

УДК 622.831.312:622.833.52

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ БЖБТ НА НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРОД ВОКРУГ ПОДГОТОВИТЕЛЬНОЙ ВЫРАБОТКИ

**Коробко О. Н.**, студент гр. РПМз-15,  
**Самойлов В. Л.**, канд. техн. наук, проф.,  
**Мальшева Н. Н.**, асс., науч. рук.,  
**Нефёдов В. Е.**, асс.

(ГОУВПО «ДОННТУ», г. Донецк, ДНР)

[Malysheva\\_Natala@mail.ru](mailto:Malysheva_Natala@mail.ru)

*Выполнен анализ влияния ремонта подготовительных выработок на себестоимость угля. Проанализированы варианты составления модели и обработки результатов при численном моделировании напряженно-деформированного состояния пород вокруг подготовительной выработки. С помощью численного моделирования с использованием программы Ansys установлены влияние параметров (глубины разработки, сечения выработки в проходке, количество рядов тумб БЖБТ и расстояния от выработки до места их возведения) на напряженное состояние пород вокруг подготовительной выработки. С помощью статистической обработки результатов моделирования с использованием программы Statistica получены зависимости, позволяющие определять напряженное состояние пород вокруг подготовительной выработки в зависимости от указанных выше параметров.*

**Ключевые слова:** горная выработка, охранное сооружение, напряженное состояние, Ansys, Statistica.

Эффективность работы угольных определяется себестоимостью угля, в которой до 80 % составляют затраты на ремонт, из них 70 % приходится на ремонт выработок, из которых 90 % – на выработки, испытывающие вредное влияние очистных работ [1].

Одним из наиболее прогрессивных способов бесцеликовой охраны выработок является их поддержание позади очистных забоев при помощи искусственных ограждений. Эффективность этого способа зависит от параметров искусственного ограждения. Основным направлением, совершенствования искусственных ограждений для большинства горно-геологических условий явля-

ется повышение их жесткости. Этому требованию отвечают БЖБТ, возводимые за очистным забоем вдоль выработки.

В этой связи, изучение влияния на напряженное состояние параметров установки БЖБТ является **актуальной научной задачей**.

Поскольку компьютерное моделирование является одним из эффективных методов изучения сложных систем в тех случаях, когда реальные эксперименты затруднены из-за финансовых или физических препятствий или могут дать непредсказуемый результат, был выбран метод численного моделирования с помощью Ansys [2]. Ansys – универсальная программная система конечно-элементного (МКЭ) анализа [3].

Анализ источников [4–13], посвященных численному моделированию с целью изучения влияния на напряженное состояние пород вокруг подготовительной выработки параметров охранных сооружений, позволил сделать следующие выводы:

1. как правило, участок массива пород определяется конкретными горно-геологическими условиями [4–7, 9–13];

2. в большинстве случаев для охраны выработки используется одно конкретное сооружение [6, 8–10, 12–13];

3. обычно, если целью является определение влияния параметров охранных сооружений на напряженно-деформированное состояние пород вокруг подготовительной выработки, в качестве параметров выступают: ширина охранных сооружений [5, 6, 8–10], его жесткость [5, 8, 10, 13], расстояние от выработки до места его возведения [5, 6, 10];

4. однако, не смотря на то, что исходными данными для расчета являются упругие свойства вмещающих пород [6] и охранных сооружений [4, 5, 11], они редко указываются в источниках;

5. кроме того, при моделировании всегда используется один из двух приемов: закладка выработанного пространства обрушенными и уплотненными породами [6–9, 13] или обрезка консоли [4, 5, 7, 10–12], которые уменьшают напряжения в массиве и искусственно повышают устойчивость выработки;

6. помимо этого только в половине случаев указывается, в какой постановке рассматривается задача (упругой [9], упруго-пластической [4, 11–13]), хотя она сильно влияет на результаты;

7. в большинстве источников используется плоская модель [4, 5, 7, 8, 10, 11, 13], однако использование объемной модели [12] никак не отражается на анализе результатов, т.е. напряженно-деформированное состояние массива определяется только по передней грани модели;

8. как известно задачу можно решить двумя способами. Первый способ – подобрать упругие свойства вмещающих пород и охранного сооружения таким образом, чтобы смещения пород в выработку соответствовали измеренным на шахте смещениям, тогда полученные смещения можно использовать в качестве критерия оценки устойчивости выработки. Второй – сохранить свойства, отказаться от смещений и в качестве критерия использовать размеры областей, в которых напряжения превысили допустимый уровень. Не смотря на то, что в большинстве случаев применяется второй способ [4, 7, 8, 10–13], его не всегда сводят к размерам зоны неупругих деформаций [7, 10–13], а останавливаются на поиске значения максимума растягивающих (сжимающих) напряжений и его положения в массиве [4, 8].

Приведенный анализ позволит избежать неточностей, допущенных при составлении модели и обработке результатов.

В данной работе была решена нелинейная стационарная пространственная задача механики деформируемого твёрдого тела. Для решения поставленной задачи была создана модель, которая представляла собой участок массива горных пород размерами 60м×38м×10м, горно-геологические условия которого (мощности слоёв пород  $m$ , м, их прочность на сжатие  $\sigma_{сж}$ , МПа и растяжение  $\sigma_p$ , МПа, угол внутреннего трения  $\varphi$ , °, модуль упругости  $E \cdot 10^3$ , МПа, коэффициент Пуассона  $\mu$ , сцепление  $C$ , МПа, удельный вес  $\gamma$ , т/м<sup>3</sup> [14,15]) соответствовали условиям ш. им. Калинина (таблица 1). Внутри массива была расположена выемочная выработка, примыкающая к выработанному пространству лавы. В выработанном пространстве лавы для охраны выработки возводили тумбы БЖБТ и двойную органную крепь [16–20] (таблица 2, рисунок 1). Модель была разбита объёмными элементами без промежуточных узлов на гранях Solid45. Затем – закреплена от перемещений по нижней и боковым граням. Вес пород и охранных сооружений внутри модели учитывался с помощью объёмной нагрузки в виде

поля гравитационных сил, вес оставшихся до поверхности пород – с помощью равномерно распределённой нагрузки, прикладываемой на верхнюю грань модели.

Таблица 1

## Упругие свойства вмещающих пород

№	Наименование породы	$m$ , м	$\sigma_{сж}$ , МПа	$\sigma_p$ , МПа	$E \cdot 10^3$ , МПа	$\mu$	$\gamma$ г/м <sup>3</sup>	$C$ , МПа	$\varphi$ , °
1	Песчаник	12,86	125	37,55	3,12	0,141	2,56	34,25	32,55
2	Песчано-глинистый сланец	0,7	69,5	15	2,78	0,235	2,63	16,14	40,16
3	Уголь	1,31	9,5	0,95	0,42	0,08	1,36	9,9	28
4	Глинистый сланец	0,54	15	7,35	1,03	0,277	2,66	5,25	20
5	Глинистый сланец	1,34	54	8,92	2,512	0,163	2,66	10,97	45,76
6	Глинистый сланец	4,29	64,5	9,69	2,911	0,133	2,66	12,5	47,63
7	Глинистый сланец	5,52	64,1	9,75	2,896	0,134	2,66	12,5	47,39
8	Песчано-глинистый сланец	3,75	57,6	15	2,447	0,253	2,65	14,7	35,93
9	Песчаник	6,17	90,2	21,89	2,354	0,183	2,69	22,22	37,55
10	Песчаник	1,92	101,3	21,7	2,636	0,167	2,62	23,44	40,33

Таблица 2

## Упругие свойства охранных сооружений

№	Наименование охранного сооружения	$E$ , МПа	$\mu$	$\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>
1	БЖБТ			
2	1 ряд БЖБТ	2994,677	0,3	518,33
3	1,5 ряда БЖБТ	2228,720	0,3	388,75
4	2 ряда БЖБТ	2926,097	0,3	518,33
5	2,5 ряда БЖБТ	2454,080	0,3	431,94
6	3 ряда БЖБТ	2902,115	0,3	518,33
7	Органная крепь	1262,5	0,3	250,16

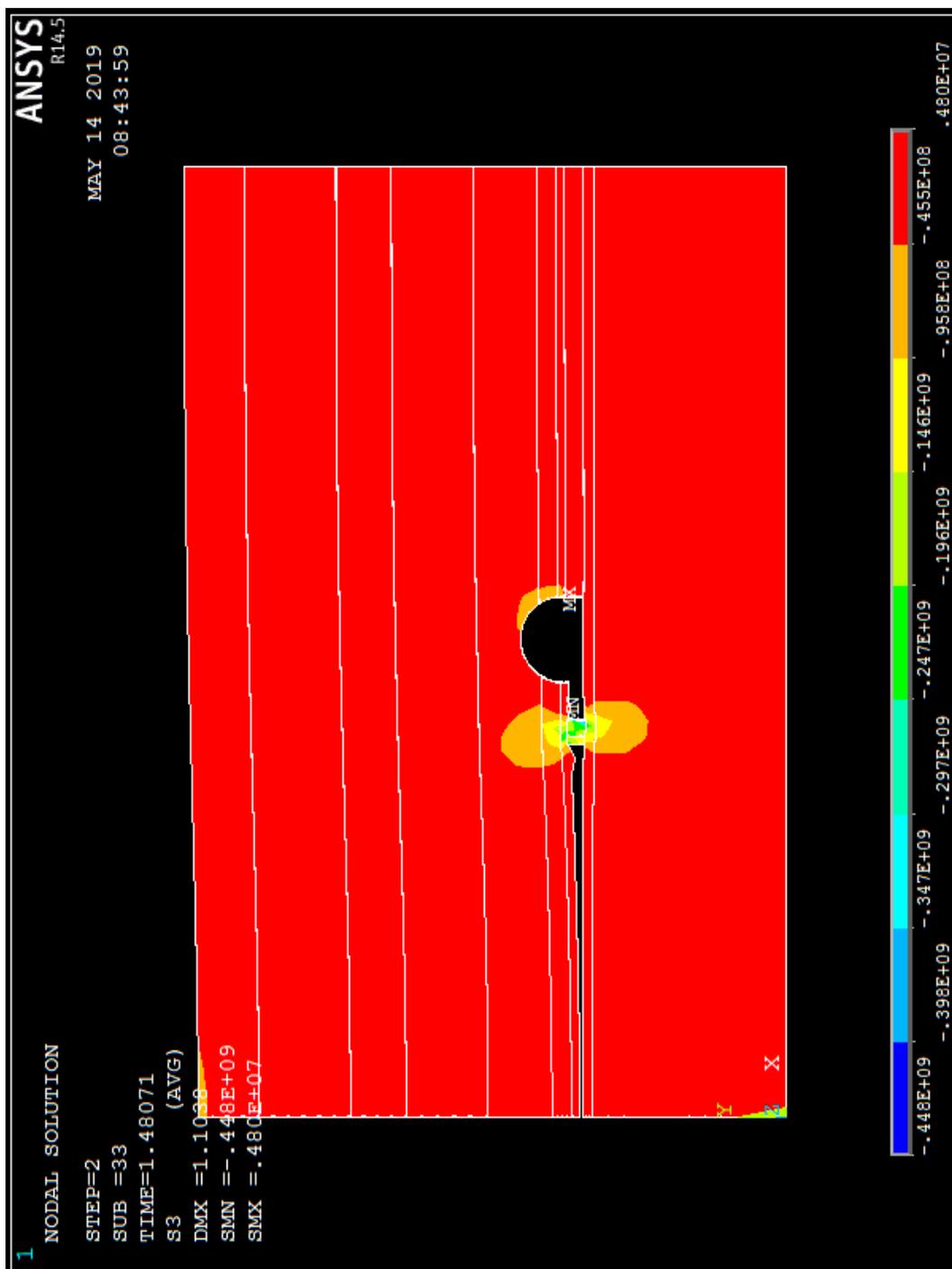


Рис. 1. Сжимающие напряжения  $\sigma_{сжс}$ , Па:  $n_{ряд} = 1,5$  ряда;  $l = 2,25$  м;  $H = 522$  м;  $S_{np} = 20,4$  м<sup>2</sup>

Варьируемыми параметрами в модели были:

1. количество рядов тумб БЖБТ

$n_{ряд} = 1$  ряд; 1,5 ряда; 2 ряда; 2,5 ряда; 3 ряда;

2. расстояние от выработки до места возведения тумб

$l = 0$  м; 0,75 м; 1,5 м; 2,25 м; 3 м:

кроме того

3. глубина разработки  $H = 21 \div 770$  м (для получения необходимого количества точек, а не с целью разработки угля в наносах);

4. сечение выработки в проходке

$S_{пр} = 12,7$  м<sup>2</sup>; 15,1 м<sup>2</sup>; 18,3 м<sup>2</sup>; 20,4 м<sup>2</sup>; 23,67 м<sup>2</sup>.

В качестве отклика моделируемой физической системы на изменения её параметров были выбраны главные максимальные напряжения, возникшие в результате сжатия ( $\sigma_{сж}^{max}$ ) и растяжения ( $\sigma_p^{max}$ ) и их положение в модели. Кроме того были определены элементы, в которых главные напряжения превысили предел прочности на сжатие ( $\sigma_{сж}$ ), на растяжение ( $\sigma_p$ ). Используя теорию прочности Мора  $\sigma_{пр} \leq [\sigma]$  [21], где  $\sigma_{пр}$  – предел прочности на сжатие(растяжение),  $[\sigma]$  – максимальные напряжения от сжатия(растяжения), было сделано предположение о том, что в данных элементах модель претерпевает разрушение. Был вычислен объем разрушенных элементов  $V, м^3$ . Чем больше объем разрушенных элементов  $V, м^3$ , тем больше перемещения пород на контуре выработки и тем больше давление на ее крепь, тем больше деформация крепи и больше затраты на поддержание выработки.

Благодаря планированию эксперимента по методу латинского куба количество экспериментов удалось сократить с  $4^5=1024$  до 10 [22, 23].

Для того чтобы сократить количество формул, которое необходимо создать для описания напряжённого состояния пород вокруг подготовительной выработки, был использован критерий. Согласно ему те изменения считаются значительными, которые превысили барьер в 20 % от рассматриваемой величины. Значительные изменения произошли в пласте и породах кровли.

Для того, чтобы определить вид зависимостей объёма разрушенных элементов  $V_{сж}$ , м<sup>3</sup> максимального сжимающего напряжения  $\sigma_{сж}^{max}$ , Па в пласте и породах кровли от варьируемых параметров  $H$ ,  $S_{np}$ ,  $n_{ряд}$ ,  $l$ , а также степень влияния каждого из них на зависимую переменную, был использован множественный регрессионный нелинейный анализ [24–28].

Для обработки полученных результатов был использован программный пакет для статистического анализа Statistica [29].

В результате анализа был получен порядок расположения независимых переменных по степени их влияния на зависимую переменную (таблица 3 и 4). В таблицах представлены значения только значимых параметров, т.е. те у которых доля объяснённой дисперсии превысила 5 % барьер ( $R_{adj}^2 > 5\%$ ).

Как видно из таблиц 3 и 4, только глубина разработки  $H$ , м оказывает значительное влияние на напряжённое состояние пород вокруг подготовительной выработки.

Таблица 3

Доли объяснённой дисперсии  $R_{adj}^2$ , % для пласта

Зависимая переменная	$l$ , м	$n_{ряд}$ , шт.	$S_{np}$ , м <sup>2</sup>	$H$ , м
$V_{сж}$ , м <sup>3</sup>	–	–	–	0,94
$\sigma_{сж}^{max}$ , Па	–	–	–	0,98

Таблица 4

Доли объяснённой дисперсии  $R_{adj}^2$ , % для кровли

Зависимая переменная	$l$ , м	$n_{ряд}$ , шт.	$S_{np}$ , м <sup>2</sup>	$H$ , м
$V_{сж}$ , м <sup>3</sup>	–	–	–	0,98
$\sigma_{сж}^{max}$ , Па	–	–	–	0,96

Полученный вид зависимостей был основан на мультипликативной модели временных рядов, каждый множитель которой представлял собой параболическую зависимость. В зависимости вошли только значимые параметры (таблица 5).

Таблица 5

## Формулы для расчёта

Зависимая переменная	пласт	кровля
$V_{сж}, \text{ м}^3$	$0,0007 \cdot H^2 + 0,5 \cdot H - 38,84$	$0,0003 \cdot H^2 - 0,0321 \cdot H - 0,2083$
$\sigma_{сж}^{max}, \text{ Па}$	$54 \cdot H^2 - 111601 \cdot H + 2581991$	$62 \cdot H^2 - 137762 \cdot H + 3045771$

**Выводы:**

1. Существенные изменения (те, что превысили барьер в 20 % от рассматриваемой величины) в напряженном состоянии при изменении параметров модели с БЖБТ были выявлены только в пласте и непосредственной кровле.

2. В данных горно-геологических условиях даже 3 ряда БЖБТ не оказывают существенного влияния на изменение напряжённого состояния пород вокруг подготовительной выработки.

3. Главным влияющим фактором является глубина разработки.

4. Были получены формулы для расчета объёма разрушенных элементов  $V_{сж}, \text{ м}^3$  и максимального сжимающего напряжения  $\sigma_{сж}^{max}, \text{ Па}$  в пласте и породах кровли. Доля объясненной дисперсии полученных зависимостей находилась в пределах  $R_{adj}^2 = 94 - 98 \%$ .

**Библиографический список**

1. Касьяненко, А. Л. Обеспечение устойчивости пород почвы выемочных выработок при наличии в их текстуре прочных слоев. [Текст]: дис. канд. техн. наук: 25.00.22: защищена 26.11.2017 / Касьяненко Андрей Леонидович. – Донецк, 2017. – 238 с.

2. Каплун, А. Б. Ansys в руках инженера: Практическое руководство [Текст] / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов, М. А. Олферьева. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.

3. Образование: [Электронный ресурс]: Метод конечных элементов (русские субтитры). – Режим доступа:

<https://www.youtube.com/watch?v=Rhja2Es0ceA>. – Загл. с экрана.

4. Баймухаметов, С. К. Расчет ползучести горных пород вокруг выработки, поддерживаемой за лавой [Текст] / С. К. Баймухаметов, Е. П. Брагин, Ю. А. Векслер, И. Ф. Шалимов // Академия наук СССР. Ордена Ленина Сибирское отделение. Институт горного дела. Аналитические и численные исследования в механике горных пород. Сборник научных трудов. Ответственный редактор д.ф.–м.н. В. С. Никифоровский.– Новосибирск, 1986. – С. 45–49.

5. Виноградов, В. В. Математическое моделирование поведения вмещающих пород в окрестностях выемочных штреков [Текст] / В. В. Виноградов, А. В. Мухин // Уголь Украины. – 1996. – №5–6. – С. 12–14.

6. Выборнова, С. Н. Влияние параметров способа охраны на состояние пород вокруг выемочных выработок [Текст] / С. Н. Выборнова // В сб. «Научные основы управления состоянием горного массива» (научные сообщения, вып. 235). М., ИГД им. А. А. Скочинского, 1985. – С. 104–109.

7. Горовой, Е. П. Анализ напряженно–деформированного состояния пород вокруг подготовительной выработки, поддерживаемой за очистным забоем [Текст] / Е. П. Горовой, С. Н. Александров, В. П. Сажнев // Проблемы горного давления / Сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – №11. – С. 118–127.

8. Демин, В. Ф. Исследование напряженно–деформированного состояния горных пород в приконтурной зоне выемочных выработок [Текст] / В. Ф. Демин, В. В. Яворский, С. К. Тутанов, С. Н. Попов, В. С. Попов // Известия вузов (горный журнал). – 2004. – №6. – С. 58–63.

9. Зюков, Ю. Е. Напряженно–деформированное состояние предохранительных целиков в лавах [Текст] / Ю. Е. Зюков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2007. – Вып. 73. – С. 171–175.

10. Либерман, Ю. М. Исследование напряженного состояния пород вокруг выемочных выработок методом конечных элементов [Текст] / Ю. М. Либерман, С. Н. Выборнова, А. С. Диманштейн // В сб. «Совершенствование технологии добычи угля подземным способом» (научные сообщения, вып. 213). – М., ИГД им. А. А. Скочинского, 1982. – С. 72–78.

11. Сахно, И. Г. Влияние жесткости охранного сооружения на напряженно–деформированное состояние породного массива вокруг выработок, поддерживаемых за лавой [Текст] / И. Г. Сахно // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 115. – С. 176–187.

12. Сахно, И. Г. Управление напряженно–деформированным состоянием массива горных пород вокруг выработок, поддерживаемых за лавой [Текст] / И. Г. Сахно, Н. Н. Касьян // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 112. – С. 152–162.

13. Слащев, И. Н. Прогноз устойчивости систем комбинированного поддержания подготовительных выработок в сложных горно-геологических условиях глубоких шахт [Текст] / И. Н. Слащев // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: Державний вищий навчальний заклад «Національний гірничий університет», 2010. – №35(1). – С. 67–77.

14. Басинский, Ю. М. Охрана капитальных выработок от влияния очистных работ [Текст] / Ю. М. Басинский, В. Ф. Водянов, В. М. Кулешов и др. – К.: Техника, 1983. – 140с.

15. Черняк, И. Л. Исследования физико-механических свойств горных пород глубоких шахт Донбасса [Текст] / И. Л. Черняк, Р. И. Григорьев, Р. А. Фрумкин, В. А. Дорыкин, Зань Фьен Нгуен // Технология добычи угля подземным способом. – 1967. – № 7. – С. 35–39.

16. Продажа плитных материалов Kronospan МДФ ДСП MDF ЛМДФ ЛДСП OSB ОСП ОСБ Кроношпан: [Электронный ресурс]: Технические характеристики плит МДФ MDF, ДСП, ЛДСП, ХДФ HDF, OSB ОСП KronospanRussiaКроношпан Россия. – Режим доступа: [http://dsp-mdf.ru/index.php?show\\_aux\\_page=7](http://dsp-mdf.ru/index.php?show_aux_page=7). – Загл. с экрана.

17. Обработка дерева и металла: [Электронный ресурс]: Остаточные деформации, модули упругости и коэффициенты Пуассона. Категория: Производство древесных пластиков. – Режим доступа: <http://pereosnastka.ru/articles/ostatochnye-deformatsii-moduli-uprugosti-i-koeffitsienty-puassona>. – Загл. с экрана.

18. Mastera Betona: [Электронный ресурс]: Модуль упругости бетона: виды, классификация. От чего зависит. – Режим доступа: <http://masterabetona.ru/betonirovaniye/52-modul-uprugosti-betona>. – Загл. с экрана.

19. Телешев, В. И. Производство гидротехнических работ: Часть 1. Общие вопросы строительства. Земляные и бетонные работы. Учебник для вузов [Текст] / В. И. Телешев, Н. И. Ватин, А. Н. Марчук. – М.: Издательство АСВ, 2012. – 488 с.

20. Википедия: [Электронный ресурс]: Коэффициент Пуассона – Википедия. – Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82\\_%D0%9F%D1%83%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%9F%D1%83%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%BE%D0%BD%D0%B0). – Загл. с экрана.

21. Изучаем сопротивление материалов: [Электронный ресурс]: Теория прочности Мора. – Режим доступа: <http://sopromat.in.ua/handbook/teoriya-prochnosti-mora>. – Загл. с экрана.

22. Протодыяконов, М. М. Методика рационального планирования экспериментов [Текст] / М. М. Протодыяконов, Р. И. Тедер. – М.: Наука, 1970. – 76 с.

23. Георгий Александров Идеальный совершенный магический квадрат четного порядка: [Электронный ресурс]: Хостинг от uCoz. – Режим до-

ступа: [http://renuar911.narod.ru/ideal\\_sov.html](http://renuar911.narod.ru/ideal_sov.html). – Загл. с экрана.

24. Жуковская, В. М. Факторный анализ в социально-экономических исследованиях [Текст] / В. М. Жуковская, И. Б. Мучник. – М.: «Статистика», 1976. – 154 с.

25. Ханк, Д. Э. Бизнес-прогнозирование [Текст] / Д. Э. Ханк, Д. У. Уичерн, А. Дж. Райтс; 7-е изд.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 656 с.: ил. – Парал. тит. англ.

26. Электронный учебник по статистике: [Электронный ресурс]: Анализ временных рядов. – Режим доступа:

<http://www.statsoft.ru/home/textbook/modules/sttimser.html>. – Загл. с экрана.

27. Решение задач по статистике: [Электронный ресурс]: Коэффициент корреляции. Средняя ошибка аппроксимации. – Режим доступа: <http://univer-nn.ru/ekonometrika/koefficient-korrelyacii-srednyaya-oshibka-aproksimacii-koefficient-elasticnosti/>. – Загл. с экрана.

28. Рефераты / Экономико-математическое моделирование: [Электронный ресурс]: Прогноз годовой прибыли: <http://www.refsr.ru/referat-5439-4.html>. – Загл. с экрана.

29. Халафян, А. А. Statistica 6. Статистический анализ данных [Текст] / А. А. Халафян; 3-е изд. Учебник. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2007. – 512с.: ил.

**Korobko O. N., Samoylov V. L., Malysheva N. N., Nefedov V. E.**

(SEI HPE «Donetsk national technical university», Donetsk, DPR)

## **INFLUENCE OF PARAMETERS OF PILLAR BEHIND THE LONGWALL FACE ON THE STRESSED STATE OF BREEDS AROUND THE ROADWAY**

*The analysis of the impact of the roadway repair on the cost of coal. The variants of model compilation and processing of results in the numerical modeling of the stress-strain state of rocks around the roadway are analyzed. Using the numerical simulation using the Ansys program, the influence of parameters (mining depth, cross-section of roadway in penetration, number of rows of pillar behind the longwall face stands and distance from roadway to the place of their construction) on the stressed state of rocks around the roadway is established. With the help of statistical processing of simulation results using the Statistica program, dependencies were obtained, which allow determining the stress state of rocks around the roadway depending on the above parameters.*

**Keywords:** roadway, pillar behind the longwall face, stress state, Ansys, Statistica.