

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС»

Машин Алексей Николаевич

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ РЕКОНСТРУКЦИИ ГЛУБОКИХ
ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ

Специальность 2.8.8 – «Геотехнология, горные машины»

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

Доктор технических наук, профессор
Панкратенко Александр Никитович

Москва, 2023

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования. Сегодня в России продолжают функционировать десятки вертикальных стволов шахт и рудников, построенных в 50-80-годы прошлого века. Многие из них эксплуатируются в сложных горно- и гидрогеологических условиях, характеризующихся большой глубиной, высокими значениями напряжений в массиве, динамическими проявлениями горного давления, интенсивными водопритоками, интенсивной нарушенностью окрестностных пород и др.

Эти воздействия оказывают негативное влияние на общее техническое состояние крепи и армировки стволов и приводят к значительному росту затрат на их текущее содержание и капитальный ремонт. В глубоких стволах шахт и рудников стоимость таких работ многократно возрастает. Особую актуальность при этом приобретают вопросы качественной оценки остаточного ресурса конструкций крепи и армировки, а также выбор и обоснование оптимальных ремонтно-восстановительных мероприятий. Неправильно принятые решения в ряде случаев приводили к возникновению серьезных инцидентов и большим экономическим потерям.

Для митигации указанных рисков, а также продления срока службы вертикальных стволов на следующий эксплуатационный период требуется реализация комплексных проектов по их реконструкции, направленных на доведение фактических параметров крепи и армировки стволов до требований современных нормативных документов.

Первым этапом реализации проекта реконструкции стволов с большим сроком эксплуатации является оценка их технического состояния, в процессе которой решаются вопросы, связанные с определением фактической прочности, несущей способности и долговечности конструкций исследуемых подземных сооружений, а также с изучением устойчивости окрестностного массива пород на различных глубинах. Необходимо отметить, что существующие сегодня нормативные методики по оценке технического состояния шахтных стволов существенно устарели и они требуют актуализации с учетом новейших достижений науки, техники, накопленного опыта и знаний. Сама система оценки зависит от принятой в нормативных документах парадигмы, более того, от уровня квалификации специалистов, применяющих существующие методики в своей работе. Поэтому системный подход к организации обследования стволов шахт и рудников должен включать не только всестороннюю оценку технического состояния конструкций, но и предусматривать совершенствование этой оценки, которое должно потом находить отражение в новых нормативных документах.

Вопросам оценки технического состояния подземных сооружений, исследованию породных массивов в окрестности горных выработок, определению параметров напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» посвящено большое количество работ отечественных и зарубежных ученых и специалистов.

Большой вклад в решение геомеханических проблем по обеспечению устойчивости горных выработок, ее оценки и прогнозированию внесли И.В. Баклашов, Н.С. Булычев, Ю.З. Заславский, Б.А. Картозия, А.М. Козел, А.А. Козырев, Г.Г. Литвинский, А.Б. Макаров, А.Г. Протосеня, К.В. Руппенейт, С.В. Сергеев, О.Н. Шашенко и многие другие ученые. В тоже время вопросы, связанные с разработкой интегральных критериев оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации, остались не рассмотренными.

В работах Амусина Б.З., Баклашова И.В., Боликова Е.В., Булычева Н.С., Компанца В.Ф., Картозии Б.А., Левита В.В., Панкратенко А.Н., Пестриковой В.С., Плешко М.С., Протосени А.Г., Харисова Т.Ф., Ягодкина Ф.И. и др. разработаны эффективные технические и технологические решения по проходке и креплению стволов в обычных и сложных горно-геологических условиях, ремонту и восстановлению крепи и армировки. В то же время строительные геотехнологии, применяющиеся для реконструкции и восстановления глубоких вертикальных стволов с большим сроком службы, должны комплексно учитывать реальное состояние существующей крепи, околоствольного массива и протекающие процессы их взаимодействия, не характерные для нового строительства. Изучению этих вопросов и посвящена настоящая диссертационная работа.

Цель работы: обоснование методики оценки технического состояния и технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов, позволяющих повысить технико-экономические показатели и обеспечить комплексную безопасность горнопроходческих работ.

Идея работы заключается в том, что на основе применения трехэтапной многоуровневой методики оценки технического состояния шахтных стволов выбираются и обосновываются наиболее адекватные технологические схемы их ремонта и реконструкции, позволяющие минимизировать строительные и геотехнологические риски на всех этапах работ.

Задачи исследования:

- анализ теоретических основ и практических исследований в области оценки технического состояния шахтных стволов и разработки решений по их ремонту и реконструкции;

- теоретическое обоснование и разработка методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации;
- экспериментальная апробация методики в реальных шахтных условиях для оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов;
- разработка эффективных технологических схем реконструкции глубоких вертикальных стволов и их внедрение на практике.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Значение интегрального критерия технического состояния глубокого вертикального ствола K определяется с учетом суммарного количества ранжированных дефектов, характеризующих плотность и критичность поверхностных и внутренних повреждений крепи, качество контакта «крепь – массив», фактическую прочность и толщину крепи, интенсивность водопроявлений, а также величину отклонений оси и сечения ствола от проектного положения. При значениях $K > 14$ и переходе крепи в запредельную стадию работы, состояние ствола следует оценивать как неработоспособное.

2. Оценка устойчивости околоствольных пород по пяти категориям с учетом показателей относительной прочности, качества керна, контакта «крепь – массив», обводненности и срока службы ствола обеспечивает ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий. В стволах в неработоспособном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости, требуется реконструкция с изменением проектных параметров.

3. Параметры технологии реконструкции шахтных стволов должны определяться с учетом закономерностей взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив». Снижение напряжений на 20-30% в контактных слоях достигается при применении анкерных опорных систем с их заглублением в устойчивую зону массива на глубину не менее $1/3$ размера нарушенной зоны. В искривленных стволах следует дополнительно учитывать вероятность возникновения концентраций напряжений в крепи, в 1,3 - 1,4 раза превышающих средний уровень, а для их минимизации применять компенсационные элементы.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается представительным объемом экспериментальных исследований, выполненных в глубоких вертикальных стволах Норильского промышленного района, применением специализированных геотехнических программных комплексов, повсеместно используемых для решения подобного класса задач, высокоточного геофизического оборудования и поверенных приборов

неразрушающего контроля конструкций, использованием апробированных методов механики подземных сооружений, теории вероятности, внедрением разработанной методики и технологических решений на практике.

Научная новизна работы:

1. Разработана новая методика оценки технического состояния эксплуатационных стволов, учитывающая плотность поверхностных и внутренних повреждений в бетоне крепи, качества контакта «крепь – массив», размеры зон дезинтеграции окрестностных пород, интенсивность водопритокков и величины отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

2. Усовершенствована методика оценки устойчивости окрестностных пород с выделением пяти категорий, в отличие от известных ранее позволяющая производить ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий по восстановлению работоспособности стволов с большим сроком эксплуатации.

3. Установлены новые закономерности взаимодействия компонентов системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствола и определены параметры анкерных опорных систем и компенсирующих элементов для тубинговой крепи, обеспечивающие уменьшение в ней концентраций напряжений.

Практическая значимость. В области практической значимости можно обозначить разработку методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов и технологических схем их реконструкции, обеспечивающих снижение геотехнических рисков и повышение безопасности горнопроходческих работ.

В ходе выполнения данной работы применялись следующие **методы исследований**: натурные экспериментальные геомеханические и геофизические исследования состояния крепи шахтных стволов и окрестностного массива пород, технико-экономический анализ способов и схем реконструкции стволов, математическое моделирование совместной работы системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» в трёхмерной постановке задачи; комплексный подход к решению научно-методических, теоретических и экспериментальных задач.

Личный вклад автора. Автором выполнены теоретические исследования по разработке методики оценки технического состояния шахтных стволов, проведены экспериментальные исследования в натурных условиях свойств крепи и приконтурного массива, выполнено математическое моделирование методом конечных элементов в пространственной постановке задачи взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный

породный массив», а также разработаны технические и технологические решения по реконструкции глубоких вертикальных стволов.

Реализация результатов работы.

Научные результаты работы использованы АО «Управление строительства № 30» при разработке проектных решений и производстве работ по реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель».

Апробация работы. Основные положения и результаты работы были доложены на международных научно-технических симпозиумах «Неделя горняка» (Москва, НИТУ «МИСИС» 2021-2023 гг.); 18-й Международной конференции по проблемам горной промышленности, строительства и энергетики (Тула – Минск – Донецк, 2 - 3 ноября 2022 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы, из которых 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России.

Объем и структура работы. Диссертационная работа представлена на 133 страницах текста, состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 101 наименования, включает 58 рисунков, 19 таблиц, одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, цель и задачи исследований.

В первой главе рассмотрены основные тенденции современной эксплуатации шахтных стволов, выполнен анализ подходов к оценке их технического состояния, а также проблемных аспектов ремонта, реконструкции и восстановления горных выработок.

Развитию геомеханических методов изучения поведения породных массивов в окрестности стволов и подземных горных выработок посвящены новейшие исследования отечественных и зарубежных ученых. Отмечается, что наиболее точное понимание процессов изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) породных массив на различных этапах эксплуатации стволов обеспечивается при использовании прямых и косвенных геомеханических методов по определению НДС в сочетании с геофизическими методами и математическим моделированием исследуемых горнотехнических систем в плоской и пространственной постановки задачи. Математическое моделирование при оценке технического состояния стволов применяется для решения различных задач, в том числе и для прямой количественной оценки влияния параметров выявленных дефектов на запас несущей способности крепи.

Комплексность подхода к оценке технического состояния стволов может проявляться как в рассмотрении всех стадий его жизненного цикла, так в применении многофакторных моделей и систем оценки, базирующихся на принципах иерархии анализа, энтропии и межкритериальной корреляции.

Итогом работ по оценке технического состояния стволов должны стать конкретные рекомендации по восстановлению работоспособности крепи на участках, где это необходимо. Перспективным сегодня считается внедрение высокоэффективных гибридных составов фиброторкретбетона, характеризующихся высокой устойчивостью к изгибающим и растягивающим деформациям, а в наиболее сложных ситуациях может потребоваться полное или частичное перекрепление ствола с применением традиционной или облегченной тубинговой крепи с высокой несущей способностью.

В диссертационной работе на основании выполненного анализа состояния вопроса, а также опираясь на классические труды наиболее авторитетных ученых в области геомеханики и строительной геотехнологии, предлагается методика оценки технического состояния шахтных стволов, которая предусматривает выделение трех этапов и трех уровней обследовательских работ на объекте.

Выделяемые этапы оценки технического состояния:

I – Определение фактических параметров системы «крепь – породный массив».

II – Определение фактического запаса несущей способности крепи и устойчивости околоствольного массива пород.

III – Определение поинтервальных и обобщенных критериев технического состояния ствола.

Уровни обследования шахтных стволов:

Уровень № 1 – поверхностный, реализуемый визуально-аналитическими методами.

Уровень № 2 – приконтурный, реализуемый инструментально-техническими и неразрушающими методами.

Уровень № 3 – глубинный, реализуемый геологическими, геомеханическими и геофизическими методами.

Последовательность реализации методики обобщена в таблице 1.

Таблица 1 – Этапы и уровни реализации методики оценки технического состояния шахтных стволов

Уровни	Этапы оценки технического состояния		
	I	II	III
1	Анализ архивных данных. Визуальное обследование и замеры геометрических параметров дефектов. Маркшейдерская профилировка. Составление дефектной ведомости и схемы дефектов.	Определение геометрических параметров расчетных моделей. Расчеты крепи с учетом фактических геометрических параметров конструкций.	Разбивка ствола на характерные интервалы по фактическим геометрическим параметрам.
2	Определение фактической прочности крепи и толщины крепи. Выявление внутренних дефектов.	Измерение напряжений в крепи, величин нагрузок и воздействий. Верификация расчетных моделей, выполнение проверочных расчетов по несущей способности.	Разбивка ствола на характерные интервалы по показателю запаса несущей способности крепи.
3	Определение степени нарушенности околоствольного массива. Уточнение структуры и физикомеханических характеристик пород. Определение водопритоков.	Определение направления и величин напряжений в околоствольном массиве пород. Калибровка расчетных моделей. Оценка устойчивости околоствольного массива пород.	Разбивка ствола на характерные интервалы по горнотехническим и геомеханическим критериям. Составление сводной поинтервальной карты обследования. Определение критериев технического состояния по интервалам ствола. Определение интегрального критерия технического состояния сооружения.

В рамках реализации предлагаемой методики также производится исследование прочих ствольных конструкций и приствольных выработок.

Выявленные дефекты крепи и армировки ствола ранжируются по категориям критичности в соответствии указаниями, приведенными в табл. 2.

По итогам обработки данных определяется интегральный критерий технического состояния ствола:

$$K = \frac{k_H(\sum k_{A_i}A_i + \sum k_{B_i}B_i + \sum k_{C_i}C_i + \sum k_{D_i}D_i)}{H}, \quad (1)$$

где $k_{A_i}, k_{B_i}, k_{C_i}, k_{D_i}$ – коэффициенты ранжирования дефектов;

A_i, B_i, C_i, D_i – количество дефектов соответствующей категории критичности;

H – глубина ствола, м;

k_H – размерный коэффициент, принимается равным $k_H = 100$ м.

Таблица 2 – Классификация дефектов стволовых конструкций

№ п/п	Вид дефекта	Категория критичности	Коэффициент ранжирования
Дефекты, снижающие несущую способность			
1.	Искривление ствола, в том числе препятствующее движению подъемных сосудов*	A	1,0
2.	Вывалы пород, заколы	A	1,0
3.	Сквозные трещины в бетоне крепи с признаками ее деформации	A	0,9
4.	Прочность бетона крепи на 30% и более ниже проектной	A	0,95
5.	Сквозные вывалы на всю толщину крепи площадью более 1,5 м²	A	0,95
6.	Уменьшение фактической толщины крепи на 30% и более	A	0,95
7.	Косые, дугообразные трещины с возможностью вывала с выдвижением бетона внутрь ствола на 10 мм и более	B	0,85
8.	Выдавливание внутрь ствола крепи с возможностью вывала	B	0,85
9.	Уменьшение фактической толщины крепи на 10 - 30%	B	0,8
10.	Деформации расстрелов, проводников армировки	B	0,8
11.	Косые и дугообразные трещины, увеличивающиеся в размерах	C	0,8
12.	Вывал бетона несквозной с образованием полости в пределах толщины крепи	C	0,8
13.	Внутренние неоднородности в бетоне крепи размером не менее 0,5 толщины крепи	C	0,8
14.	Уменьшение фактической толщины крепи до 10%	C	0,75
15.	Поперечные трещины в холодных и деформационных швах, раскрытием более 0,2 мм, в том числе увеличивающиеся, при наличии обводнения	D	0,6
16.	Деструктивный бетон крепи - размороженный или выщелоченный, разбирающийся вручную, глубиной более 20 мм	D	0,5
17.	Разрушение заделки армировки	D	0,5
18.	Раковины и каверны на поверхности крепи глубиной более 20 мм	D	0,3
Дефекты, снижающие водонепроницаемость			
1.	Сквозные течи из трещин, вывалов	A	0,95
2.	Течи по стыкам заходок крепи	B	0,7
3.	Участки отдельного капежа	D	0,5

*Примечание: в случае значительного искривления ствола, не позволяющего осуществлять дальнейшую эксплуатацию шахтного подъёма, ствол признается аварийным.

На следующем этапе определяется критерий снижения несущей способности крепи ствола по формуле:

$$N = \frac{N_{1c,n}}{N_{1c,0}}, \quad (2)$$

где $N_{1c,n}$, $N_{1c,0}$ – соответственно коэффициенты запаса несущей способности крепи ствола, определенные по результатам обследования и проектные величины.

По итогам расчетов техническое состояние ствола оценивается в соответствии с указаниями таблицы 3 с выделением работоспособного, ограниченно работоспособного и неработоспособного технических состояний.

Таблица 3 – Классификация категорий технического состояния ствола

Величина K	Величина N	Категория	Техническое состояние	Вид технического состояния
> 20	$< 0,7$	5	Аварийное	Неработоспособное
$\leq 20 \div > 14$		4б	Предаварийное	
$\leq 14 \div > 11$	$\geq 0,7$	4а	Неудовлетворительное	Ограниченно работоспособное
$\leq 11 \div > 7$		3	Удовлетворительное	
$\leq 7 \div > 4$		2	Хорошее	Работоспособное
≤ 4		1	Отличное	

По результатам исследований сформулировано первое научное положение.

Третий (глубинный) уровень обследования ствола направлен на комплексную оценку устойчивости техногенно измененного околоствольного массива. Количественный критерий устойчивости определяется из выражения:

$$U = (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) \cdot k_{\pi}, \quad (3)$$

где P_1 – показатель относительной прочности пород на одноосное сжатие;

P_2 – показатель, учитывающий выход керна (RQD), принимается по таблице 5;

P_3 – показатель, учитывающий качество контакта «крепь – массив» (табл. 6);

P_4 – показатель, учитывающий условия обводненности околоствольных пород (табл. 7);

P_5 – показатель, учитывающий безремонтный срок службы ствола (табл. 8);

k_{π} – суммарный поправочный коэффициент, зависящий от конкретных горно-геологических условий (влияния на ствол очистных работ, тектонических напряжений и др.), изменяющийся в диапазоне $k_{\pi} = 0,1 - 0,3$.

Показатель относительной прочности пород на одноосное сжатие P_1 определяется с учетом коэффициента напряженности околоствольного массива:

$$k_{\sigma} = \frac{\gamma \cdot H}{R_c}, \quad (4)$$

где γ – средний объемный вес вышележащей толщи пород, МН/м³;

H – глубина заложения рассматриваемого участка ствола, м;

R_c – предел прочности на сжатие околоствольного массива с учетом фактической трещиноватости.

Величина параметра P_1 принимается по таблице 4.

Таблица 4 – Показатель относительной прочности пород

Коэффициент k_{σ}	< 0,1	0,1 ÷ 0,3	0,3 ÷ 0,5	0,5 ÷ 0,7	> 0,7
Показатель P_1	25	20	15	10	5

Таблица 5 – Показатель, учитывающий выход керна

Выход керна RQD, %	90 ÷ 100	75 ÷ 90	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25
Показатель P_2	20	17	13	8	5

Таблица 6 – Показатель, учитывающий качество контакта «крепь – массив»

Качество контакта «крепь – массив»	Показатель P_3
Нарушение контакта «крепь – массив» по протяженности участка ствола отсутствует	20
Нарушенный контакт «крепь – массив» (не более 10% протяженности участка)	17
Нарушенный контакт «крепь – массив» (10 - 30% протяженности участка)	14
Нарушенный контакт «крепь – массив» (более 30% протяженности участка)	10
Сплошное нарушение контакта «крепь – массив», пустоты за крепью	3

Таблица 7 – Показатель, учитывающий условия обводненности ствола и околоствольных пород

Параметр	Интервалы значений				
Водоприток на участке ствола, м ³ /час	Нет	< 0,5	0,5 ÷ 3	3 ÷ 8	> 8
Общие условия	Сухой участок	Отдельные влажные места	Капез	Приток по отдельным стыкам заходок и нарушенным участкам	Интенсивной приток через крепь
Показатель P_4	20	17	13	8	2

Таблица 8 – Показатель, учитывающий безремонтный срок службы ствола

Безремонтный срок службы ствола, лет	до 20	20 ÷ 30	30 ÷ 40	40 ÷ 50	свыше 50
Показатель P_5	8	6	4	2	0

По величине параметра U определяется категория устойчивости ствола на различных участках согласно табл. 9.

Таблица 9 – Характеристика устойчивости участка ствола по параметру U

Параметр	Интервалы значений				
U , балл	> 9	$\leq 9 \div > 7$	$\leq 7 \div > 5$	$\leq 5 \div > 3$	≤ 3
Категория	I	II	III	IV	V
Степень устойчивости	Очень устойчивые	Устойчивые	Средней устойчивости	Низкой устойчивости	Очень низкой устойчивости
Описание участка ствола	Весьма прочные монолитные породы, водопроявления отсутствуют, хороший контакт «крепь – массив»	Прочные малотрещиноватые породы; незначительные водопроявления; нарушенный контакт «крепь – массив» (не более 10% протяженности участка)	Трещиноватые породы средней прочности, водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив» (10 - 30% протяженности участка)	Трещиноватые породы низкой прочности, водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив» (более 30%)	Дезинтегрированный околоствольный массив, интенсивные водопроявления, нарушенный контакт «крепь – массив»

Областью применения приведенной в табл. 9 классификации являются участки стволов, пройденные в скальных породах, склонных преимущественно к хрупкому разрушению. Участки, расположенные в соляных породах, в несвязных, вечномёрзлых и других специфических грунтах по критерию U не оцениваются.

Предложенная методика была апробирована для оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов Норильском промышленном районе.

Объектами исследования были два глубоких шахтных ствола (скиповой и вентиляционный) диаметром в свету 6,5 м, закреплённые монолитной бетонной крепью толщиной 300 - 500 мм, проектный класс бетона В15 - В20.

Реализация трех уравнений обследовательских работ и достоверное определение критериев технического состояния обеспечивалось за счет применения комплексного метода, включающего визуальные исследования состояния крепи и армировки; определение прочностных и деформационных характеристик бетона крепи по образцам, отобранным из конструкции и неразрушающими методами; маркшейдерские работы по оценке геометрических параметров ствола; геомеханические и геофизические методы; математическое моделирование с применением специализированных программных комплексов и определение интегральных показателей надежности конструкций.

В результате анализа архивных данных и визуального обследования выявлены дефекты и повреждения крепи и армировки.

По характеру и причинам возникновения дефекты крепи делятся на конструктивные, производственно-строительные и эксплуатационные.

Основными типами дефектов крепи обследованных стволов, отнесенных к категории А являются разрушение бетона с обнажением приконтурных пород на глубину до 1,0 м, образование вывалов и заколов различной протяженности, разрывных трещин и каверн площадью до 3,0 м² и глубиной до 1,0 м, интенсивное снижение прочности бетона.

Сравнительный анализ схемы дефектов и данных предшествующих обследований показал, что суммарная площадь дефектов в крепи скипового ствола увеличилась на 12 % за двухлетний период.

Результаты выполненной маркшейдерской съемки показали, что в вентиляционном стволе наблюдается существенное искривление (отклонение вертикальной оси от проектного положения). Величины отклонений достигают 1,1 м.

Оценка фактической толщины крепи и выявление скрытых дефектов осуществлялась методами ультразвуковой томографии и георадиолокации.

В результате томографических исследований ультразвуковым томографом «МИРА» получены локальные В-сканы бетонной крепи. Всего обработано и изучено более 250 сканов крепи. На всех обследованных участках стволов повсеместно наблюдается четкий отраженный сигнал, при этом характер распространения сигнала и структура полученных В-сканов при различной глубине сканирования является однотипной.

Фактическая толщина крепи скипового ствола изменяется в диапазоне от 220 до 550 мм.

Статистическая обработка представленных данных показала, что более 80% полученных сканов имеют достаточно ярко выраженные неоднородности в крепи, свидетельствующие о развитии деструктивных процессов в бетоне

Георадарное сканирование по четырем профилям сечений стволов двумя типами антенн показало следующее:

1. Глубинность зондирования при применении антенного блока с частотой 150 МГц составила 7,0 м, с частотой 400 МГц – 2,5 м.
2. За крепью прослеживается отчетливая зона трещиноватых пород. Размеры зоны на большинстве участков составляют 2,0 - 3,0 м.
3. Имеются места водопроявлений, преимущественно приуроченные к участкам сильно трещиноватых пород.

Определены интервалы нарушенного контакта «крепь – массив». По данным обработки георадиолокации и ультразвуковой томографии установлено, что до 35% протяженности ствола характеризуется плохим контактом «крепь – массив».

Всего, в скиповом и вентиляционном стволах обработано более 10 км георадиолокационных профилей, полученных посредством антенных блоков различного типа.

В ходе исследований произведен отбор кернов из бетонной крепи на различных участках выработок по глубине.

Фактическая прочность бетона определена с учетом понижающих коэффициентов в соответствии с Приложением А ГОСТ 28570-2019. Статистический анализ полученных данных показал, что крепь стволов характеризуется существенной неоднородностью прочностных свойств бетона с изменением фактического класса бетона от В5 до В30.

Параллельно производилось определение прочности бетона крепи ультразвуковым неразрушающим методом. Дополнительно установлено, что вблизи стыков заходок прочность бетона, как правило, значительно ниже, чем в центральных областях колец крепи, что свидетельствует, в том числе о недостаточно высоком качестве приготовления, доставки и производства бетонных работ при проходке стволов.

В вентиляционном стволе при обследовании выявлен протяженный аварийный участок, где дополнительно проведены комплексные геологические, геомеханические и геофизические исследования с бурением горизонтальных и наклонных скважин с выработки горизонта, расположенной на расстоянии 50 м от ствола (3 уровень обследовательских работ).

По результатам анализа полученного кернового материала установлено, что по направлению простираения пород от горизонтальной выработки к вентиляционному стволу в интервале от 0,0 до 22,5 м массив представлен прослоями аргиллита и субпараллельными зонами дробления (дезинтеграции) массива; в интервале от 32,5 м до проектной отметки скважин – прослои аргиллита и субпараллельные тектоническим нарушениям зоны дробления (дезинтеграции) массива.

Общая оценка устойчивости показала, что изученный участок относится к наихудшей V-й категории.

Для оконтуривания зоны дезинтеграции пород выполнены радиоволновые исследования способом объемной радиоволновой геоинтроскопии горных пород «3D РВГИ». Пример полученных результатов приведен на рис. 1 в виде разреза по стволу с изолиниями эффективных значений электрических сопротивлений $\rho_{\text{эфф}}$, Ом·м. Области, выделенные оранжевым и красным цветом, определены как зоны интенсивной дезинтеграции околоствольного массива.

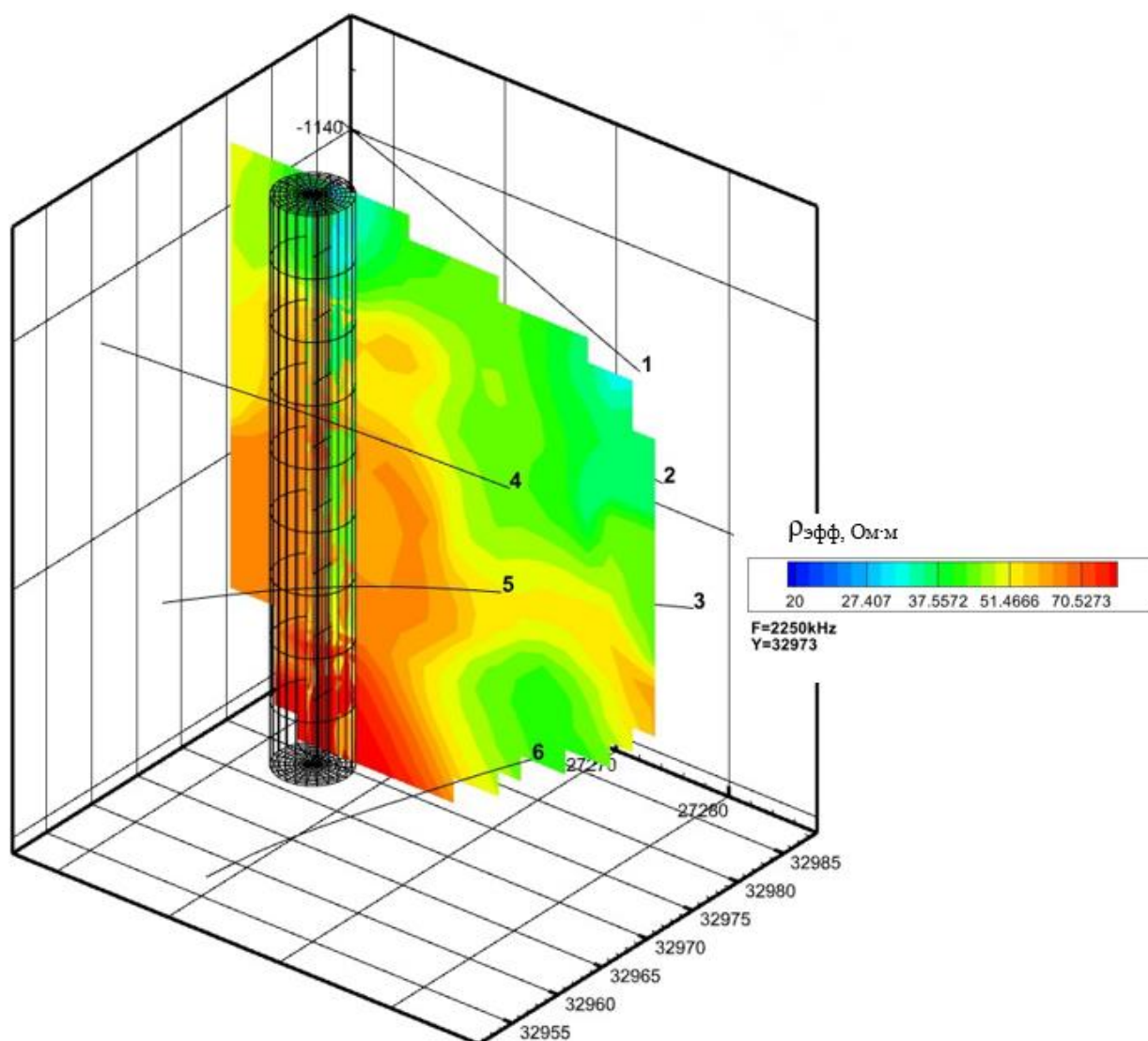


Рис. 1. Фрагмент 3D карты РВГИ. Вертикальный геоэлектрический разрез по вертикальной оси (1-6 – геофизические скважины)

Пример полученных результатов проверочных расчетов несущей способности и определения критерия N для различных участков скипового ствола приведён в таблице 10.

Анализ результатов расчетов показывает, что в интервалах ствола на глубинах от 30 до 450 м имеются отдельные участки крепи, на которых не выполняются соответствующие условия по предельным состояниям первой группы.

В интервалах глубин от 450 до 620 м крепь ствола не удовлетворяет критериям по первой группе предельных состояний. Запредельный режим работы крепи подтверждается большим количеством дефектов и локальных разрушений в существующей крепи в данных интервалах.

Таблица 10 – Результаты проверочных расчетов несущей способности крепи ствола

№	Глубина расчётного участка, м	Наибольшие горизонтальные напряжения в массиве пород, МПа	Нагрузка на крепь (контактные напряжения), МПа	Максимальные напряжения в крепи, МПа	$N_{c,n}$	$N_{c,0}$	N
1	60	1,57	0,097	1,4	1,42	2,14	0,66
2	102	2,28	0,121	1,7	1,83	2,08	0,88
3	180	3,39	0,298	4,2	1,89	1,89	1,00
4	206	3,78	0,608	8,5	1,37	1,77	0,77
5	298	4,92	0,49	6,9	0,85	1,63	0,52
6	332	5,17	0,385	5,4	2,17	1,55	1,40
7	400	5,9	0,335	4,7	1,69	1,49	1,13
8	448	6,44	0,251	3,5	0,88	1,41	0,62
9	511	7,06	0,271	3,8	0,82	1,43	0,57
10	563	7,56	0,434	6,1	0,85	1,56	0,54
11	620	8,09	0,461	6,5	0,80	1,43	0,56

Пример сформированной по результатам обследования и расчетов карты обследования участка ствола приведен на рис. 2.

По итогам обследования скиповой ствол отнесен к категории ограниченно работоспособного технического состояния, а вентиляционный – к категории аварийного технического состояния. Для вентиляционного ствола потребовалась незамедлительная разработка проекта реконструкции.

Выбор необходимых управляющих воздействий осуществляется в соответствии рекомендациями, приведёнными в табл. 11.

Таблица 11 – Выбор управляющих воздействий по результатам обследования

Техническое состояние	Параметр N	Категория устойчивости				
		I	II	III	IV	V
1	$\geq 0,7$	H	H	H	-	-
2		H	TP1	TP2	TP3	-
3		TP1	TP1, KP1	TP2, KP2	TP2, KP2, TP3, KP3	TP3, KP3
4а		TP1, KP1	KP1	KP2	KP2, KP3	KP3
4б	$< 0,7$	-	P1	P2	P2, P3	P2, P3
5		-	-	P2, P3, Л/П	P2, P3, Л/П	P3, Л

Условные обозначения:

H – проведение ремонтных работ не требуется; TP1/KP1/P1 – соответственно текущий ремонт дефектов крепи на отдельных участках/капитальный ремонт крепи ствола/реконструкция ствола с изменением проектных параметров крепи; TP2/KP2/P2 – тоже с дополнительным анкерным упрочнением пород; TP3/KP3/P3 – тоже с применением комплексных решений по упрочнению околоствольного массива (тампонаж, цементация и др.); Л – ликвидация ствола; П – перепроходка ствола с предварительной засыпкой; прочерком обозначены маловероятные на практике состояния ствола.

По результатам исследований сформулировано второе научное положение.

Важнейшим элементом обеспечения безопасности работ является применение технических и технологических решений, не снижающих величины критериев технического состояния ствола на стадии производства работ, так как в этом случае могут возникать дополнительные инциденты и аварийные ситуации в стволе.

При обосновании таких решений необходимо учитывать все аспекты взаимодействия формируемой в процессе реконструкции ствола системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив». Для ее изучения были разработаны пространственные конечно-элементные модели и выполнена серия вычислительных экспериментов, позволяющая определить необходимые параметры конструкций.

Традиционные способы и технологические схемы ремонтно-восстановительных работ в стволах предусматривают перекрепление ствола участками в направлении снизу вверх с разделкой опорных венцов, а в случае аварийного состояния выработки – засыпку ствола или участка ствола с последующей перепроходкой.

Для повышения эффективности и безопасности работ по восстановлению работоспособности вертикальных стволов предложены альтернативные технологические схемы реконструкции, предусматривающие выполнение работ в направлении сверху вниз с сохранением целостности существующей крепи и возведением новой крепи, обеспечивающей работоспособность ствола на большой срок дальнейшей эксплуатации.

Областью применения предлагаемых технологических схем являются глубокие вертикальные стволы в аварийном и предаварийном техническом состоянии, основная протяжённость которых относится IV и V категориям устойчивости.

При реализации предлагаемых схем на первом этапе осуществляется стабилизация выявленных при обследовании аварийных участков ствола.

На втором этапе осуществляется возведение колонны тубинговой крепи или комбинированной крепи усиления в направлении сверху вниз.

На третьем этапе производится рассечка сопряжений, монтаж элементов армировки и коммуникаций в стволе.

Для обеспечения устойчивости системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» в процессе возведения тубинговой колонны разработаны анкерные опорные системы, исключаящие необходимость разделки классических опорных венцов и обеспечивающие упрочнение околоствольных пород.

Для обоснования параметров анкерных опорных систем разработаны конечно-элементные модели и выполнены расчеты в программе Plaxis 3D. Пример модели и результатов расчета приведен на рис. 3.

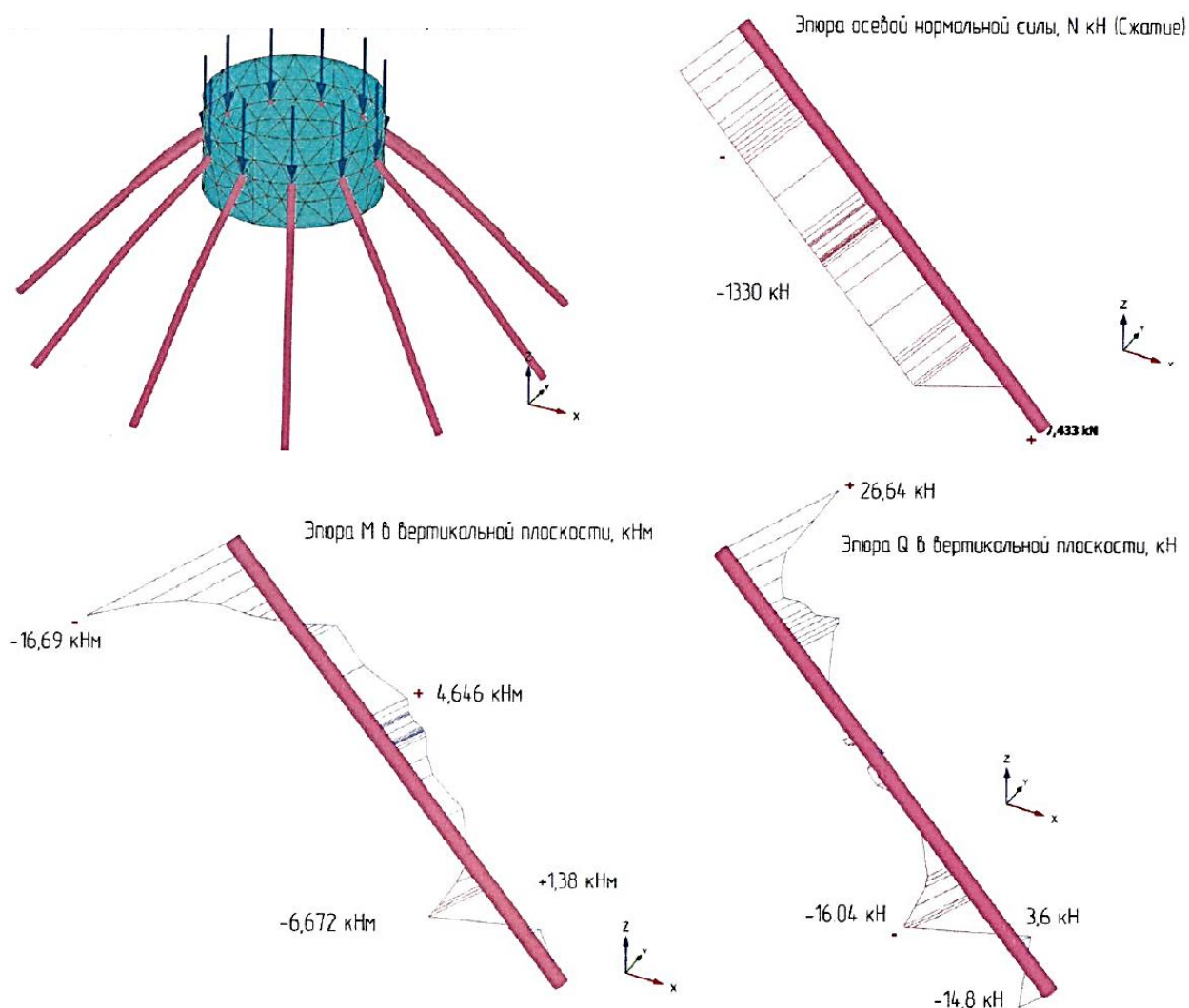


Рис. 3. Пример результатов расчета анкерной опорной системы

По результатам серий вычислительных экспериментов при варьировании диаметра, длины и плотности установки анкеров типа «Атлант» установлено, что для обеспечения требуемой несущей способности и устойчивости конструкции в породах III-IV категорий устойчивости, необходимо заглубление анкеров в устойчивую зону массива на глубину не менее $1/3$ размера нарушенной зоны вокруг ствола. Оптимальный угол установки анкеров к вертикальной оси составляет 42 - 46%, так как при данных величинах обеспечивается снижение главных напряжений в контактных слоях системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив» на 20 - 30%.

Сложную геотехнологическую задачу представляет собой возведение тубинговой колонны в искривленном стволе. Для исследования негативного влияния отклонений ствола от проектных значений разработаны пространственные конечно-элементные модели в программном комплексе Midas FEA NX. Пример результатов расчета приведен на рис. 4.

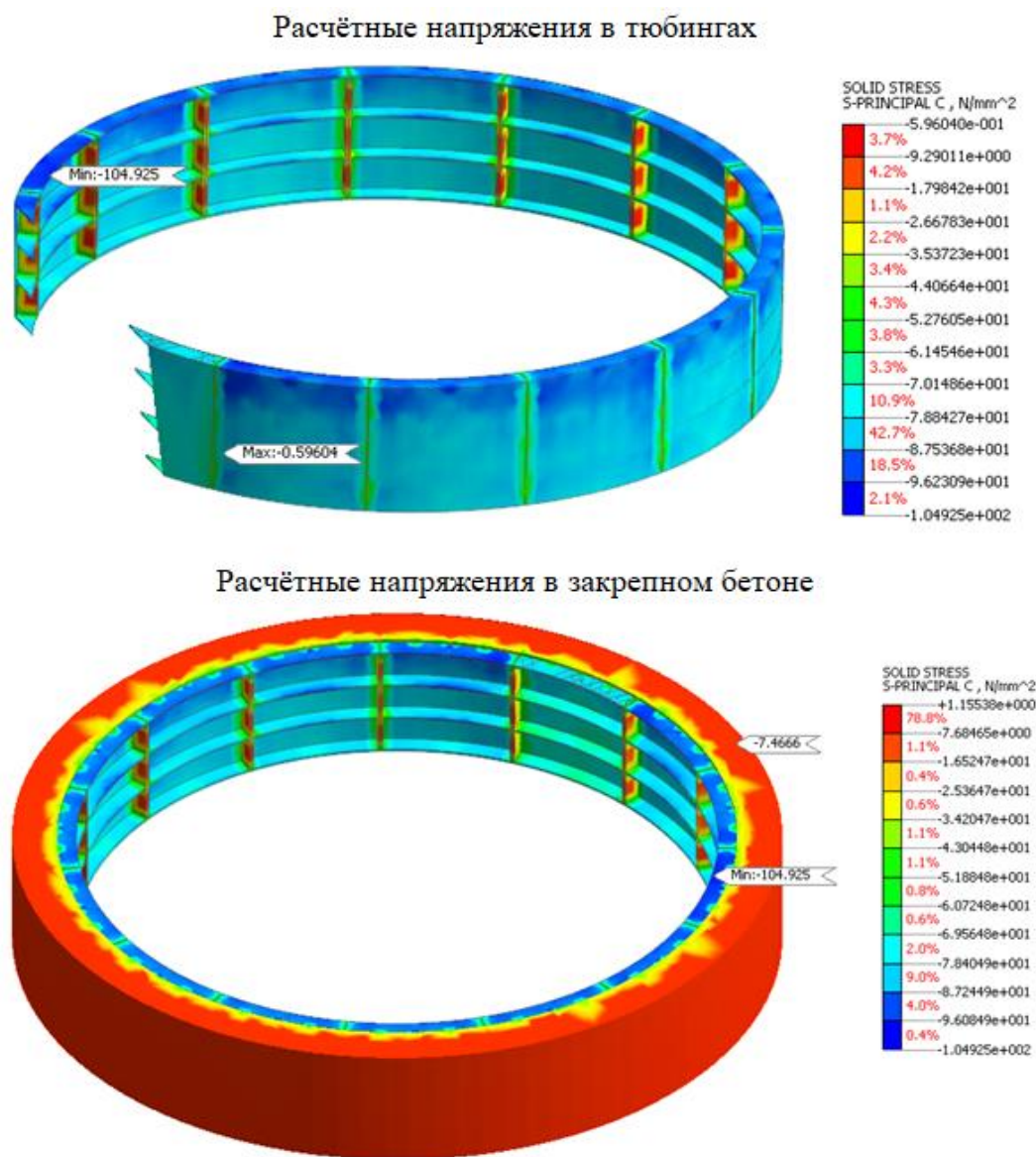


Рис. 4. Пример результатов расчета тубинговой крепи

Установлено, что при увеличении угла отклонения оси ствола от вертикали в тубинговой колонне возникают концентрации напряжений, в 1,3 - 1,4 раза превышающие средний уровень. Соответствующий график зависимости коэффициента увеличения напряжений от угла отклонения оси ствола приведен на рис. 5.

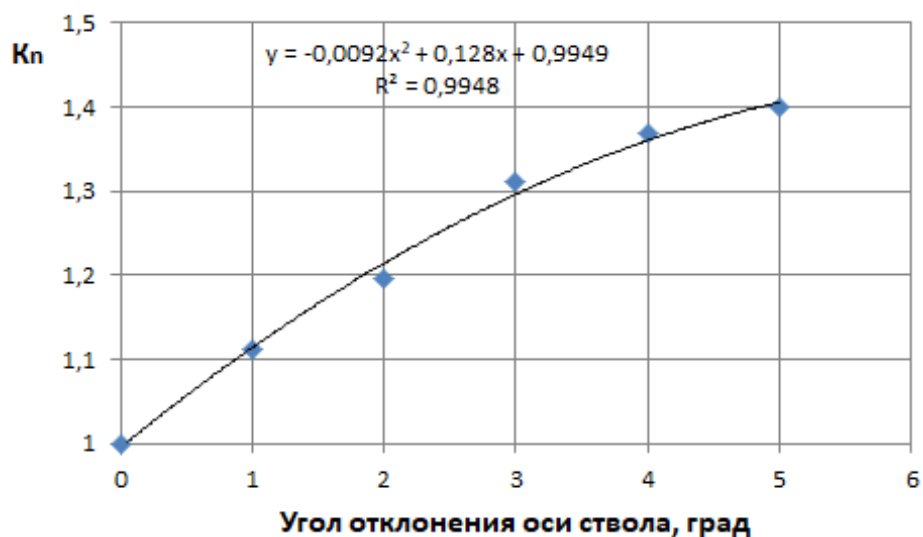


Рис. 5. График зависимости коэффициента концентраций напряжений от угла отклонения оси ствола

Для исключения выявленного негативного влияния искривления ствола разработаны специальные промежуточные компенсационные элементы с обоснованными в результате моделирования геометрическими параметрами.

По результатам исследований сформулировано третье научное положение.

Разработанная методика оценки технического состояния вертикальных стволов успешно применена при обследовании двух глубоких вертикальных стволов в Норильском промышленном районе.

Разработанные технические и технологические решения по реконструкции вертикальных стволов и предложенная в диссертации технологическая схема работ использованы при разработке проектных решений и производстве работ по реконструкции ствола ВС-5 рудника «Таймырский» ПАО «ГМК «Норильский никель» глубиной 1355 м.

Оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы по сравнению с традиционными решениями показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, в которой на основании теоретических и экспериментальных исследований решена актуальная задача по совершенствованию оценки технического состояния глубоких шахтных стволов и разработке новых технологических схем их

реконструкции, позволяющих повысить технико-экономические показатели и безопасность горнопроходческих работ, что имеет важное значение для строительной геотехнологии.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Выполнен теоретических основ и практических исследований в области оценки технического состояния шахтных стволов и разработки решений по их ремонту и реконструкции. Сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

2. Разработана новая методика оценки технического состояния эксплуатационных стволов, учитывающая плотность поверхностных и внутренних повреждений в бетоне крепи, качества контакта «крепь – массив», размеры зон дезинтеграции околоствольных пород, интенсивность водопритокков и величины отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

3. Разработан алгоритм по определению значения интегрального критерия технического состояния глубокого вертикального ствола K . Его величина определяется с учетом суммарного количества ранжированных дефектов, характеризующих плотность и критичность поверхностных и внутренних повреждений крепи, качество контакта «крепь – массив», фактическую прочность и толщину крепи, интенсивность водопроявлений, а также величину отклонений оси и сечения ствола от проектного положения.

4. В составе разработанной методики разработан порядок оценки устойчивости околоствольных пород по пяти категориям с учетом показателей относительной прочности, качества керна, контакта «крепь – массив», обводненности и срока службы ствола, что обеспечивает ранжированный выбор необходимых управляющих воздействий.

5. Усовершенствована программа обследования глубоких вертикальных стволов с большим сроком эксплуатации, предусматривающая применение визуальных методов обследования крепи, комплекс инструментальных методов, отбор кернов и определение прочности бетонной крепи, геофизическое и геомеханическое изучение околоствольного массива, расчеты и статистическую обработку данных с последующим определением категории технического состояния.

6. Представлены примеры апробации методики оценки технического состояния глубоких вертикальных стволов Норильского промышленного района, включающие результаты визуального обследования с построением карты дефектов, трехуровневого инструментального обследования, включая изучения нарушенности околоствольного массива пород, расчеты остаточной

несущей способности крепи и определение категории технического состояния выработок.

7. Разработаны технологические схемы реконструкции шахтных стволов, обеспечивающие снижение геотехнических рисков и повышение безопасности работ в сложных горно-геологических условиях, предусматривающие устройство на аварийных участках внутренней колонны крепи с ее опиранием на анкерных элементах с высокой несущей способностью.

8. Установлены закономерности взаимодействия системы «новая крепь – существующая крепь – дезинтегрированный породный массив», формируемой в процессе реконструкции ствола, в том числе на искривлённых участках стволов, с учетом которых определены параметры анкерных опорных систем и компенсационных элементов для тюбинговой крепи.

9. Выявлены негативные факторы, приводящие к возникновению концентраций напряжений в тюбинговой крепи, искривленных в процессе эксплуатации стволов, и обоснованы технологические решения по их минимизации.

10. Выполнена оценка технико-экономической эффективности предложенной технологической схемы реконструкции стволов по сравнению с традиционными решениями, которая показала, что при ее применении обеспечивается сокращение сроков реконструкции ствола на 1,2 года и экономический эффект в размере 1 млрд. 140 млн. руб.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО

в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки

1. Панкратенко А.Н., Машин А.Н., Насонов А.А., Паринов Д.С. Особенности оценки технического состояния шахтных стволов с большим сроком эксплуатации // Горный журнал. 2023. № 1. С. 20 - 26.

2. Машин А.Н. Методика оценки устойчивости эксплуатационных вертикальных стволов // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2023. № 8. С. 156 - 163.

3. Машин А.Н. Совершенствование технологии реконструкции шахтных стволов в сложных горнотехнических условиях: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 8 (специальный выпуск 9). 20 с.

4. Машин А.Н. Концепция комплексной оценки технического состояния шахтных стволов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2023. № 10. С. 31 - 42.