния комплекса на крепь ствола

Дополнительно исследовано влияние конфигурации забоя на напряженно-деформированное состояние пород. Опасность вывалообразования возникает при переходе хрупких пород к стадии запредельного деформирования. Оценку этого процесса можно произвести с помощью определения эквивалентных напряжений в соответствии с критерием прочности Кулона-Мора. На рисунке 6 показаны примеры графиков изменения относительных эквивалентах напряжений (в долях от  $\gamma H$ ) на контуре ствола.

Установлено, что максимальные концентрации напряжений наблюдаются в плоскости забоя у стенок ствола ( $h/r = 0$ , где  $h$  – расстояние от забоя,  $r$  – радиус ствола в свету). При механизированной разработке с формированием в процессе проходки забоя конусной или уступной формы concentra-

ции напряжений на 10 - 15% меньше, что положительно сказывается на устойчивости призабойной части ствола. Кроме того, отсутствие необходимости применения буровзрывных работ уменьшает вероятность образования вывалов и дополнительной техногенной трещиноватости пород.

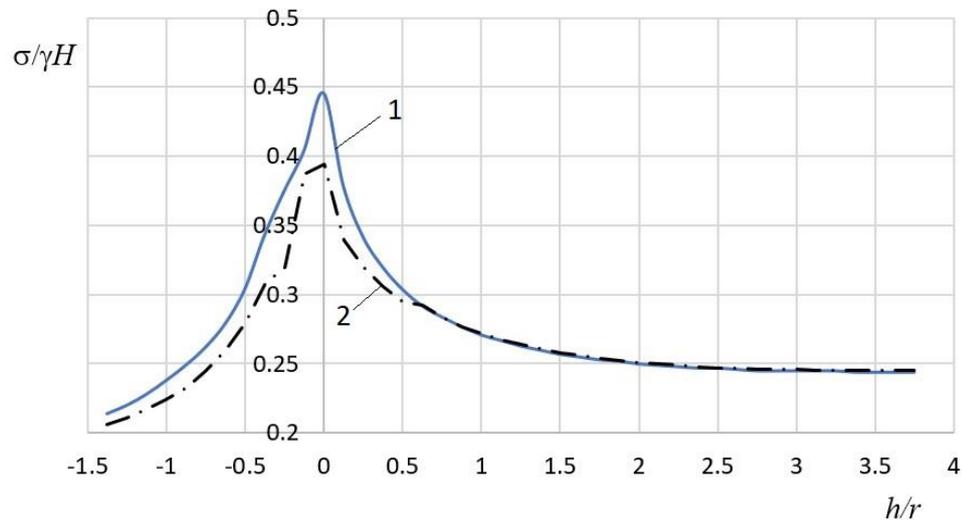


Рисунок 6 – Графики изменения относительных напряжений в породах в забое ствола: 1 – плоский забой; 2 – забой конусной формы

**По результатам исследований сформулировано второе научное положение.**

При сооружении вертикальных стволов механизированным способом по параллельной технологической схеме увеличиваются временные и геометрические параметры системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив». Дополнительно в призабойной зоне появляется фаза взаимодействия массива и временной крепи.

При учете нелинейного характера деформирования породного массива выражение для определения корректирующего коэффициента  $a^*$  при проходке ствола по параллельной технологической схеме можно представить в виде:

$$a^* = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (u_{ti+1} - u_{ti}) + \sum_{j=1}^m (u_{tj+1} - u_{tj}) + \sum_{k=1}^p (u_{tk+1} - u_{tk})}{u_{t\infty}}, \quad (8)$$

где  $n$  – количество рассматриваемых стадий деформирования массива до возведения временной крепи с учетом воздействия механизированного комплекса;

$m$  – количество стадий совместного деформирования массива и временной крепи до вступления в работу постоянной крепи;

$p$  – количество стадий совместного деформирования массива и постоянной крепи на ранних сроках твердения бетона.

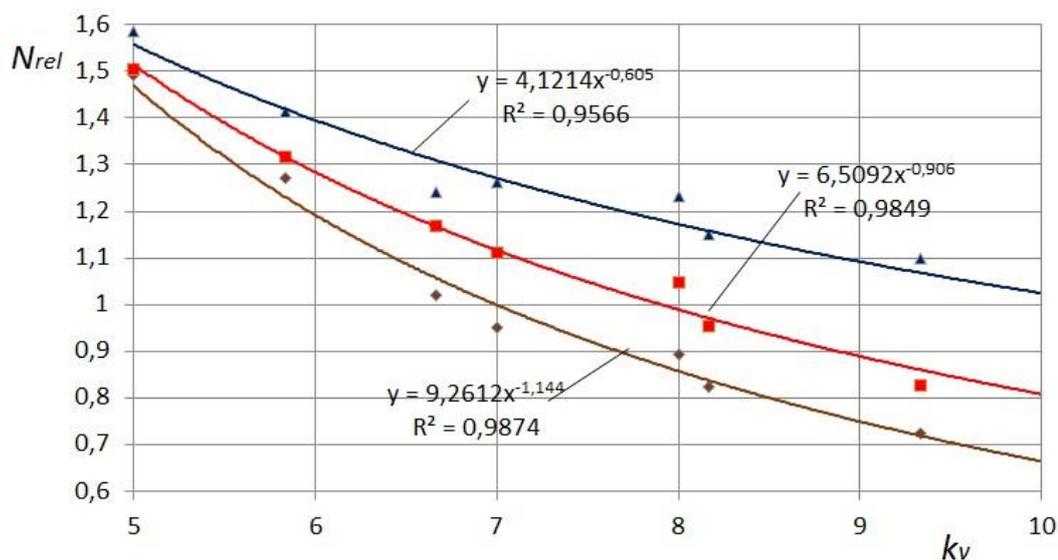
Технология скоростной проходки по параллельной схеме позволяет обеспечить более благоприятный эксплуатационный режим работы крепи только при условии обеспечения несущей способности временной крепи, от которой зависит устойчивость породного массива в призабойной зоне. В настоящее время наиболее распространенной конструкцией временной крепи в стволах является анкерная крепь контактного типа в сочетании с металлической сеткой и, при необходимости, слоем набрызгбетона.

Качественную оценку влияния технологии работ на геомеханическое состояние системы «крепь – массив» следует осуществлять, как с помощью коэффициента  $k_V$  (см. выражение 7), так и на основе величины коэффициента  $k_{qt}$ , характеризующего относительное сопротивление временной крепи в определенный период времени  $t$ , определяемого по формуле

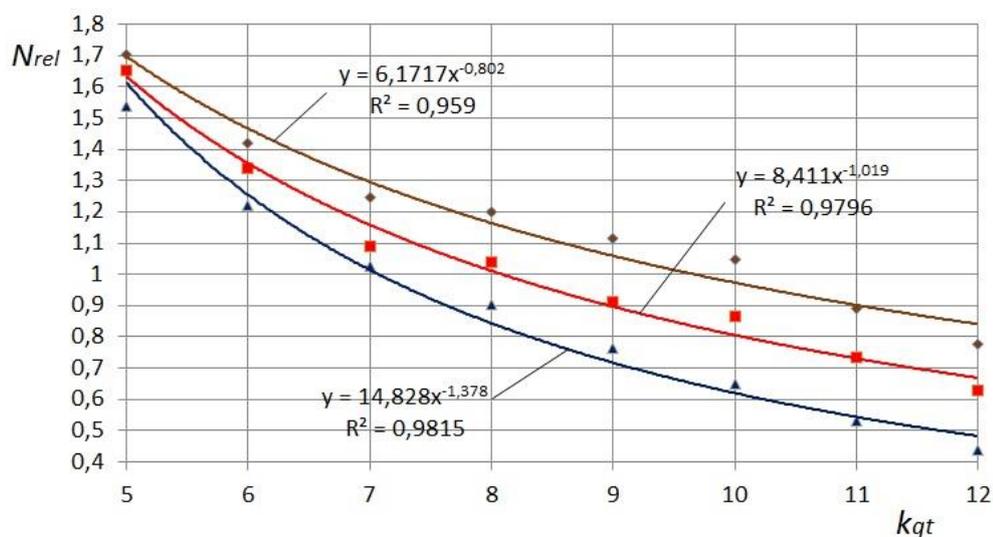
$$k_{qt} = \frac{0,1\lambda\gamma H}{q_t}, \quad (9)$$

где  $q_t$  – реактивное сопротивление временной крепи.

На рисунке 7 показаны примеры полученных графиков зависимостей  $N_{rel}(k_{qt})$  и  $N_{rel}(k_V)$  для пород с различными модулями деформации и характеристиками ползучести.



а)



б)

Рисунок 7 – Примеры графиков зависимостей: а –  $N_{rel}(k_v)$ ; б –  $N_{rel}(k_{qt})$

Из графиков видно, что путем увеличения скорости проходки до 4 м/сут и более при обеспечении несущей способности временной крепи, можно обеспечить снижение относительных нормальных тангенциальных напряжений в постоянной крепи в 2,5 - 3 раза.

С целью экспериментального подтверждения выявленных закономерностей взаимодействия временной и постоянной крепи в призабойной зоне ствола проведены натурные исследования напряженно-деформированного состояния крепи и массива при проходке скипо-клетевого ствола рудника «Скалистый» по параллельной технологической схеме.

Исследования включали в себя измерения смещений стенок ствола ленточным экстензометром и длительный мониторинг деформаций временной набрызгбетонной и постоянной бетонной крепи с помощью установленных в крепь линейных датчиков деформаций струнного типа.

По результатам обработки опытных данных по трем участкам мониторинга установлено, что для передовой набрызгбетонной крепи характерны два интенсивных этапа нагружения.

Первый этап соответствует начальным 20 суткам набора прочности набрызгбетона, когда временная крепь вступает в работу и постепенно нагружается по мере отхода проходческого забоя ствола (рис. 8).

Второй этап (60 - 70 суток) соответствует стадии возведения и вступления в работу основной крепи ствола. При этом происходит дополнительное нагружение временной крепи, и она начинает работать в условиях объемного сжатия, как промежуточный слой.

В период наблюдений 80 - 400 сут. выявлена стабилизация деформаций в крепи, что свидетельствует о ее работоспособном состоянии.

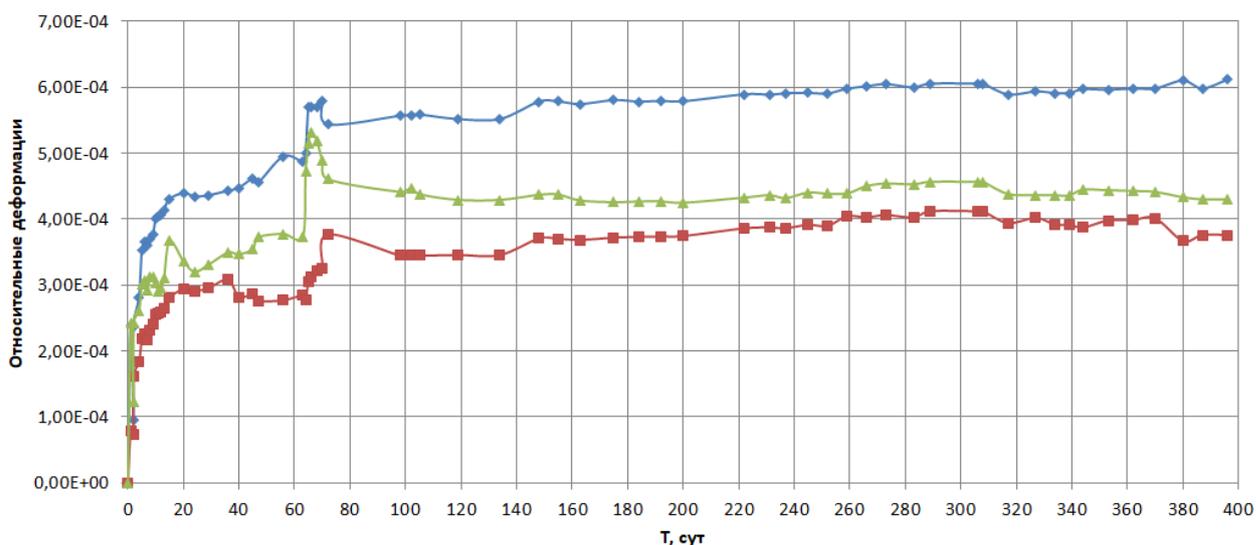


Рисунок 8 – Примеры графиков изменения относительных деформаций временной набрызгбетонной крепи после ее возведения на различных участках ствола

Данные с датчиков, установленных в основной бетонной крепи, показали низкий уровень ее нагружения. Таким образом, результаты экспериментальных исследований хорошо согласуются с ранее выявленными теоретическими зависимостями.

Дополнительно выполнено численное моделирование призабойной зоны ствола в неоднородном породном массиве, включающем участок переслаивающихся, горизонтально или наклонно залегающих породных слоев с существенно отличающимися физико-механическими характеристиками.

При проведении расчетов поэтапно рассмотрена технологическая последовательность проходки участка ствола механизированным комплексом.

На рисунке 9 в качестве иллюстрации показаны расчетные эпюры изменения нормальных тангенциальных напряжений в крепи ствола призабойной зоны по ее высоте. Зона контакта разнопрочных слоев соответствует отметке  $2,5 h/r$ .

На отметке влияния низкопрочного слоя наблюдаются максимальные напряжения, которые могут привести к хрупкому разрушению пород после снятия домкратов механизированного комплекса. Такие случаи известны из практики, например, при проходке стволов рудника Нежинского ГОК (Беларусь) механизированным комплексом SBR.

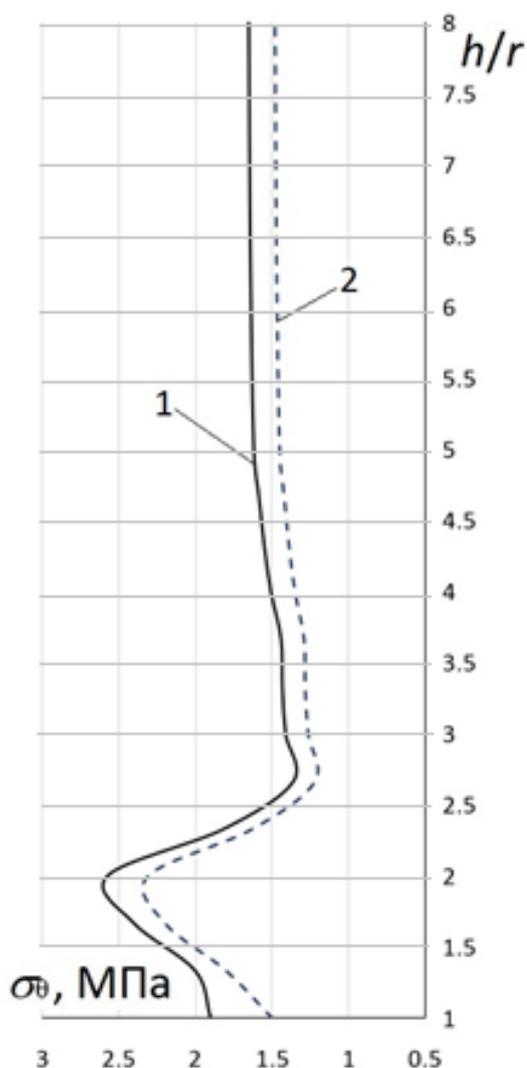


Рисунок 9 – Пример эпюры нормальных тангенциальных напряжений во временной набрызгбетонной крепи, взаимодействующей с неоднородным массивом в призабойной зоне ствола:

1 – с учетом влияния механизированного комплекса;

2 – без учета влияния механизированного комплекса

Временная крепь при механизированной проходке воспринимает на себя часть нереализованных деформаций массива, что приводит к увеличению в ней напряжений.

Для исключения развития этих негативных процессов конструкция крепи и технология ее возведения должны обеспечивать возможность адаптации к изменяющимся горно-геологическим условиям.

**По результатам исследований сформулировано третье научное положение.**

Оценка эффективности разработанных решений произведена при вариантном проектировании стволов шахты «Мао Кхе» (Вьетнам). Установлено, что проходка ствола механизированным комплексом с технически обоснованными скоростями позволяет обеспечить более благоприятный режим работы крепи по сравнению с буровзрывной технологией проходки ствола по совмещенной схеме (табл. 1).

Переход на параллельную технологическую схему с применением буровзрывных работ оказывается эффективным только в относительно устойчивых породах, но требует дополнительных затрат на возведение временной крепи. Также в расчетах не учитывалось негативное влияние на окружающий породный массив взрывных работ, приводящих к формированию дополнительной техногенной нарушенности.

Таблица 1 – Результаты расчета крепи ствола на протяженных участках

Наименование параметра	Главный ствол			Вспомогательный ствол		
	I уч.	II уч.	III уч.	I уч.	II уч.	III уч.
Расчётная глубина, м	420,0	363,4	319,7	392,0	383,5	450,7
Коэффициент $k_V$	4,51	2,53	1,86	1,63	1,22	4,02
Коэффициент $k_P$	2,18	2,07	1,74	2,28	2,33	2,62
Максимальные напряжения в бетоне крепи, МПа:						
- буровзрывная технология (параллельная схема)	5,340	4,043	4,039	6,077	6,649	4,839
- буровзрывная технология (совмещенная схема)	7,178	5,617	5,928	8,189	9,29	6,577
- механизированная технология	3,206	3,701	4,873	4,002	8,741	5,707

Дополнительно разработаны рекомендации по проектированию механизированной технологии проходки шахтных стволов. Получены выражения для определения кратковременных воздействий от механизированного комплекса, обоснованы технические решения по применению при механизированной проходке стволов монолитно-прессованной крепи и опережающих анкерных натяжных систем, обеспечивающих повышение эффективности совместной работы системы «механизированный комплекс – крепь – породный массив» в призабойной зоне ствола. Данные разработки использованы при вариантном проектировании схем вскрытия глубоких запасов Эльгинского угольного месторождения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований решена актуальная научная задача обоснования параметров технологических схем строительства шахтных стволов механизированными комплексами, обеспечивающих высокие технико-экономические показатели проходки и оптимальный режим работы крепи, что имеет важное значение для развития строительной геотехнологии.

Основные результаты диссертационного исследования заключаются в следующем:

1. Предложена методика технико-экономического обоснования параметров скоростной проходки шахтных стволов с применением механизированных проходческих комплексов, основанная на принципах поточной организации строительства и метода критического пути.

2. Разработан алгоритм расчета скорости проходки стволов механизированными комплексами, а также определены критерии эффективности и рациональная область их применения в стволах различной глубины.

3. Получены зависимости изменения напряжений в крепи ствола, сооружаемого по совмещенной технологической схеме, от скорости разработки забоя и нагрузок, передаваемых механизированным проходческим комплексом на породы приконтурного массива.

4. Установлено, что при механическом разрушении пород с образованием конусной или уступной формы забоя ствола снижается вероятность вывалообразования за счет уменьшения концентраций напряжений в породах по контуру забоя.

5. Установлены закономерности взаимодействия временной и постоянной крепи с породным массивом при параллельной технологической схеме проходки, учитывающие влияние механизированного комплекса на процесс разгрузки горных пород в призабойной зоне ствола.

6. Установлено, что при проходке стволов механизированными комплексами по параллельной технологической схеме на участках разнопрочных пород во временной крепи могут возникать опасные концентрации напряжений, что вызывает необходимость дальнейшего совершенствования технологических схем проходки, конструкций крепи и способов ее возведения.

7. Разработаны рекомендации по проектированию параметров технологических схем проходки вертикальных стволов механизированными комплексами и произведена оценка их технико-экономической эффективности. Полученные результаты использованы при вариантном проектировании схем вскрытия глубоких запасов Эльгинского угольного месторождения.

**Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:**

***В изданиях, входящих в перечень ВАК РФ и БД Scopus:***

1. Pankratenko, A., Isaev, A. The Analysis of the Stress-Strain State of the System equipment Complex - Support - Rock Mass in the Bottomhole Area of the Shaft. E3S Web of Conferences 41, 01038 (2018).

2. Исаев А.С. Оценка влияния скорости проходки и параметров временной крепи на устойчивость вертикальных стволов, сооружаемых механизированными комплексами // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 3 (специальный выпуск № 4). 16 с.

3. Исаев А.С. Анализ взаимодействия крепи и массива ствола при механизированной проходке с помощью пространственной конечно-элементной модели // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2021. № 10 (специальный выпуск 16). 16 с.

***В прочих изданиях***

4. Alexander Pankratenko, and Alexander Isaev. The study of the influence of the rock mass heterogeneity on the stress-strain state of the shaft lining. MATEC Web of Conferences 265, 04019 (2019).

5. Исаев А.С. и др. Технология строительства вертикальных горных выработок: учеб. пособие для обуч. по напр. специалитета «Горное дело». НИТУ МИСиС. Новочеркасск: Лик, 2018 . 330 с.

6. Исаев А.С. Обоснование параметров технологических схем строительства шахтных стволов механизированными проходческими комплексами // Инженерный вестник Дона. Электронный журнал. 2021. № 10. [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2021/7257).