

УДК 622.833.5

Сентябов Сергей Васильевич

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Карамнов Дмитрий Викторович

младший научный сотрудник,
лаборатория геодинамики и горного давления,
Институт горного дела УрО РАН,
e-mail: MarlouBT2011@yandex.ru

**МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПЕРВОНАЧАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ
МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД
НАТУРНЫМИ ИЗМЕРЕНИЯМИ****Аннотация:*

Возникшая в нашей стране в начале 40-х годов прошлого века сначала на угольных шахтах, а затем в 70-х годах и на рудниках проблема горных ударов или динамических явлений остается до настоящего времени до конца не решенной. Так, на Таштагольском руднике число динамических явлений достигает до 1,5 тыс. в год, на Шерегешском с 1995 по 2005 г. произошло более 70 динамических явлений с энергией до 107 Дж, на Казском с 1987 по 2007 г. отмечено более 200 явлений.

На уральских рудниках, например, на СУБРе, число горных ударов за год достигает 3000, иногда со смертельным исходом, а на железорудных шахтах Урала, в связи с углублением горных работ, их число также возрастает. Достаточно сказать, что только на одной шахте Естюнинской за период с 1990 по 2009 г. произошло 30 горных ударов и отмечено 10 техногенных землетрясений.

Причина этих явлений кроется в недостаточном геомеханическом обосновании параметров мер профилактики и, в первую очередь, в отсутствии расчетного прогноза удароопасности, позволяющего предусматривать предупреждение динамических явлений на стадии проектирования горных работ и строительства.

Таким образом, расчетный геомеханический прогноз и определение первоначального напряженного состояния на рудниках остаются до настоящего времени весьма актуальными.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, наблюдательная станция, устойчивость, переменные во времени напряжения, массив горных пород, физико-механические свойства.

DOI: 10.25635/2313-1586.2023.01.054

Sentyabov Sergey V.

Candidate of Technical Sciences,
Senior Researcher,
Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS,
620075 Ekaterinburg,
58 Mamina-Sibiryaka Str.
e-mail: sentyabov1989@mail.ru

Karamnov Dmitry V.

Junior Researcher,
Laboratory of Geodynamics and Mining Pressure,
Institute of Mining, Ural Branch of RAS
e-mail: MarlouBT2011@yandex.ru

**METHODS FOR DETERMINING
THE INITIAL STRESSES OF THE ROCK
MASSIF BY IN-SITU MEASUREMENTS***Abstract:*

Emerged in our country in the early 40's of the last century, first in coal mines, and then in the 70's also in metal mines, the problem of rock bumps or dynamic phenomena remains to this day not finally solved. So, on the Tashtagolsky mine the number of dynamic phenomena reaches up to 1.5 thousand a year, on Sheregeshsky mine, there were more than 70 dynamic phenomena with energy up to 107 J between 1995 and 2005, on Kazsky mine were marked more than 200 phenomena from 1987 to 2007.

At mines of the Urals, for example, at SUBR, the number of rock bumps reaches 3000 per year, sometimes with fatal consequence, and at the iron ore mines of the Urals, in connection with deepening of mining works, their number also increases. Suffice it to say, that during the period from 1990 to 2009 there were 30 rock bumps and 10 technogenic earthquakes at just one Estyuninskaya mine.

The cause of these phenomena lies in insufficient geomechanical substantiation of parameters of preventive measures and, first of all, in absence of calculated forecast of shock hazard, which allows to prevent dynamic phenomena at the stage of designing mining works and construction.

Thus, the calculated geomechanical forecast and determination of the initial stress state at the mines remain very relevant to date.

Key words: stress-strain state, observation station, stability, time-varying stresses, rock mass, physical and mechanical properties.

* Исследования выполнены в рамках Госзадания №075-00412-22 ПП, тема № (FUWE-2022-0003), рег. №1021062010536-3-1.5.1.

Введение

Динамические явления во всем спектре их проявления от стреляния до техногенных землетрясений – это следствие хрупкого мгновенного разрушения правой части массива или бортов тектонического нарушения под действием высоких относительно прочности массива напряжений. Реальный логичный путь к прогнозу динамических явлений – расчет напряженного состояния и сравнение последнего с прочностными параметрами массива по известным критериям хрупкого разрушения.

Массив горных пород подземных рудников как часть земной коры является сложной гетерогенной структурой, находящейся в сложном напряженном состоянии, формирующемся из метастатического давления, тектонических сил, напряжений и гидростатического давления (в зонах развития в породах взаимосвязанной закарстованности). При этом тектонические напряжения необходимо рассматривать как изменяющиеся по амплитуде горизонтальные нагрузки с определенной периодичностью. Реальный подход к оценке напряженного состояния пород – экспериментальные натурные измерения в пространстве рудников и во времени с установлением закономерностей их роста с глубиной и изменения в пространстве [1].

Методы определения изменения НДС массива горных пород

На данный момент методы определения напряженно-деформированного состояния (НДС) делятся на 3 основных вида: геологические, геомеханические и геофизические.

Геомеханические методы обладают относительно высокой точностью определения напряжений, так как основаны на прямых измерениях деформационных процессов в области массива. Но они являются весьма трудозатратными, а их результаты имеют локальный характер. Методы можно разделить на 3 группы [2], представленные в табл. 1.

В основе деформационных методов – определение упругих деформаций и пересчет их в НДС массива.

Таблица 1

Геомеханические методы

Деформационные методы	Компенсационные методы	Методы полной разгрузки керна
Метод частичной разгрузки	Метод гидроразрыва	Метод ВНИМИ
Метод разности давлений	Метод плоских домкратов	Метод Хаста
Метод щелевой разгрузки	Метод компенсационной нагрузки	Метод Лимана
Метод параллельных скважин	Метод буровых скважин	
Метод упругих включений		

Метод частичной разгрузки

Метод основан на измерении деформаций в области массива, разгруженной центральным отверстием.

Этот метод имеет 3 модификации:

- метод разгрузки с наклеиванием тензодатчиков;
- метод разгрузки с использованием съемных тензометров;
- метод разгрузки на большой базе.

Погрешности данных методов зависят от погрешностей измерения исходных величин и упругих характеристик горных пород [3].

Метод щелевой разгрузки

Этот метод является одним из основных для оценки деформаций массива после нарушения его целостности. По сравнению с другими деформационными методами, метод щелевой разгрузки характеризуется меньшей зависимостью от разномодульности горных пород в зоне измерений [1].

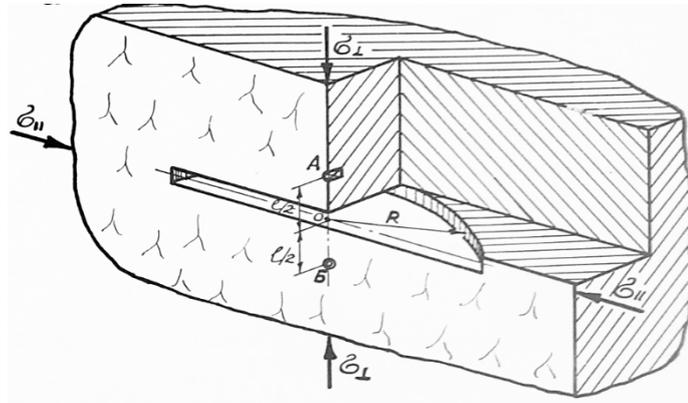


Рис. 1. Схема к измерению напряжений методом щелевой разгрузки

Методика позволяет исключить большинство ураганных значений напряжений, возникающих от влияния локальных одиночных трещин, по сравнению с измерениями деформаций в буровых скважинах; оперативно получить количественные характеристики первоначального поля напряжений в масштабе основных конструктивных элементов систем разработки (рис. 1) [1].

Метод параллельных скважин

Метод основан на измерении радиальных перемещений стенок скважины, пробуренной в массиве, при его возмущении скважиной большого диаметра, которую бурят параллельно первой [4].

Метод упругих включений

Данный метод основан на изменении степени преломления света при воздействии на него определенной нагрузки. Для это применяются фотоупругие датчики, обладающие свойством изменять степень прозрачности в поляризованном свете при воздействии на них нагрузки. При комплексном нагружении в таком датчике можно наблюдать сложную картину, обладающую двумя взаимно перпендикулярными осями симметрии, указывающими на направление главных нормальных напряжений (рис. 2) [7].

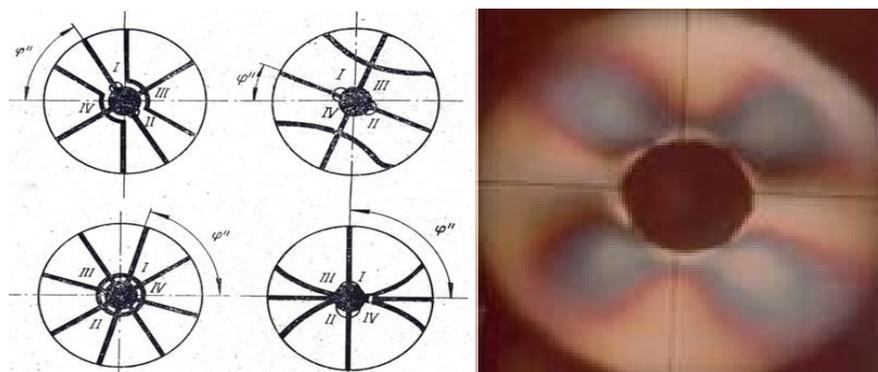


Рис. 2. Схема интерференционных полос в фотоупругом датчике

В случае, когда компоненты таких напряжений равны, в поляризованном свете на картине полос фотоупругого тензометра можно наблюдать ряд concentрических окружностей.

Для определения абсолютных напряжений в массиве данный метод должен использоваться в сочетании с другим методом разгрузки, так как напряжения определяются путем сложения первоначальных напряжений и приращенных напряжений, измеренных с помощью данного метода упругих включений [5].

Внешний диаметр датчика должен быть в 5 – 6 раз больше, чем диаметр центрального отверстия, что делает картину изохром (цветных полос) более наглядной, облегчает определение направления действия главных нормальных напряжений и повышает точность измерения разности хода.

Толщина фотоупругого датчика выбирается исходя из требуемой чувствительности, но должна быть не менее $0,25 R_2$; чрезмерно завышать ее не следует. Так, датчик толщиной 10 мм при измерениях в крепких горных породах имеет чувствительность около 1 кгс/см^2 .

Фотоупругий датчик, имеющий форму диска или цилиндра с центральным отверстием, изготавливают из оптически активного стекла. Наиболее приемлемыми марками стекол для датчиков при измерении напряжений в крепких горных породах являются боросиликатные кроны типа К и крон-флинт КФ 8 (табл. 2).

Таблица 2

Оптическая постоянная C , модуль упругости E и коэффициент Пуассона μ различных марок стекол

Марка стекла	$C \cdot 10^{-7} \text{ см}^2/\text{кгс}$	$E \cdot 10^{-6} \text{ кгс/см}^3$	μ
К 2	3,20	0,72	0,21
К 20	3,10	0,74	0,22
К 14	2,90	0,78	0,20
К 18	2,90	0,77	0,20
КФ 8	2,90	0,72	0,21
К 5	2,70	0,79	0,21
К 17	2,70	0,81	0,21
К 8	2,65	0,82	0,21

Внешний диаметр датчика должен быть в 5 – 6 раз больше, чем диаметр центрального отверстия, что делает картину изохром более наглядной, облегчает определение направления действия главных нормальных напряжений и повышает точность измерения разности хода.

Толщина фотоупругого датчика выбирается исходя из требуемой чувствительности, но должна быть не менее $0,25 R_2$; чрезмерно завышать их не следует. Так, датчик толщиной 10 мм при измерениях в крепких горных породах имеет чувствительность около 1 кгс/см^2 .

Повышение чувствительности датчика приводит к увеличению числа полос изохром на единицу длины (особенно у отверстия). Так как разрешающая способность полярископа ограничена, то толщина датчика определяется возможностью различать полосы у отверстия. Обычно для исследования напряженного состояния в крепких поро-

дах при решении большинства горнотехнических задач достаточно иметь датчики толщиной 10 – 20 мм. При решении специальных задач, когда требуется определять напряжения с большей точностью (при малых их значениях), толщина датчика должна быть больше 20 мм (рис. 3). При применении полярископа отражающего типа заднюю сторону датчика покрывают отражающим слоем, защищенным от коррозии слоями краски и клея на основе эпоксидной смолы (рис. 3, б).

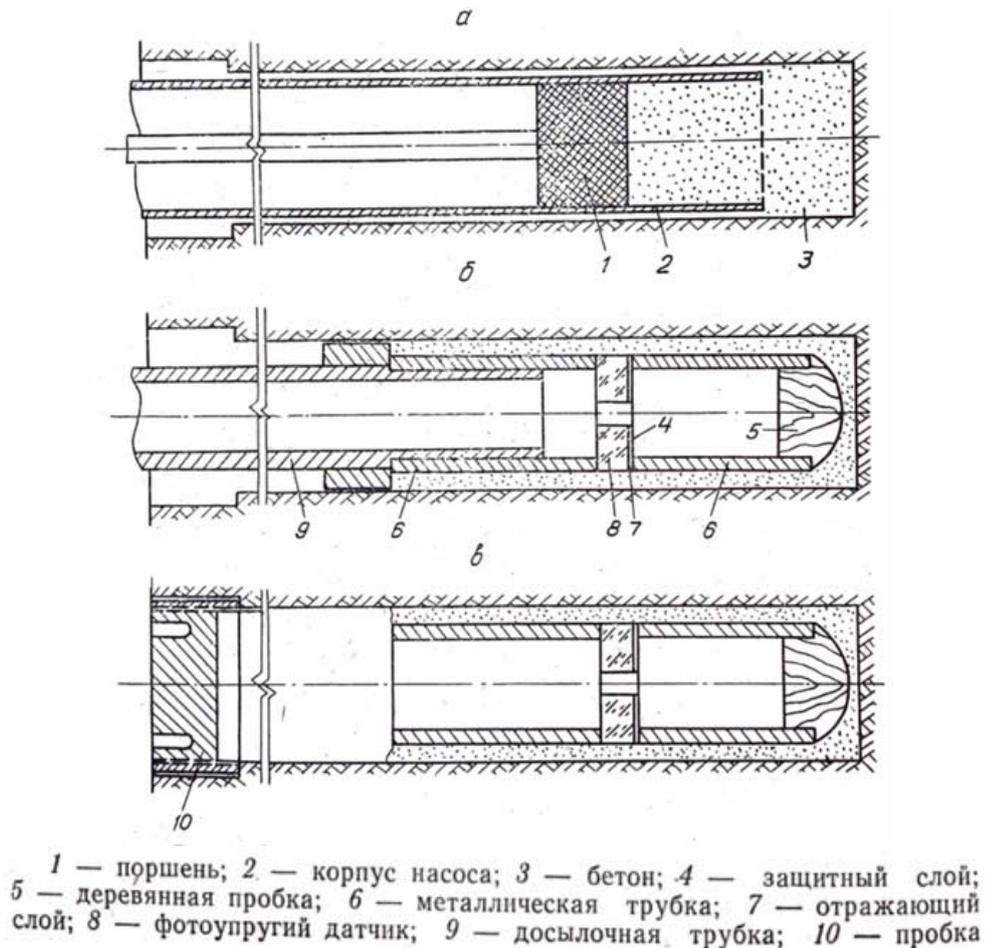


Рис. 3. Схема установки фотоупругих датчиков в скважине:
а – досылка бетона; б – досылка датчика; в – положение датчика в скважине

Перед установкой датчика в шпур или скважину к его передней и задней стенкам приклеивают стальные трубки (см. рис. 3, б). Заднюю трубку закрывают деревянной пробкой. Стальные трубки выполняют две функции: предохраняют датчик от попадания на его свободные части цементного раствора, обеспечивают равномерность деформации скважины на всем участке установки датчика, приближая фактические условия его работы теоретическим, принятым при вводе формул. Трубки должны иметь жесткость, равную жесткости датчика, что достигается за счет толщины стенок трубок.

Трубки к датчику можно приклеить с помощью любого клея, необходимо лишь обеспечить достаточную прочность на период их досылки в шпур. Длина каждой трубки должна быть не менее $4R_3$ (R_3 – радиус скважины).

Подготовленный датчик устанавливают в скважине с помощью цементирующего материала. Основным критерием при выборе этого материала являются его упругие свойства и способность сцепления с породой и датчиком. Для установки датчиков из стекла в настоящее время применяется цементно-песчаная смесь (бетон) из цемента марки 500 – 600 и песка с размером зерен до 1 мм в соотношении 1:1. Такой раствор

хорошо сцепляется как с породой, так и со стеклом. Применение обычного бетона при цементировании датчиков возможно в случаях, когда ожидается увеличение сжимающих напряжений или уменьшение растягивающих, т.е. в случае сжатия скважины и датчика. При расширении скважины (уменьшение сжатия или увеличение растяжения в массиве) в случае применения обычного бетона даже при небольшой деформации в пределах первых десятков кгс/см² возможен разрыв связи «порода – бетон – датчик». В этом случае датчик не будет фиксировать приращения напряжений.

Компенсационные методы, метод гидроразрыва

Методы основаны на восстановлении первоначальных напряжений в массиве горных пород и дальнейшего увеличения давления до образования в массиве трещин разрыва [6].

Метод плоских домкратов

Метод является развитием метода щелевой разгрузки. Его преимущество в том, что он менее чувствителен к локальным неоднородностям массива, так как их влияние на модуль деформации нивелируется более совершенной технологией [3].

Метод компенсационной нагрузки

Суть метода заключается в восстановлении напряжений на участке исследования массива горных пород. Он объединяет в себе все компенсационные методы [8].

Методы торцевых измерений

В основе методов взяты характеристики упругого восстановления формы элемента массива при отделении его от основного массива. Но учитывают следующие допущения: массив рассматривается упругий, сплошной и изотропный.

Для метода ВНИМИ бурятся не менее трех достаточно глубоких, разнонаправленных скважин. Данная технология позволяет определить направление главных напряжений, их величину вне зоны влияния выработок и в нетронутом массиве.

В методе Н. Хаста также бурят не менее трех разнонаправленных скважин диаметром не менее 110 мм, но в дополнение бурится опережающая соосная скважина малого диаметра около 40 мм. В ней устанавливают деформометры и фиксируют изменение диаметра центральной скважины по различным направлениям.

Метод Е. Лимана схож с методом Н. Хаста. Так же бурят опережающую соосную скважину малого диаметра, но на ее стенки с помощью специального оборудования наклеивают тензодатчики. Чтобы пересчитать полученные данные в относительные деформации, дополнительно необходимо определить коэффициент Пуассона, модуль Юнга и модуль сдвига [2].

Методы почти не применяются, так как для расчетов требуются дополнительные лабораторные исследования физико-механических свойств пород, а проведение натурных исследований – очень трудоемкий, сложный процесс.

Геофизические методы

Существует пять основных групп геофизических методов определения НДС, основанных на изменчивости естественных и искусственных физических полей в массиве с действующими в нем напряжениями. Это ультразвуковой, радиометрический, электрометрический, магнитный, сейсмоакустический группы методов [9]. Эти методы эффективны при исследовании на больших площадях и помогают определить направление и соотношения действующих сил в массиве. Но для того чтобы определить абсолютные значения напряжений, требуется дополнительное изучение исследуемого массива. Поэтому геофизические методы самостоятельно практически не применяются [9].

Результаты определения первоначальных напряжений массива горных пород натурными измерениями на глубоких горизонтах рудника

В результате анализа ранее выполненных работ по исследованию земной коры выявлены знакопеременные подвижки, локализующиеся, как правило, в зонах крупных тектонических нарушений. Продолжительность этих подвижек невелика и не превышает 2 – 3 месяцев [12 – 14].

Рассмотрим условия определения природных напряжений на подземных рудниках Урала, где их измеряли методом щелевой разгрузки на различных горизонтах. Для того чтобы рассчитать напряжения в массиве в интересующий нас момент времени, нужно знать величину первоначальных напряжений σ_i^0 . Величины первоначальных гравитационно-тектонических напряжений без учета переменных во времени напряжений представлены в табл. 3.

Таблица 3

Величины первоначальных напряжений, действующих в массиве пород месторождения

Год проведения измерений	Глубина, H , м	Субмеридиональное, σ_1 , МПа	Субширотное, σ_2 , МПа	Вертикальное, σ_3 , МПа	Переменные во времени напряжения, $\sigma_{\Delta\phi}$, МПа
1998	-830	-19	-40	-22	-7
2004	-910	-20	-42	-25	-4
2008	-1075	-32	-49	-33	-9
2022	-1150	-37	-55	-33	-13
2020	-1230	-41	-59	-34	-15
2021	-1310	-48	-63	-35	-16
2019	-1390	-55	-67	-37	-17

По результатам измерения напряжений на различных рудниках Урала и Сибири суммарные тектонические и пульсирующие напряжения достигают нескольких десятков МПа. При анализе мировых данных переменная составляющая достигает порядка 10 МПа, что также говорит о значительной величине тектонической составляющей. Для отдельных конструкций при расчете напряженного состояния был задан режим учета собственного веса. Такой подход широко апробирован на практике и представлен в работах [14 – 17].

Таким образом, по результатам измерений природных напряжений, зная глубину залегания выработок, в которых происходили измерения, коэффициент Пуассона и объемный вес горных пород, можно определять гравитационные, тектонические и переменные во времени составляющие первоначальных напряжений.

Выводы

1. Одним из факторов, наиболее влияющих на проявления горного давления в динамических формах, является действие в массиве горных пород значительных гравитационно-тектонических и переменных во времени напряжений.

2. В соответствии с гипотезой формирования напряжений в массиве горных пород на месторождении величины напряжений в любое время в соответствии с графиком представлены на рис. 4.

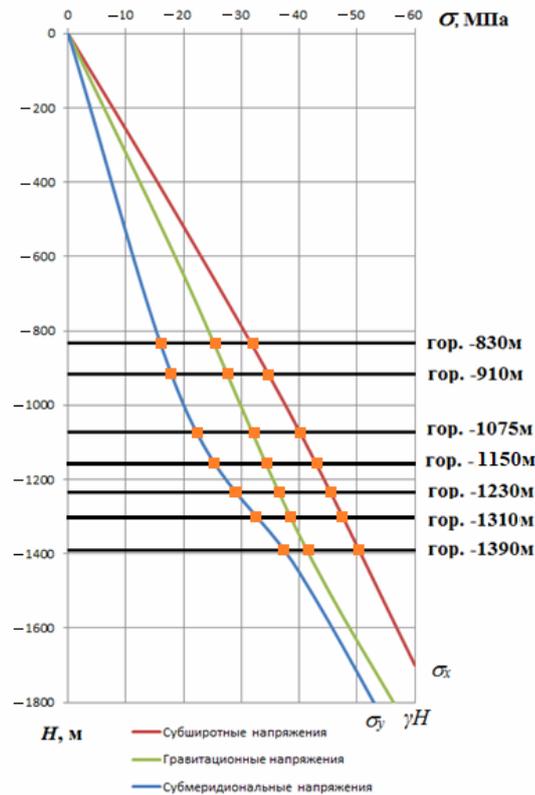


Рис. 4. График изменения гравитационно-тектонических напряжений с глубиной без учета переменных во времени напряжений

Заключение

Комплексный анализ полученных результатов позволил выявить следующие закономерности распределения напряжений в массиве горных пород месторождения.

С увеличением глубины разработки отмечается рост напряженности шахтного поля. По отношению к весу налегающих пород, изменяющемуся с глубиной по линейному закону, горизонтальные и вертикальные напряжения определяются следующими соотношениями:

$\sigma_1 / \gamma H = 0,84;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -830 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 0,81;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,68;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -910 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,09;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,67;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,13;$ (на глубине -1070 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,19;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,06;$ (на глубине -1150 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,21;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,72;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,01;$ (на глубине -1230 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,35;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,78;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,01;$ (на глубине -1310 м);
$\sigma_1 / \gamma H = 1,48;$	$\sigma_2 / \gamma H = 1,81;$	$\sigma_z / \gamma H = 1,0;$ (на глубине -1390 м).

Список литературы

1. Зубков А.В., 2001. *Геомеханика и геотехнология*. Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 333 с.
2. Шкуратник В.Л., Николенко П.В., 2012. *Методы определения напряженно-деформированного состояния массива горных пород: научно-образовательный курс*. Москва: МГГУ, 112 с.
3. Зотеев О.В., 2003. *Геомеханика: учебное пособие для студентов ВУЗов*. Екатеринбург: УГГУ, ИГД УРО РАН, 252 с.
4. Барышников В.Д., Курленя М.В., Гахова Л.Н., 1998. Опыт применения метода параллельных скважин для оценки действующих напряжений в бетонном массиве. *Гидротехническое строительство*, № 9, С. 59.

5. Катков Т.А., 1978. *Исследование горного давления с применением фотоупругих элементов: монография*. Москва: Наука, 130 с.
6. Курленя М.В., Леонтьев А.В., Попов С.Н., 1994. Развитие метода гидроразрыва для исследования напряженного состояния массива горных пород. *ФТПРПИ*, № 1, С. 3 – 20.
7. Криницын Р.В., 2020. Геодеформационный полигон и геомеханические исследования на шахте Магнетитовая. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 105 – 115.
8. Гребёнкин С.С., Павлыш В.Н., Самойлов В.Л., Петренко Ю.А., 2010. *Управление состоянием массива горных пород*. Донецк: «ВИК», 193 с.
9. Харисов Т.Ф., Мельник В.В., Харисова О.Д., Замятин А.Л., 2020. Геофизические исследования массива горных пород в условиях подземного рудника. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 255 – 263. DOI: 10.25018/02361493-2020-31-0-255-263.
10. Зубков А.В., Феклистов Ю.Г., Липин Я.И., 2016. Деформационные методы определения напряженного состояния пород на объектах недропользования. *Проблемы недропользования*, № 4, С. 41 – 49. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.041>
11. Сентябов С.В., 2022. Выбор методов управления горным давлением при освоении глубокозалегающих месторождений. *Проблемы недропользования*. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
12. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 720. p. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
13. Сентябов С.В., 2020. Геомеханические аспекты формирования природных напряжений в бетонной крепи шахтных стволов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3 – 1, С. 211 – 220. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207
14. Сентябов С.В., 2019. Иерархическая блочность массива при решении геомеханических задач на примере Гайского ГОКа. *SEYMARTEC MINING: сборник докладов материалов пятого международного форума "Эффективность и безопасность горнодобывающей промышленности - 2019"*, (22 – 23 октября 2019). Сеймартек. Челябинск, С. 18.
15. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, pp. 406 – 417.
16. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 55 – 63.
17. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206. pp. 1 – 4 (012011) (accessed: <http://library.sibsiu.ru>).

References

1. Zubkov A.V., 2001. *Geomehanika i geotehnologiya [Geomechanics and geotechnology]*. Ekaterinburg: IGD UrO RAN, 333 p.
2. Shkuratnik V.L., Nikolenko P.V., 2012. *Metody opredeleniya napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya massiva gornyh porod: nauchno-obrazovatel'nyj kurs . [Methods for determining the stress-strain state of a rock mass: a scientific and educational course]*. Moscow: MGGU, 112 p.
3. Zoteev O.V., 2003. *Geomehanika: uchebnoe posobie dlya studentov VUZov [Geomechanics: a textbook for height school students]*. Ekaterinburg: UGGU, IGD URO RAN, 252 p.

4. Baryshnikov V.D., Kurlenya M.V., Gahova L.N., 1998. Opyt primeneniya metoda parallel'nyh skvazhin dlya ocenki deistvuyushchikh napryazhenij v betonnom massive [Experience of using of the parallel wells method to assess the operating stresses in a concrete array]. *Gidrotehnicheskoe stroitel'stvo*, № 9, P. 59.
5. Katkov T.A., 1978. Issledovanie gornogo davleniya s primeneniem fotouprugih jelementov: monografiya [Investigation of rock pressure with the use of photoelastic elements: monograph]. Moscow: Nauka, 130 p.
6. Kurlenya M.V., Leont'ev A.V., Popov S.N., 1994. Razvitie metoda gidrorazryva dlya issledovaniya napryazhennogo sostoyaniya massiva gornyh porod [Development of a hydraulic fracturing method for studying the stress state of a rock mass]. *FTPRPI*, № 1, P.3 - 20.
7. Krinicyн R.V., 2020. Geodeformacionnyj poligon i geomechanicheskie issledovaniya na shahte Magnezitovaya [Geodeformation polygon and geomechanical studies at the Magnesitovaya mine]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 105 - 115.
8. Grebjonkin S.S., Pavlysh V.N., Samojlov V.L., Petrenko .A., 2010. Upravlenie sostoyaniem massiva gornyh porod [Management of the state of the rock mass]. Doneck: «VIK», 193 p.
9. Harisov T.F., Mel'nik V.V., Harisova O.D., Zamyatin A.L., 2020. Geofizicheskie issledovaniya massiva gornyh porod v usloviyah podzemnogo rudnika [Geophysical studies of the rock mass in the conditions of an underground mine]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 255 – 263. DOI: 10.25018/02361493-2020-31-0-255-263.
10. Zubkov A.V., Feklistov Yu.G., Lipin Ya.I., 2016. Deformacionnye metody opredeleniya napryazhennogo sostoyaniya porod na ob#ektah nedropol'zovaniya [Deformation methods for determining the stress state of rocks at subsurface use objects]. *Problemy nedropol'zovaniya*, № 4, P. 41 – 49. DOI: <https://doi.org/10.18454/2313-1586.2016.04.041>
11. Sentyabov S.V., 2022. Vybor metodov upravleniya gornym davleniem pri osvoenii glubokozalegashhih mestorozhdenij [Choice of methods for managing rock pressure during the development of deep-lying deposits]. *Problemy nedropol'zovaniya*. DOI:10.25635/2313-1586.2022.01.007
12. Sentyabov S.V., 2021. The Influence of Time-Varying Stresses in the Rock Mass on the Stress State of Mine Workings. *IOP of Conferences Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 720. p. 012013. DOI: 10.1088/1755-1315/720/1/012013
13. Sentyabov S.V., 2020. Geomechanicheskie aspekty formirovaniya prirodnyh napryazhenij v betonnoj krep'i shahtnyh stvolov [Geomechanical aspects of the formation of natural stresses in the concrete support of mine shafts]. *Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten'*, № 3 – 1, P. 211 – 220. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-199-207
14. Sentyabov S.V., 2019. Ierarhicheskaya blochnost' massiva pri reshenii geomechanicheskikh zadach na primere Gajskogo GOKa [Hierarchical blockiness of the array in solving geomechanical problems on the example of the Gaisky GOK]. *SEYMARTEC MINING: sbornik dokladov materialov pyatogo mezhdunarodnogo foruma "Jeffektivnost' i bezopasnost' gornodobyvashhej promyshlennosti - 2019"*, (22 – 23 oktyabrya 2019). Sejmartek. Chelyabinsk, P. 18.
15. Yang Z.-S., Peng F.-L., Qiao Y.-K., Hu Y.-Y., 2019. A new cryogenic sealing process for the launch and reception of a tunnel shield. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, pp. 406 – 417.
16. Hu X., Fang T., Chen J., Ren H., Guo W., 2018. A large-scale physical model test on frozen status in freeze-sealing pipe roof method for tunnel construction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, pp. 55 – 63.
17. Rib S.V., 2018. The influence of rock interlayer location on the stress-strain state of the rock massif near the underground mine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Vol. 206. pp. 1 – 4 (012011) (accessed: <http://library.sibsui.ru>).