

УДК 622.25:004.9

М. Г. КУЗНЕЦОВА¹, Д. А. ДИУЛИН²¹Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь²ОАО «Трест Шахтоспецстрой», Солигорск, Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ, ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ КРЕПИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ШАХТ

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при эксплуатации стволов шахт, выполнен обзор методов диагностирования, анализа и прогнозирования несущей способности вертикальных стволов шахт, в том числе с применением компьютерного моделирования.

Ключевые слова: вертикальные шахты, диагностика прочности, компьютерное моделирование стволов шахт, прогнозирование срока безопасной эксплуатации шахт.

К горным работам относят работы по выемке полезного ископаемого или породы [1, с. 5]. При этом в толще земной коры образуются полости, называемые горными выработками, которые могут быть классифицированы в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 1. Их разделяют по пространственному расположению на вертикальные, горизонтальные и наклонные [2, с. 8–9]; назначению – на главные и вспомогательные [3, с. 8].



Рисунок 1 – Классификация подземных горных выработок

Подземные вертикальные выработки всегда имеют замкнутый контур поперечного сечения, используются, как правило, при больших глубинах залегания полезных ископаемых. Они подразделяются на эксплуатационные стволы, шурфы и гезенки (рисунок 2). Стволы – это самые глубокие и большие по размеру поперечного сечения виды вертикальных подземных выработок. Шурфы прокладываются на меньшую глубину (до 50–60 м) [1, с. 6], имеют небольшое сечение и нужны для разведки полезных ископаемых или обслуживания подземных работ. Гезенк выполняет функции вспомогательной полости для перемещения полезных ископаемых с верхнего

яруса на нижний, передвижения людей, вентиляции и др. Стволы (кроме слепого) и шурфы, в отличие от гезенка, имеют непосредственный выход на поверхность.



Рисунок 2 – Классификация вертикальных стволов шахт

Вертикальные стволы шахт могут иметь поперечное сечение различной формы [4], однако наиболее часто используются круглая, прямоугольная и эллиптическая. При залегании полезных ископаемых на глубине более 100–150 м и прогнозируемых длительных сроках эксплуатации шахты используют стволы с круглым поперечным сечением, диаметр которого зависит от производственной мощности подземной выработки [5, с. 412; 6]. На Солигорском (Старобинском) месторождении глубина стволов составляет 530–700 м [3, с. 10], что характерно для горно-химической промышленности, стволы имеют круглое поперечное сечение (рисунок 3) [7, с. 11]. При разработке залежей вскрыты запасы трех калийных горизонтов.

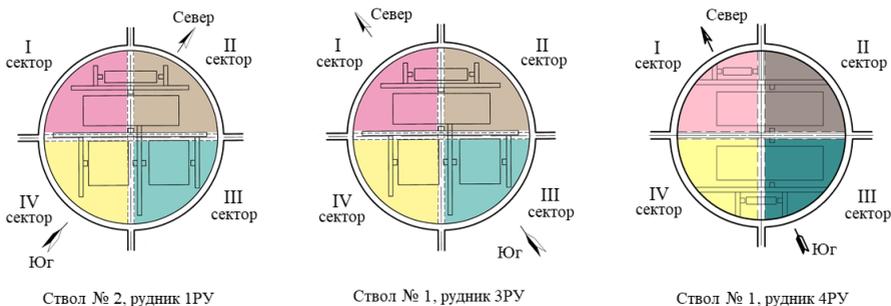


Рисунок 3 – Сечения вертикальных стволов рудников, эксплуатируемых РУП «ПО «Беларуськалий»»

Цель представленной работы – анализ проблем эксплуатации, диагностики текущего состояния и прогнозирования срока безопасной эксплуатации крепи стволов шахт.

Стабильность и устойчивость глубоких подземных выработок являются ключевыми проблемами их эксплуатации и в значительной степени зависят от механических свойств массива породы, окружающего шахту, и напряжений, вызванных в этой породе. Напряжения являются функцией формы котлована и начальных напряжений в породе до ее разработки. Вокруг горных выработок могут возникать области, в которых действуют одновременно по разным направлениям сжимающие и растягивающие напряжения. Часто эти зоны определяют возможность разрушения и его вид в элементах выработок.

Степень минерализации и влажность существенно влияют на механические свойства горных пород [8]. Вода – один из важных факторов, влияющих на прочность породы. Она оказывает на горную породу механическое, физическое и химическое воздействие [9, 10]. Первое включает влияние гидростатического и гидродинамического давления. Физическое воздействие выражается в смягчении пород водой, образовании грязи, смазки, сушке и смачивании, а также замерзании и оттаивании горных пород, изменяющими и ухудшающими их физико-механические свойства. Химическое воздействие включает в основном растворение, ионный обмен, гидратацию и гидролиз. Также на механические свойства влияют водопоглощение пород, наличие пустотных образований, особенности микроструктуры отдельных породных массивов, возникновение зон неупругих деформаций [11] и время приостановки проходки ствола при наборе бетоном прочности [12].

Нестабильность подземных сооружений наиболее вероятна вблизи контактных зон водоносных горизонтов с мягкими и твердыми породами. В таких областях появляются зоны концентраций напряжений, сдвигов и изгибающих моментов, оказывающие негативное влияние на прочность подземных сооружений в районе выработки. Кроме того, неравномерная деформация окружающей выработку породы обязательно приводит к переменной нагрузке на крепь ствола. Под действием неоднородного поля давления и частичного сдвига происходит разрушение крепи ствола, причем площадь разрушения при сдвиге увеличивается вследствие умягчения окружающей породы водой.

Вертикальные стволы шахт относят к выработкам 1-го класса в соответствии с классификацией свода правил СП 91.13330.2012 Подземные горные выработки [13]. При нарушениях нормальной эксплуатации таких подземных сооружений работа предприятия вынуждена останавливаться.

Разработка залежей калийных солей Старобинского месторождения проводилась в сложных гидрогеологических условиях. Три калийных горизонта разработаны после прохождения на разную глубину пятнадцати стволов. Забоями стволов пересекались сильно обводненные отложения неогенового и палеогенового периодов, что обусловило применение специального спосо-

ба проведения проходки с предварительным замораживанием горных пород вокруг стволов на глубину до 200 и более метров. На участках водоносных горизонтов (до глубины 300–400 м) стволы Солигорских рудников были закреплены чугунной тюбинговой крепью с заполнением затюбингового пространства бетоном толщиной 0,4–0,7 м. Такая конструкция крепи, вместе с возведением в водоупорных породах специальных кювеляжных опорных венцов (кейлькранцев), была применена в целях герметизации крепи от проникновения воды и рассолов в ствол, а также разобщения водоносных горизонтов и соленосной толщи [7, с. 8].

Для многих пород, в том числе и соляных, традиционно используют монолитно-бетонную крепь [14]. С течением времени происходит ее деформация и разрушение, обусловленные постоянным давлением со стороны породного массива. Причем это давление постепенно увеличивается по причине ползучести соляных пород без видимого разрушения массива [15]. Вокруг области выработки образуется дефектная среда, включающая локальные зоны деформирования и разрушения.

Проектные размеры бетонной крепи и ее расчетные прочностные параметры не совпадают с фактическими, что обусловлено неточностью установки опалубки, ее эксплуатационной деформацией, отличием запланированного объема вывалов породы от фактических, наличием «холодных швов» и др. С течением времени бетонная крепь постепенно теряет свои первоначальные свойства, рыхлеет, истончается.

Наиболее точная информация о состоянии крепи и тюбинга может быть получена только экспериментальным способом, который часто является неосуществимым из-за недоступности исследуемых участков для прямого инструментального контроля [16]. Поэтому в настоящее время наряду с натурными исследованиями для диагностики состояния тюбингов и бетонной крепи стволов шахт используются GPS-мониторинг [17], термодатчики [18], методы ультразвуковой томографии и ударного эха [19], спектральный и деформационный анализ систем «сосуд – армировка» вертикальных стволов [20], георадиолокация [21] и т. д., которые могут эффективно предоставить данные о деформации конструкций, но не могут предотвратить или предсказать разрушение элементов заранее.

В Китае для диагностики широко используются оптоволоконные датчики, обеспечивающие высокую точность при небольших габаритах, незначительных электромагнитных помехах. Оптоволоконный метод диагностики позволяет непрерывно, в режиме реального времени контролировать ствол скважины на опасной глубине, используя показания нескольких датчиков, эффективно измерять значения напряжения в стволе скважины, деформации и температуры, а также давать эффективные своевременные предупреждения о необходимости устранения недостатков традиционного метода мониторинга на основе одиночных физических измерений [17].

Авторы работы [18] приводят аргументы в пользу эффективности мониторинга состояния бетонной крепи с помощью температурных датчиков, на основе измерений которыми были построены модели крепи для удовлетворительного (рисунок 4, *a*) и неудовлетворительного (рисунок 4, *б*) состояния.

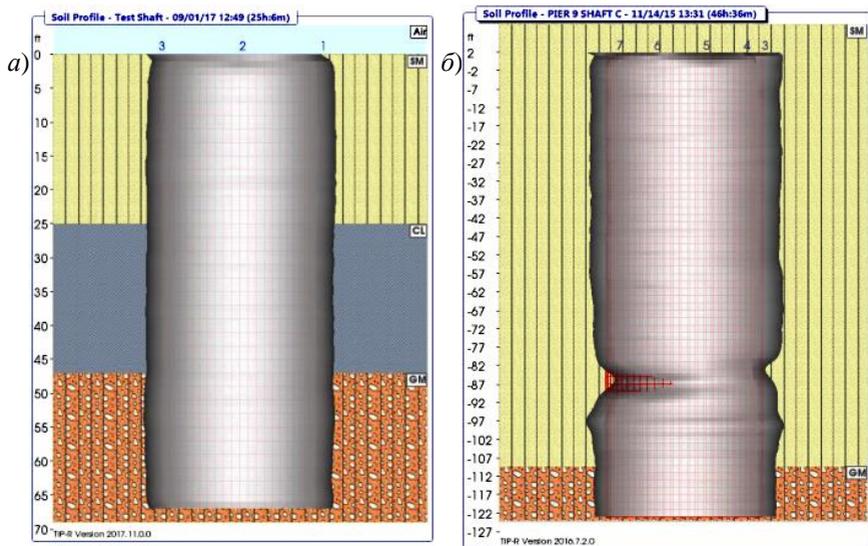


Рисунок 4 – Модели бетонной крепи вертикального ствола шахты при удовлетворительном (*a*) и неудовлетворительном (*б*) состоянии, построенные на основе показаний температурных датчиков

До начала работ по восстановлению несущей способности шахтного ствола необходимо выполнить оценку его технического состояния, экспертизу промышленной безопасности объекта, дать обоснование безопасности эксплуатации подземного сооружения после восстановления (реконструкции), разработать и согласовать соответствующую документацию [22].

Автором работы [12] приведены результаты измерения действующих напряжений в крепи ствола методом щелевой разгрузки, который требует меньших трудозатрат по сравнению со скважинными методами [23] и поэтому может применяться в качестве метода оперативного контроля напряженного состояния массива горных пород на контуре выработки. Причем измерения напряженно-деформированного состояния для оценки его изменения с течением времени проводятся раз в три-четыре месяца [23].

Для усиления монолитной бетонной крепи используется арматура, которая, однако, приводит к разрушению бетона [14]. Поэтому следует использовать более податливые материалы, например, пенополистиролы [24] для защиты бетонной крепи сопряжений шахтных стволов и выработок, примыка-

ющих к ним. Авторы работы [25] анализируют целесообразность футеровки ствола возрастной вертикальной угольной шахты, а в работе [26] описываются достоинства армирования крепи углепластиковым ламинатом.

Аналитическое моделирование довольно широко используется для решения задач по укреплению стволов шахт. Чаще всего для решения контактных задач используют плоские (двумерные) модели, однако они не позволяют получить полную картину напряжений и деформаций ствола шахты в зависимости от свойств окружающей среды и глубины бурения.

Например, в работе [25] рассмотрены механические модели, основанные на теории упругости, с помощью которых возможен подбор оптимальных параметров и материалов для футеровки возрастных вертикальных угольных шахт с целью повышения безопасности их эксплуатации.

Устойчивость различных горных пород при бурении шахт проанализирована в работе [27]. В статье [28] приведены результаты двумерного моделирования нагружения ствола опускного колодца для оценки его технического состояния и прогнозирования времени безопасной эксплуатации. Особенностью модели является предварительная (на стадии строительства) деформация вертикального ствола колодца.

Авторами работ [29, 30] в программном комплексе «Ли́ра» выполнено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния ствола при его углублении. Результаты показали, что при увеличении глубины ствола происходит рост напряжений в бетонной крепи верхнего исследуемого участка, причем наибольших значений напряжения достигают в слабых породах.

На основе анализа двумерной модели (рисунок 5) авторами исследования [31] выявлены закономерности изменения напряженно-деформированного состояния углевмещающих породных массивов в зависимости от горно-геологических факторов с применением инженерного комплекса ANSYS. Результаты этих расчетов позволяют в конкретных условиях эксплуатации устанавливать рациональные параметры крепления боковых пород для повышения устойчивости подготовительных горных выработок.

Автор монографии [32] привел описание случайных и детерминированных факторов, действующих на условия эксплуатации стволов шахт с круглым поперечным сечением, разработал в программном комплексе Phase2 плоские конечноэлементные модели нагруже-

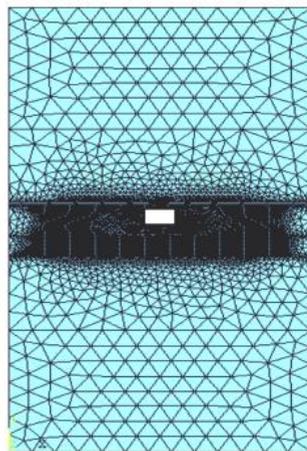


Рисунок 5 – Плоская конечно-элементная модель массива породы вокруг выработки

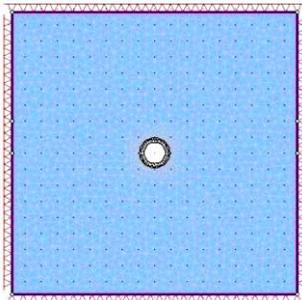


Рисунок 6 – Модель нагружения крепи ствола в однородном массиве

ния крепи ствола в однородном массиве (рисунок 6 [32, с. 87]), учитывая нерегулярности контура поперечного сечения. Тем же автором проведены исследования напряженно-деформированного состояния массива породы при проведении буровзрывных работ (рисунок 7 [32, с. 116]).

Автором работы [33] предлагаются подходы к компьютерному моделированию вертикальных стволов шахт при их проектировании. Рассчитаны вертикальные и боковые напряжения в призабойном пространстве массива породы. С применением программного комплекса MidasGTS учтены плоские статические нагрузки, получены эпюры изгибающих моментов и продольных усилий, действующих на бетонную крепь ствола.

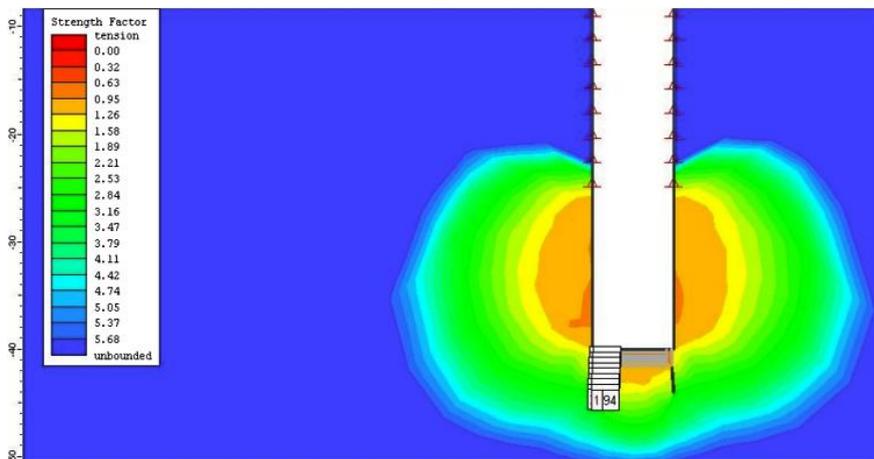


Рисунок 7 – Распределение strength-фактора в незакрепленной части ствола

В отчете [34] описаны подходы к трехмерному моделированию взаимодействия стволов шахт прямоугольного поперечного сечения в процессе их бурения, предложены варианты подбора исходных данных для вертикальных шахт Homestake, проведены расчеты их нагружения.

Статья [35] посвящена анализу напряжений в массиве породы при бурении вертикальных шахт в целях обеспечения безопасности процесса бурения, однако не учтены нагрузки, действующие на ствол шахты после ввода ее в эксплуатацию. Анализ вертикально нагруженных свай с учетом характеристик окружающего породного массива рассмотрен в статье [36]. Модель, разработанная в [37], обеспечивает важную теоретическую основу и

ссылки на проектирование и оптимизацию кондиционирования почвы во время проходки тоннелей. Численное моделирование нагрузок бетонных крепей горизонтальных тоннелей, укрепленных металлической арматурой, результаты которого подтверждены экспериментально, приведены в [38].

В статье [39] выполнен анализ напряженно-деформированного состояния части цилиндрического вертикального ствола угольной шахты на основе конечно-элементного моделирования (рисунок 8). Дальнейшее развитие этих исследований представлено в диссертации [26].

Авторами исследования [40] проведена экспериментальная оценка масштабированных моделей ствола угольной шахты под действием гидравлических нагрузок. Показано, что при разрыве образцов происходит пластический изгиб периферийной арматуры вдоль поверхности разрушения, вызванный отказом от сжатия-сдвига. Наибольшее влияние на повреждение оказывают прочность бетона на одноосное сжатие и отношение толщины к диаметру, на которое меньше всего влияет коэффициент армирования. Экспериментальные данные сравнивались с результатами теоретических исследований, полученных на основе вывода уравнений для предельной несущей способности, напряжения, радиуса и нагрузки в упругой и пластической зонах с использованием трехпараметрического критерия прочности. Для проверки результатов выполнялось конечно-элементное моделирование участков шахты под действием статического нагружения ее ствола (рисунок 9 [40]).

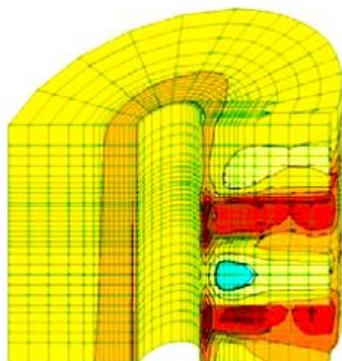


Рисунок 8 – Эквивалентные напряжения в секции ствола угольной шахты

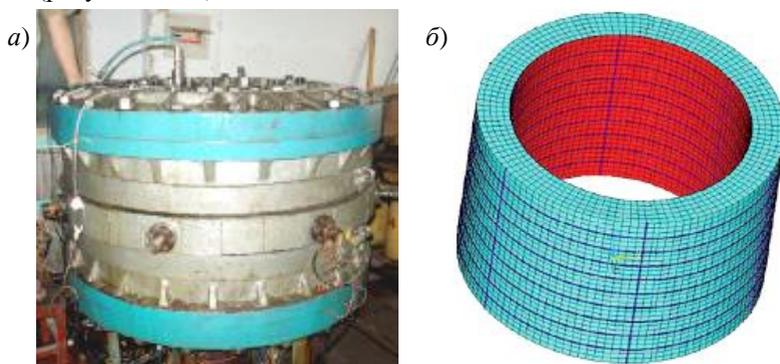


Рисунок 9 – Экспериментальная (а) и конечно-элементная (б) модели участка ствола шахты

Авторами статьи [41] рассмотрены подходы к моделированию вертикального ствола шахты с круглым поперечным сечением 30 м и глубиной установки до 44 м. Проанализировано распределение кольцевых сил с учетом несбалансированной нагрузки, связанной с мягкостью грунта. Фактор времени при математическом моделировании давления угольных пластов и породного массива вокруг выработки был учтен в [42, 43]. Авторы статьи [44] разработали модели, описывающие засыпку гранулированных частиц в места выработки угольных пластов во избежание обвалов массива породы из-за образовавшихся при добыче пустот. В статье [45] выполнено двухмерное гидромеханическое моделирование подземной площадки для хранения углекислого газа и его закачки в угольную шахту с прогнозом на период 500 лет.

В исследовании [46] выполнен анализ распределения напряжений вокруг вертикального ствола шахты с круглым поперечным сечением диаметром 10 м в условиях трехмерной нагрузки методом конечных элементов. Выемка грунта сначала рассматривалась как осесимметричная задача с использованием программного комплекса PLAXIS 2D, а затем данные переносились в конечно-элементную модель в программе PLAXIS 3D. Обнаружено, что весьма важен выбор модели грунта, принятой для моделирования (модели Кулона – Мора или упрочняющегося грунта). Диаметр сечения шахты влияет на результаты расчета не столь значительно. Вариации параметров прочности на границе «грунт – конструкция» показали лишь незначительное влияние на результаты анализа.

Авторы работ [47, 48] провели исследование устойчивости ствола глубоинной угольной шахты с учетом чередования твердых и мягких пород вокруг выработки на основе трехмерного численного моделирования. Для одноосных испытаний горных пород в естественном насыщенном водой состоянии авторы использовали цифровую гидравлическую испытательную систему с сервоприводом (одноосная и трехосная испытательная система Rock 2000 кН). Затем полученные значения были учтены при создании упрощенной модели для трехмерного моделирования (рисунок 10). В работе показано, что разрушение бетонной футеровки ствола происходит в основном вследствие сдвига. При этом смягчение водой приводит к заметному увеличению пластической зоны футеровки. Численное моделирование показывает, что взаимодействие воды с породой усугубляет процесс разрушения горной массы. Это приводит к асимметричной деформации вертикального ствола шахты. Кроме того, в районе контактной зоны мягких и твердых пород образуется большая концентрация напряжений и происходит увеличение изгибающего момента, действующего на ствол, обусловленного резким изменением давления породы на ствол шахты. Эти же утверждения подтверждены в работе [49].

Таким образом, выполненный анализ литературных источников показал, что разными группами специалистов из Беларуси [33], Китая [40, 47, 48],

США [4, 34, 50], России [26, 31, 39], Украины [32], Польши [19], Сингапура [41] и др. выполнялся диагностический анализ прочности и устойчивости, а также взаимодействия стволов шахт с породными массивами, имеющими не меняющиеся с течением времени свойства.

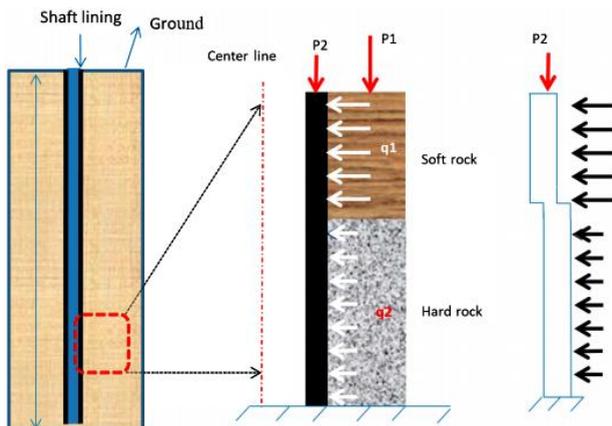


Рисунок 10 – Расчетная схема, учитывающая наличие твердых и мягких пород вокруг выработки [47]

При этом никем не выполнялся теоретический анализ влияния грунтовых вод и рассолов на физико-механические свойства используемых при строительстве шахт материалов. Также отсутствуют исследования прогнозируемых сроков службы шахты с учетом влияния временного фактора на прочность и устойчивость крепи стволов, а также механизма деформаций и разрушения вертикальных стволов на границах раздела мягких и твердых пород, в том числе после восстановления их несущей способности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Долгий, И. Е. Основы горного производства : учеб. пособие / И. Е. Долгий, А. А. Силантьев. – СПб. : СПбГУ, 2003. – 96 с.
- 2 Рогинский, В. М. Проведение горно-разведочных выработок : учеб. для вузов / В. М. Рогинский. – М. : Недра, 1987. – 296 с.
- 3 Насонов, И. Д. Технология строительства подземных сооружений : учеб. пособие. В 3 ч. Ч. I. Строительство вертикальных выработок / И. Д. Насонов, В. А. Федюкин, М. Н. Шуплик. – М. : Недра, 1983. – 232 с.
- 4 Chan, S. S. M. Structural design considerations for deep mine shafts: Analysis of circular, rectangular, and elliptical openings / S. S. M. Chan, M. J. Beus. – US Department of the Interior, Bureau of Mines, 1985. – 42 p.
- 5 Проведение горно-разведочных выработок. Справочник / В. Н. Гусев [и др.] – М. : Недра, 1990. – 412 с.
- 6 Geotechnical Engineering Manual: Drilled Shaft Inspector's Guidelines. – New York : Department of Transportation, 2015. – 30 p.

7 Выполнить анализ результатов проведенных обследований крепи стволов, оценить необходимость и объемы геофизических работ на деформированных участках : отчёт о НИР (промежут. по дог. № 899.С.2009, этап 1.4) / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. А. М. Ефимов ; исполн.: Кафанова Т. П. [и др.]. – Минск, 2009. – 42 с. – № ГР 20092386.

8 A case study on large deformation failure mechanism of deep soft rock roadway in Xin'An coal mine, China / S. Q. Yang [et al.] // Eng. Geol., 2017. – Vol. 217. – P. 89–101.

9 Groundwater chemistry and geochemical modeling of water-rock interactions at the Osamu Utsumi mine and the Morro do Ferro / D. K. Nordstrom [et al.] // Journal of Geochemical Exploration. – 1992. – Vol. 45. – P. 249–287.

10 Геомеханические закономерности проявлений горного давления в глубоких шахтах / В. И. Николин [и др.]. – Донецк : Донбасс, 2011. – 222 с.

11 **Клыков, А. Е.** К расчету пучения почвы протяженной выработки / А. Е. Клыков, Г. В. Широколов // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 4 (116). – С. 44–48.

12 **Сентябов, С. В.** Совершенствование метода расчета напряженного состояния монолитной бетонной крепи шахтных стволов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. В. Сентябов : Екатеринбург, 2016. – 21 с.

13 **Булычев, Н. С.** Расчет крепи капитальных горных выработок / Н. С. Булычев, Б. З. Амосин, А. Г. Оловянный. – М. : Недра, 1974. – 320 с.

14 **Альменко Д. Н.** Применение облегченных видов крепи при поддержании пристольных выработок в соляных породах / Д. Н. Альменко [и др.] // Горный журнал. – 2019. – № 5. – С. 42–45.

15 **Ольховиков, Ю. П.** Крепь капитальных выработок калийных и соляных рудников / Ю. П. Ольховиков. – М. : Недра, 1984. – 238 с.

16 **Сергеев, С.** Диагностика и мониторинг напряжённого состояния крепи вертикальных стволов / С. Сергеев, Д. Казикаев. – М. : Горная книга, 2011. – 244 с.

17 **Wang, D.** Research on Monitoring of Coal Mine Shaft Deformation Based on Fiber Grating Technology / D. Wang, W. Yang // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1549, No. 4. – С. 042088.

18 Quality Control of Drilled Foundations for Base Cleanliness, Concrete Integrity, and Geometry / R. Moghaddam [et al.] // 10th International Conference on Stress Wave Theory and Testing Methods for Deep Foundations. – ASTM International, 2019. – 16 p.

19 **Hola, J.** Evaluation of adhesion of concrete screed to mine shaft wall by means of nondestructive acoustic methods / J. Hola, K. Schabowicz, L. Sadowski // Materials of the 19th World Conference on Non-Destructive Testing. – 2016. – P. 1–8.

20 **Ильин, С. Р.** Спектральный и деформационный анализ систем «сосуд – армировка» вертикальных стволов / С. Р. Ильин, М. В. Дубинин // Геотехнічна механіка : Міжвід. зб. наук. праць. – Дніпропетровськ : ІГТМ НАНУ, 2015. – Вип. 122. – С. 164–193.

21 **Глазунов В. В.** Применение метода георадиолокации для исследования состояния крепи и закрепного пространства рудника «Октябрьский» / В. В. Глазунов, С. М. Данильев // Записки Горного института. – 2011. – Т. 189. – С. 15–18.

22 Обеспечение комплексной безопасности работ по восстановлению и реконструкции шахтных стволов / М. С. Плешко [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 7. – С. 104–112.

23 **Барышников, В. Д.** Определение напряжений методом целевой разгрузки / В. Д. Барышников, И. Л. Болтенгаген, А. М. Коврижных // Комбинированная геотех-

нология: развитие способов добычи и безопасность горных работ : материалы Международ. науч.-техн. конф. – 2003. – С. 26–29.

24 Способы обеспечения устойчивости сопряжений шахтных стволов с примыкающими выработками в соленосных массивах горных пород / В. А. Соловьев [и др.] // Горный журнал. – 2013. – № 7. – С. 53–56.

25 The Unified Strength Theory for Plastic Limit Load Analysis of Vertical Shaft Lining / G. Zhao [et al.] // Advances in Civil Engineering. – 2018. – Vol. 2018. – 6 p.

26 **Пашкова, О. В.** Обоснование технических и технологических решений по сооружению приствольных выработок в пройденных вертикальных стволах: дис. ... канд. техн. наук / О. В. Пашкова. – Новочеркасск, 2015. – 145 с.

27 **Wiles, T.** Three ways to assess mining-induced fault instability using numerical modelling [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://esvc000013.wic064u.serverweb.com/ftp/Three%20Ways%20to%20Assess%20Mining%20Induced%20Fault%20Instability%20Using%20Numerical%20Modelling.pdf>. – Дата доступа : 02.09.2020.

28 **Рудак, В. А.** Моделирование напряженно-деформированного состояния ствола опускного колодца / В. А. Рудак, Н. В. Беляев // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. – 2009. – № 4 (14). – С. 32–37.

29 **Прокопов, А. Ю.** Исследование изменения напряженно-деформированного состояния крепи зумпфов на разных этапах эксплуатации и углубки вертикальных стволов / А. Ю. Прокопов, М. В. Проколова, К. Э. Ткачева // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2013. – № 4. – С. 37–41.

30 **Проколова, М. В.** Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «крепь – массив» при углубке вертикальных стволов // М. В. Проколова, К. Э. Ткачева. – Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 4. – С. 213–216.

31 **Демин, В. Ф.** Характер напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг анкерных крепей / В. Ф. Демин, В. В. Яворский, Т. В. Демина // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 7-2. – С. 201–204.

32 **Янкин, А. Е.** Совершенствование параметров буровзрывной технологии проведения вертикальных стволов для повышения устойчивости породных обнажений и крепи / А. Е. Янкин. – Днепропетровськ : НГУ, 2016. – 139 с.

33 **Иголка, Д. А.** Возможности использования трехмерного моделирования методом конечных элементов при проектировании вертикальных шахтных стволов / Д. А. Иголка // Горная механика и машиностроение. – 2012. – № 1. – С. 40–46.

34 Rock mechanics study of shaft stability and pillar mining, Homestake Mine, Lead, SD (in three parts): 3. Geomechanical monitoring and modeling using UTAH3 / W. G. Pariseau [et al.]. – 1996. – 36 p.

35 **Neverov, S. A.** Stress-strain analysis of rock mass during mining of protective pillar of vertical shaft / S. A. Neverov, Y. N. Shaposhnik, A. M. Nikolsky // IOP Conference Series : Earth and Environmental Science. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 523. – Paper 012004. – 8 p.

36 **Jiang, C.** Analysis of vertically loaded piles considering crushing characteristics of crushed stones / C. Jiang, Y. Li, J. He // PloS one. – 2019. – Vol. 14, No. 7. – Paper e0219003. – 21 p.

37 **Li, X.** Calculation model of the equivalent spiral shear stress of conditioned sand / X. Li, N. Tan // PloS one. – 2019. – Vol. 14, No. 3. – Paper e0212923. – 20 p.

38 Comparative study on the mechanical mechanism of confined concrete supporting arches in underground engineering / Z. Lv [et al.] // Plos one. – 2018. – Vol. 13, No. 2. – Paper e0191935. – 16 p.

39 Study of technical solutions to strengthen the lining of the barrel in the zone of influence of construction near-wellbore production / M. S. Pleshko [et al.] // *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015. – Vol. 10, No. 1. – P. 14–19.

40 Mechanical properties of high-strength high-performance reinforced concrete shaft lining structures in deep freezing wells / S. Peng [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 2019. – Article ID 2430652. – 14 p.

41 Design and Construction of Large Diameter Circular Shafts / T. T. Aye [et al.] // *Underground Singapore, Singapore*. – 2014. – 15 p.

42 Павлова, Л. Д. Моделирование циклического характера обрушения горных пород при проведении выработки с последовательным накоплением повреждений / Л. Д. Павлова, В. Н. Фрянов // *Известия Томского политехнического университета*. – 2004. – Т. 307. – № 2. – С. 76–79.

43 Цветков, А. Б. Нелинейная математическая модель геомеханического состояния углепородного массива / А. Б. Цветков, В. Н. Фрянов, Л. Д. Павлова // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. – 2015. – № 1. – С. 365–370.

44 The role of gangue on the mitigation of mining-induced hazards and environmental pollution: an experimental investigation / D. Ma [et al.] // *Science of the Total Environment*. – 2019. – Vol. 664. – P. 436–448.

45 Hydromechanical modelling of shaft sealing for CO₂ storage / A. C. Dieudonné [et al.] // *Engineering geology*. – 2015. – Vol. 193. – P. 97–105.

46 Georgiannou, V. N. Analysis of a vertical segmental shaft using 2D&3D finite element codes / V. N. Georgiannou, A. Serafis, E. M. Pavlopoulou // *International Journal of Geomech*. – 2017. – Vol. 13, No. 36. – P. 138–146.

47 Deformation Failure Mechanism of Deep Vertical Shaft in Jinchuan Mining Area / Q. Sun [et al.] // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – su12062226. – 23 p.

48 Investigation of deep mine shaft stability in alternating hard and soft rock strata using three-dimensional numerical modeling / X. Sun [et al.] // *Processes*. – 2019. – Vol. 7, No. 2. – pr7010002. – 17 p.

49 Vertical shaft support improvement studies by strata grouting at aquifer zone / Q. Yu [et al.] // *Advances in Civil Engineering*. – 2018. – Vol. 2018. – Article ID 5365987. – 10 p.

50 Investigation of shaft stability and anisotropic deformation in a deep shaft in Idaho, United States / G. Walton [et al.] // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. – 2018. – Vol. 105. – P. 160–171.

M. G. KUZNIATSOVA¹, D. A. DZIULIN²

¹*Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus*

²*JSC "Trest Shahtospecstroy", Soligorsk, Belarus*

SPECIFIC FEATURES OF OPERATION, DIAGNOSTICS AND FORECASTING OF THE CONDITION OF VERTICAL SHAFTS LINING

The paper considers the main problems arising during the operation of mine shafts, there is carried out the review of the methods for diagnosing, analyzing and predicting the bearing capacity of vertical shaft shafts, including computer modeling application.

Keywords: vertical mines, diagnostics of strength characteristics, computer modeling of mine shafts, forecasting the safe operation of mines.

Получено 01.10.2020