

УДК 624.121:004.94

Д. А. ДИУЛИН<sup>1</sup>, М. Г. КУЗНЕЦОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Трест Шахтоспецстрой», Солигорск, Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет транспорта, Гомель, Беларусь

## **ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТВОЛОВ ШАХТ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

В работе приведены результаты предварительной оценки несущей способности вертикальных стволов шахт Солигорского месторождения калийной соли. С использованием модуля Static Structural инженерного программного комплекса ANSYS выполнено компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния ряда шахтных стволов на основе рассчитанных аналитическим способом значений давлений от горных пород, окружающих выработку.

**Ключевые слова:** вертикальный ствол шахты, компьютерное моделирование, напряженно-деформированное состояние, оценка несущей способности.

Обеспечение стабильности стволов шахт является ключевой проблемой их эксплуатации и в значительной степени зависит от механических свойств породного массива. Оценка несущей способности крепи вертикальных шахтных стволов на основе определения напряжений, возникающих в конструкции ствола шахты, и сравнении их с допускаемыми значениями является одной из основных задач анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции. В соответствии с [1–3] аналитический расчет НДС системы «крепь – породный массив» допускает анализ в рамках решения плоской контактной задачи. Одна из основных задач этого анализа заключается в оценке несущей способности крепи ствола, основанной на расчете нормальных напряжений в ходе решения классической задачи о НДС упругого кругового кольца [4–6].

Цель представленной работы заключается в предварительной оценке НДС вертикальных стволов шахт Солигорского месторождения калийной соли на основе компьютерного моделирования нагружения поперечных сечений стволов шахт на различной глубине от поверхности земли.

Исходные данные для моделирования определены в соответствии с геологическим составом горных пород на рудниках Солигорского месторождения, информация о котором приведена в [7], и сведены в таблицу 1.

Параметры нагружения участков стволов вертикальных шахт определены по формулам бокового давления на шахтный ствол при пересечении вертикальной выработкой различных по своим физико-механическим свойствам пород [8]:

$$q_n = \gamma_{cp} H \operatorname{tg}^2 \left( \frac{90^\circ - \varphi_{cp}}{2} \right), \quad (1)$$

где  $H$  – глубина шахты, м;  $\gamma_{cp}$  – средневзвешенное значение объемного веса пород,  $\text{Н/м}^3$ ;  $\varphi_{cp}$  – средневзвешенное значение угла внутреннего трения, градус.

Таблица 1 – Геологический состав горных пород на рудниках Солигорского месторождения

В процентах

Горные породы	Ствол 2 рудник 1РУ	Ствол 1 рудник 3РУ	Ствол 1 рудник 4РУ
Глины	14,317	12,666	42,325
Доломиты	9,492	6,545	5,523
Мергели	34,859	35,411	3,283
Пески	16,759	14,579	15,538
Соль каменная	17,336	20,265	27,249
Мел	3,231	4,206	1,893
Другие горные породы	4,006	6,328	4,189

При этом считается, что боковое давление изменяется линейно, увеличиваясь с увеличением глубины выработки (рисунок 1). Результаты расчетов приведены в [9] и сведены в таблицу 2.

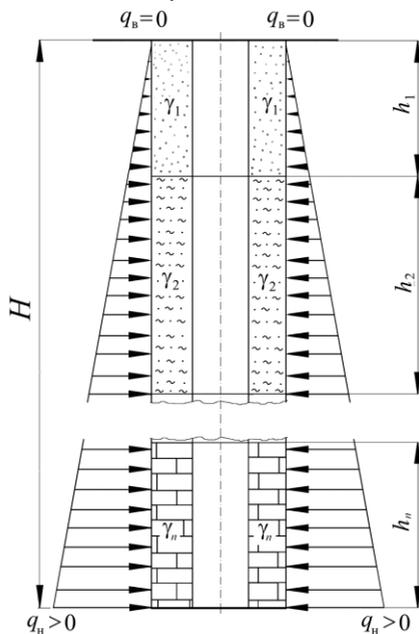


Рисунок 1 – Расчетная схема к формуле (1)

Таблица 2 – Результаты расчетов бокового давления на крепь стволов шахт Солигорского месторождения

Расчетный параметр	$H$ , м	$\gamma_{ср}$ , кН/м <sup>3</sup>	$\varphi_{ср}$ , Град	$q_{н}$ , МН/м <sup>2</sup>
Ствол 2 рудник 1РУ	503,0	18,919	26,062	3,707
Ствол 1 рудник 3РУ	623,8	20,727	26,726	4,909
Ствол 1 рудник 4РУ	834,7	17,965	26,966	5,640

Анализ НДС крепи шахт выполнен с использованием подпакета Static Structural инженерного пакета ANSYS Workbench и включал следующие этапы: 1) подготовка геометрической модели; геометрические размеры поперечных сечений вертикальных стволов шахт рудников 1РУ, 3РУ и 4РУ; 2) подготовка расчетной модели путем задания свойств материалов конструктивных элементов поперечного сечения ствола шахты, а также задания граничных условий и параметров внешнего давления со стороны горных пород, окружающих выработку; формирования сетки конечных элементов и задания списка выходных параметров (напряжения, деформации и т. п.); 3) проведение вычислительного эксперимента; 4) обработка, интерпретация результатов моделирования.

На первом этапе проанализирована информация, приведенная в [10]. Вертикальные стволы шахт Солигорского месторождения имеют на различной глубине поперечные сечения, отличающиеся по внешнему  $R_{внешн}$  и внутреннему  $R_{внутр}$  радиусам, толщине бетонной  $t_b$  и чугунной  $t_{ч}$  крепи, а также по характеристикам элементов, составляющих кольцевое сечение ствола шахты (таблицы 3–5). Так, стволы № 1 рудника 3РУ и № 1 рудника 4РУ имеют участки с бетоном марки М200–М400 и усиленным чугунным тюбингом типа К в поперечном сечении, тогда как ствол № 2 рудника 1РУ в нижней части имеет усиление в виде кирпичной кладки толщиной в один кирпич, а на других участках состоит из бетона марки 150 и чугунного тюбинга типа Ш. При этом толщина тюбинга и бетонной крепи на разных высотах разная. Поэтому принято решение анализировать НДС крепи на глубинах, соответствующих локациям, находящимся непосредственно перед изменением параметров поперечного сечения.

На этапе 2 приняты следующие характеристики материалов крепи [11, 12]:

1) ствол №2 рудник 1РУ:  $\rho_{бетонМ150} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{чугунШ} = 7000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{кирпич} = 1600$  кг/м<sup>3</sup>;  $E_{бетонМ150} = 19$  МПа;  $E_{чугунШ} = 11,6 \cdot 10^4$  МПа;  $E_{кирпич} = 3,52$  МПа;  $\mu_{бетон150} = 0,2$ ;  $\mu_{чугунШ} = 0,22$ ;  $\mu_{кирпич} = 0,25$ ;

2) ствол № 1 рудник 3РУ:  $\rho_{бетонМ200} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{чугунК} = 7600$  кг/м<sup>3</sup>;  $E_{бетонМ200} = 23,5$  МПа;  $E_{чугунК} = 83,4 \cdot 10^4$  МПа;  $\mu_{бетон200} = 0,2$ ;  $\mu_{чугунК} = 0,25$ ;

3) ствол № 1 рудник 4РУ:  $\rho_{бетонМ300} = 2000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{чугунК} = 7600$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{бетонМ400} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>;  $E_{бетонМ300} = 30$  МПа;  $E_{чугунК} = 83,4 \cdot 10^4$  МПа;  $E_{бетонМ400} = 33,1$  МПа;  $\mu_{бетон300} = 0,2$ ;  $\mu_{чугунК} = 0,25$ ;  $\mu_{бетонМ400} = 0,2$ .

Таблица 3 – Ствол № 2 рудник 1РУ (H = 503 м)

Бетонная крепь						Чугунный тубинг (тип Ш)		
H, м		R <sub>внешн</sub> , М	R <sub>внутр</sub> , М	t <sub>б</sub> , мм	Марка бетона	R <sub>внешн</sub> , М	R <sub>внутр</sub> , М	t <sub>ч</sub> , мм
от	до							
0	3,385	4,230	3,500	730	150	–	–	–
3,385	47,460	4,270	3,540	730	150	3,540	3,500	40
47,46	75,00	4,160	3,540	620	150	3,540	3,500	40
75,00	162,70	4,170	3,550	620	150	3,550	3,500	50
162,70	166,00	3,950	3,550	390	150	3,550	3,500	50
166,00	167,70	3,950	3,560	390	150	3,560	3,500	60
167,700	172,70	3,940	3,560	380	150	3,560	3,500	60
172,700	268,00	3,870	3,560	310	150	3,560	3,500	60
268,00	296,00	3,860	3,560	300	150	3,560	3,500	60
296,00	414,00	3,870	3,570	300	150	3,570	3,500	70
414,00	494,70	4,060	3,500	560	150	–	–	–
		Строительный кирпич марки 150 и 300 толщиной в один кирпич						
494,70	503,00	4,110	3,550	560	150	3,550	3,500	50
		Строительный кирпич марки 150 и 300 толщиной в один кирпич						

Таблица 4 – Ствол № 1 рудник 3РУ (H = 623,8 м)

Бетонная крепь						Чугунный тубинг усиленный (тип К)		
H, м		R <sub>внешн</sub> , М	R <sub>внутр</sub> , М	t <sub>б</sub> , мм	Марка бетона	R <sub>внешн</sub> , М	R <sub>внутр</sub> , М	t <sub>ч</sub> , мм
от	до							
0	12,60	4,070	3,550	520	200	–	–	–
12,60	38,90	4,050	3,530	520	200	3,530	3,500	30
38,90	116,52	4,060	3,540	520	200	3,540	3,500	40
116,52	193,02	4,070	3,550	520	200	3,550	3,500	50
193,02	220,00	3,910	3,550	360	200	3,550	3,500	50
220,00	322,54	3,920	3,560	360	200	3,560	3,500	60
322,54	615,57	4,000	3,550	450	200	–	–	–
615,57	623,8	3,810	3,610	200	200	3,610	3,550	60

Таблица 5 – Ствол № 1 рудник 4РУ ( $H = 834,7$  м)

Бетонная крепь						Чугунный тубинг усиленный (тип К)		
Глубина, м		$R_{\text{внешн}}, \text{ м}$	$R_{\text{внутр}}, \text{ м}$	$t_b, \text{ мм}$	Марка бетона	$R_{\text{внешн}}, \text{ м}$	$R_{\text{внутр}}, \text{ м}$	$t_t, \text{ мм}$
от	до							
0	7,20	4,300	3,500	800	300	–	–	–
7,20	14,30	4,480	3,530	950	400	3,530	3,500	30
14,30	174,00	4,480	3,530	950	400	3,530	3,500	30
174,00	179,50	4,500	3,550	950	400	3,550	3,500	50
179,50	192,50	4,490	3,540	950	400	3,540	3,500	40
192,50	199,00	4,500	3,550	950	400	3,550	3,500	50
199,00	224,00	4,140	3,540	600	400	3,540	3,500	40
224,00	265,60	4,160	3,560	600	400	3,560	3,500	60
265,60	297,50	4,060	3,560	500	400	3,560	3,500	60
297,50	824,00	4,100	3,500	600	300–400	–	–	–
824,00	834,70	4,160	3,560	600	400	3,560	3,500	60

Расчетная схема приведена на рисунке 2 и представляет собой геометрическую модель поперечного сечения ствола шахты (составного кольца), к которой приложена равномерно распределенная по наружной границе нагрузка, соответствующая давлению от горных пород на рассматриваемой глубине от поверхности земли. Результаты расчетов НДС стволов шахт Солигорского месторождения для некоторых сечений, расположенных на различной глубине, приведены на рисунках 3–5.

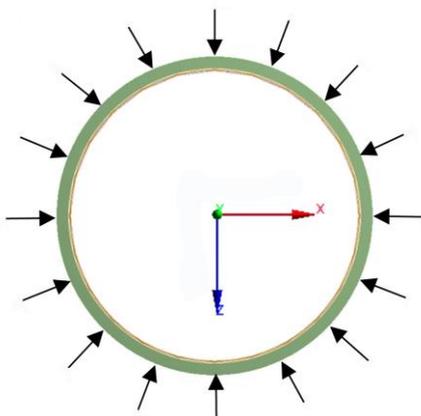


Рисунок 2 – Расчетная схема в ANSYS Workbench

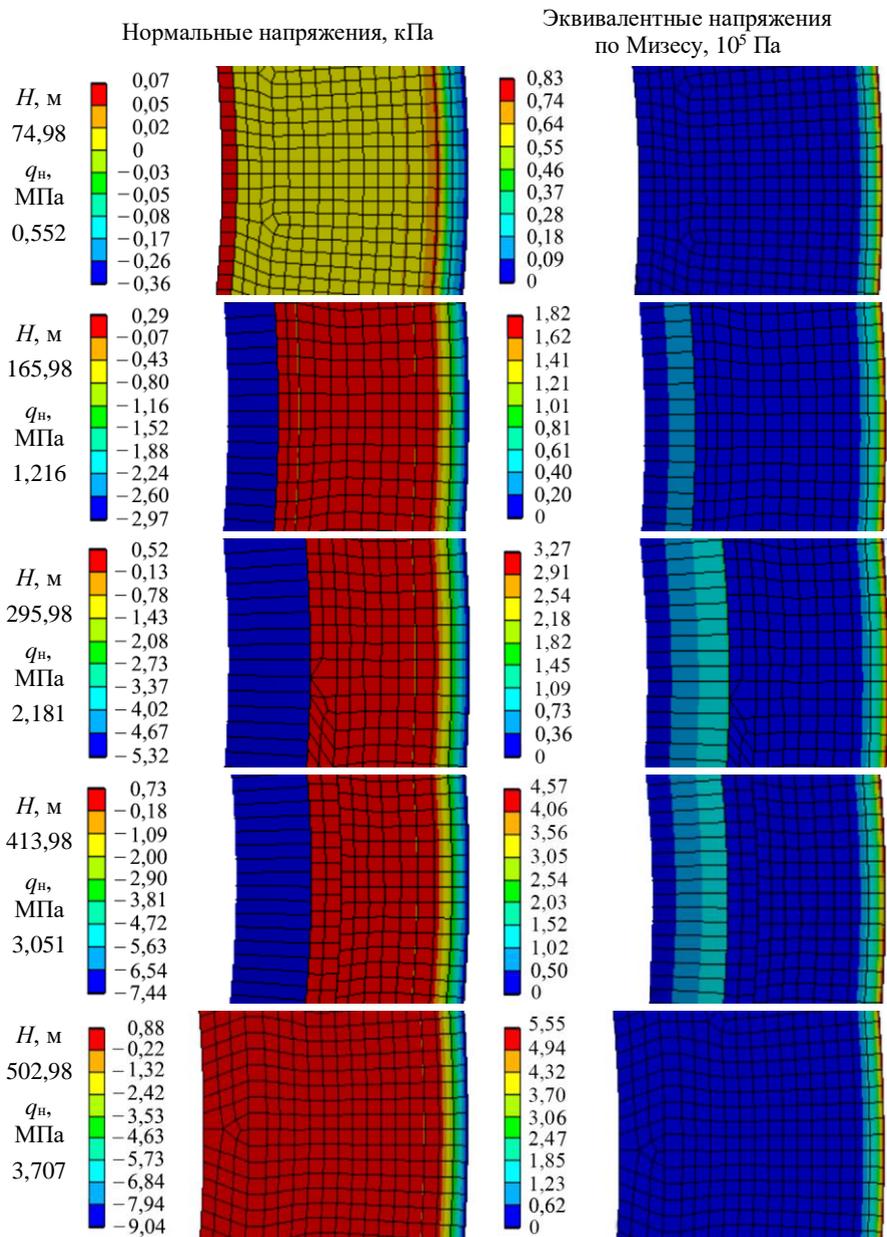


Рисунок 3 – Результаты расчета НДС ствола № 2 рудника 1РУ в некоторых сечениях

Нормальные сжимающие напряжения в стволе № 2 рудника 1РУ достигают 9 кПа и максимальны на внешней границе кольца на всех глубинах (рисунок 3). На участках, находящихся на глубине 166–494,7 м значения нормальных напряжений приближаются к максимальным для данных участков также и на внутренней границе кольца. Максимальные напряжения по Мизесу в стволе № 2 рудника 1РУ составляют 0,555 МПа и возникают на самых заглубленных участках, поскольку именно там давление от горных пород, окружающих выработку, максимально в соответствии с аналитическим расчетом. Однако на этом участке бетонный ствол укреплен и чугунным тубингом, и кирпичной кладкой. В долговременной перспективе больше опасений должен вызывать участок на глубине 414,00–494,70 м, поскольку начальные напряжения в нем незначительно (на 0,7 %) ниже максимальных, но этот участок ствола не укреплен чугунным тубингом, для которого допускаемые напряжения выше. При этом на 5–8 участках (таблица 3) ствола имеют место области резкого изменения как нормальных, так и эквивалентных по Мизесу напряжений.

В стволе № 1 рудника 3РУ максимальные значения нормальных и эквивалентных по Мизесу напряжений возникают на последнем участке ствола и составляют соответственно 46,5 кПа и 1,46 МПа (рисунок 4). При этом на последних четырех участках ствола (таблица 4) в кольцевом сечении имеются области с большим градиентом эквивалентных по Мизесу напряжений.

Максимальных значений нормальные и эквивалентные по Мизесу напряжения в стволе № 1 рудника 4РУ (рисунок 5) достигают на предпоследнем его участке (таблица 5) и составляют соответственно 53,5 кПа и 1,65 МПа. На последнем участке напряжения ниже на 11,84 и 11,87 % соответственно, что объясняется наличием чугунного кольца внутри бетонной оболочки.

Таким образом, выявлено, что значения напряжений в бетонной, чугунной и кирпичной частях вертикальных стволов шахт Солигорского месторождения не превышают допускаемых значений. Полученные результаты демонстрируют НДС крепи стволов шахт в начале эксплуатации, однако не учитывают время их использования. Также значения давлений на крепь стволов, полученные аналитическим путем, не всегда соответствуют линейному закону в зависимости от слоя и глубины его залегания [9]. На основе двумерного моделирования можно получить представление о распределении напряжений в толще ствола, однако при этом сложно получить полную картину напряжений в других направлениях, а также учесть такие свойства отдельных грунтов, как обводненность, пористость, предварительное напряженное состояние и т. п. Поэтому уточненное определение НДС требуется выполнять на основе пространственных моделей с учетом временного фактора.

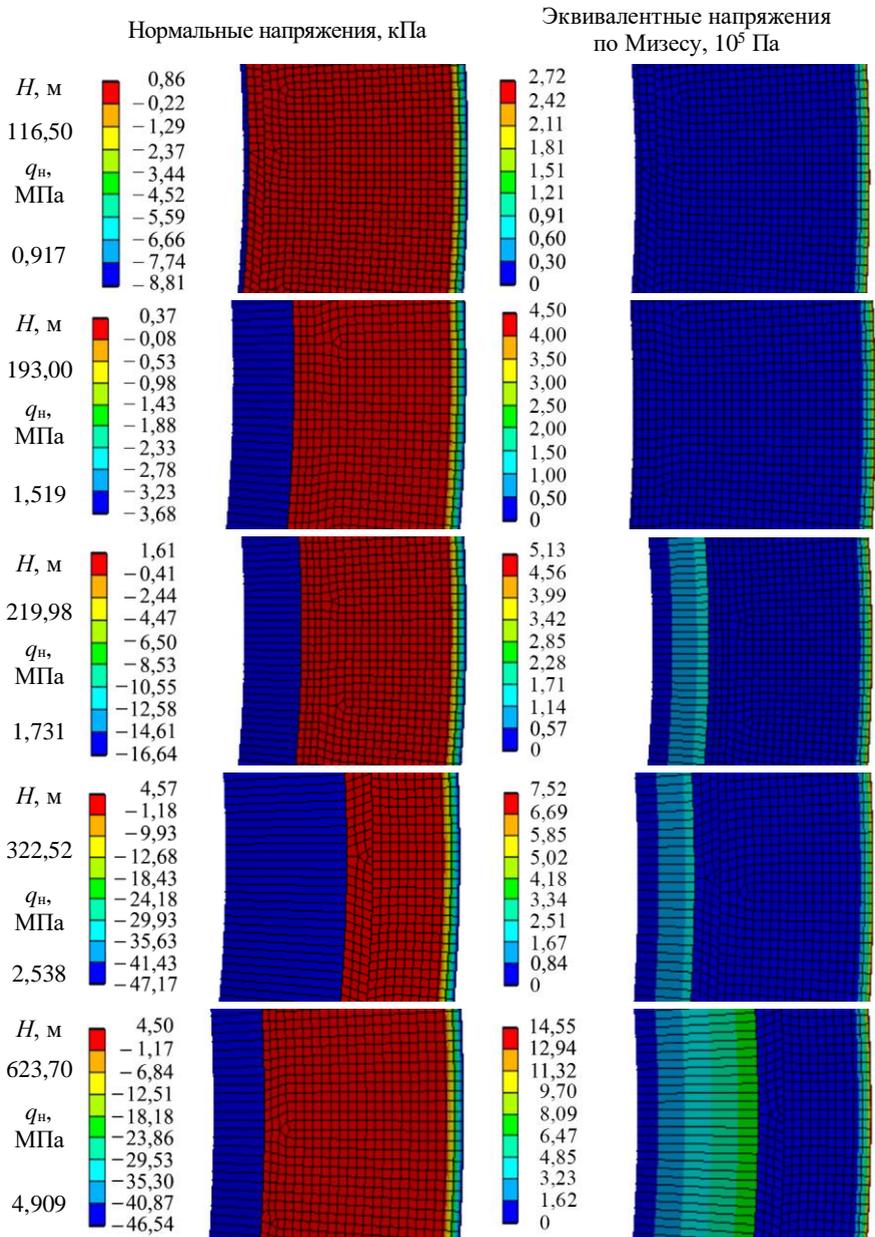


Рисунок 4 – Результаты расчета НДС ствола № 1 рудника ЗРУ

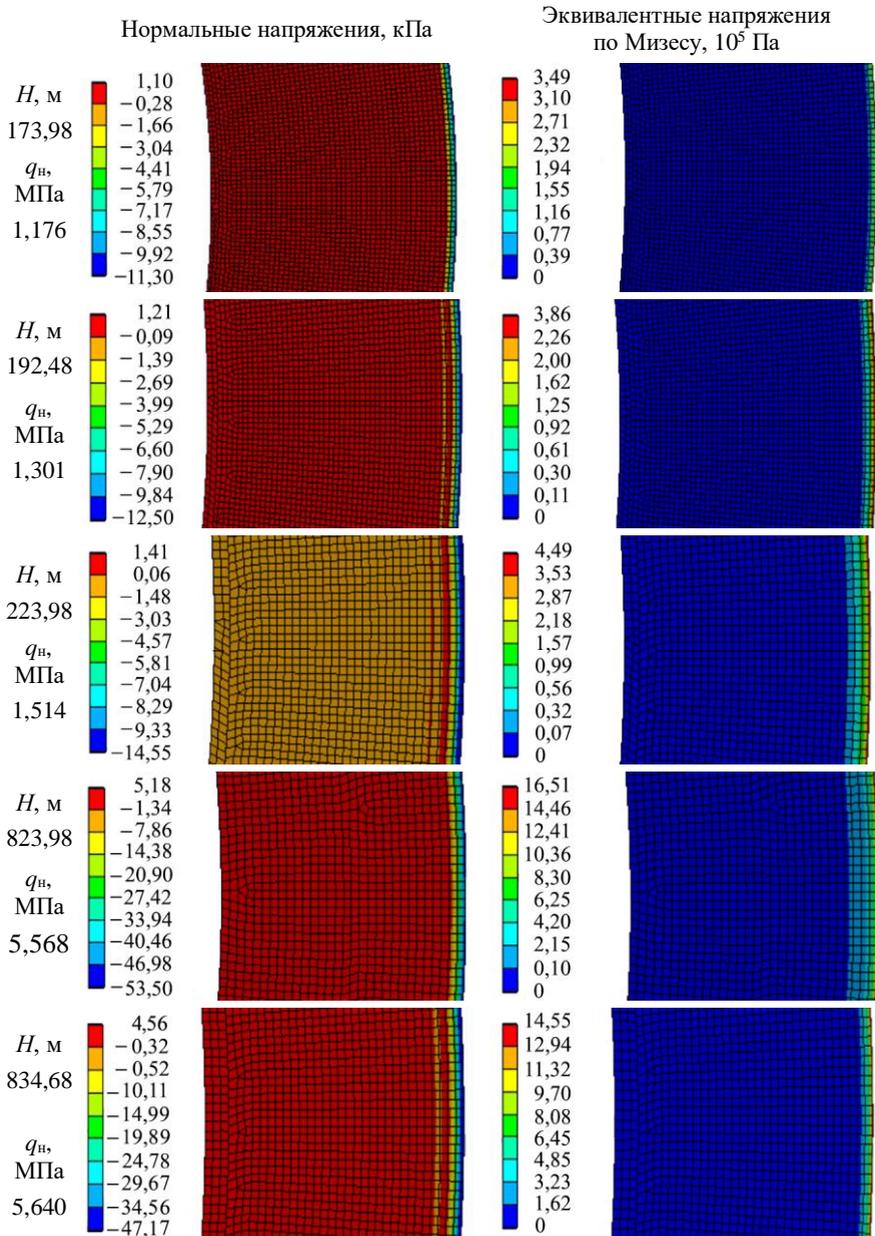


Рисунок 5 – Результаты расчета НДС ствола № 1 рудника 4РУ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Булычев, Н. С. Механика подземных сооружений : учеб. для вузов / Н. С. Булычев. – М. : Недра, 1994. – 382 с.

2 Руководство по проектированию подземных горных выработок и расчету крепи. – М. : Стройиздат, 1983. – 272 с.

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

4 Jendryś, M. Analysis of stress state in mine shaft lining, taking into account superficial defects / M. Jendryś // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. – Vol. 261. – Paper 012016. – 10 p.

5 Large-scale geo-mechanical model tests for stability assessment of super-large cross-section tunnel / L. Li [et al.] // Tunnelling and Underground Space Technology. – 2021. – Vol. 109. – Paper 103756. – 11 p.

6 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.

7 Выполнить анализ результатов проведенных обследований крепи стволов, оценить необходимость и объемы геофизических работ на деформированных участках : отчет о НИР / ОАО «Белгорхимпром» ; рук. А. М. Ефимов ; исп.: Т. П. Кафанова [и др.] ; ГР № 20092386. – Минск, 2009. – 42 с.

8 Кологривко, А. А. Проведение и крепление подземных горных выработок / А. А. Кологривко. – Минск : БГПА, 2001. – 38 с.

9 Диулин, Д. А. Оценка напряженно-деформированного состояния крепи вертикальных шахтных стволов Старобинского месторождения калийных солей / Д. А. Диулин // Горная механика и машиностроение. – 2021. – № 4. – С. 22–28.

10 Провести исследования, оценить состояние тубинговой и бетонной крепи стволов на рудниках РУП «ПО «Беларуськалий», выявить деформированные участки, на которых выполнить изыскательские работы и выдать исходные данные для разработки проекта на ремонт крепи : отчет о НИР (промежуточ.) / ЗАО «СИПР с ОП», ЧУП «Институт горного дела» ; рук. Д. Т. Карабань ; исп.: В. А. Губанов [и др.] ; ГР № 20091617. – Солигорск, 2010. – 28 с. (этап 2.1.1); 46 с. (этап 2.2.1); 28 с. (этап 2.3.1).

11 Байер, В. Е. Строительные материалы : учебник / В. Е. Байер. – М. : Архитектура-С, 2004. – 240 с.

12 Строительные материалы и изделия : учеб. пособие / В. С. Руднов [и др.]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 203 с.

*D. A. DZIULIN<sup>1</sup>, M. G. KUZNIATSOVA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>JSC “Trest Shahtospetsstroy”, Soligorsk, Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University of Transport, Gomel, Belarus

## PRELIMINARY LOADING CAPACITY ESTIMATION FOR VERTICAL MINE SHAFTS BASED ON COMPUTER MODELING

The paper presents investigations on the initial estimation of the loading capacity of vertical shafts of the Soligorsk potash salt mines. Using the Static Structural module of the ANSYS engineering software package, a computer simulation of the stress-strain state of a number of mine shaft based on analytically calculated pressures from rocks surrounding the mine.

**Keywords:** vertical shaft of a mine, computer simulation, stress-strain state, assessment of bearing capacity.

Получено 22.09.2021