

УДК 622.016.52

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КАМЕР

*К.Т. Тажибаев, Г.О. Казакбаева, А.К. Жамангапова, Б.Ж. Жумабаев*

Приведены результаты исследования характера распределения напряжений вокруг горизонтальных камер с учетом изменения их высоты при действии внешних (гравитационных) вертикальных сил поляризационно-оптическим и математическим методами моделирования. Представлены изолинии главных нормальных и касательных напряжений вокруг горизонтальных камер различной высоты. Установлены особенности характера распределения напряжений вокруг камеры при действии вертикальной гравитационной нагрузки и увеличении ее высоты, свидетельствующие о том, что при высокой камере главные нормальные растягивающие напряжения над кровлей уменьшаются по сравнению с напряжениями низкой камеры.

*Ключевые слова:* главные напряжения; эпюры напряжений; плоская модель; камера; растягивающие и сжимающие напряжения; нагрузка.

---

## ГОРИЗОНТАЛДЫК КАМЕРАЛАРДЫН ТЕГЕРЕГИНДЕГИ ЧЫҢАЛУУНУН ТАРАЛУУ МЫЙЗАМЧЕНЕМДҮҮЛҮГҮН ИЗИЛДӨӨНҮН ЖЫЙЫНТЫКТАРЫ

*К.Т. Тажибаев, Г.О. Казакбаева, А.К. Жамангапова, Б.Ж. Жумабаев*

Бул макалада уюлдук-оптикалык жана математикалык моделдөө ыкмаларын колдонуу менен тышкы (гравитациялык) тик күчтөрдүн таасиринде горизонталдык камералардын айланасында камеранын бийиктигинин өзгөрүшүн эске алуу менен чыңалуунун таралуу мүнөзүн изилдөөнүн жыйынтыктары келтирилген. Ар түрдүү бийиктиктеги камеранын айланасындагы негизги тик жана тегиздик чыңалуулардын горизонталдык бирдей чоңдуктагы сызыктары көрсөтүлдү. Вертикалдык гравитациялык жүктүн таасири менен жана анын бийиктиги жогорулагандагы камеранын тегерегиндеги чыңалуунун таралуу мүнөзүнүн өзгөчөлүктөрү аныкталды, мунун өзү жапыз камерадагы чыңалууга салыштырганда, бийик камерада башкы нормалдуу чоюлуучу чыңалуунун азайышын мүнөздөйт.

*Түйүндүү сөздөр:* башкы чыңалуулар; чыңалуу эпюралары; тегиз модель; камера; чоюлуу жана кысылуу чыңалуулары; жүк.

---

## RESULTS OF RESEARCH OF REGULARITIES STRESS DISTRIBUTION AROUND OF HORIZONTAL CAMERAS

*K.T. Tazhibayev, G.O. Kazakbaeva, A.K. Zhamangapova, B.Zh. Zhumabayev*

This article presents the results of studying the distribution of stresses around horizontal cameras, taking into account the change in height under the action of external (gravitational) vertical forces using polarization-optical and mathematical modeling methods. The contours of the main normal and shear stresses around the horizontal height cameras are presented. The features of the nature of the distribution of stresses around the camera, under the action of a vertical gravitational load, and an increase in its height are established, indicating that with a high chamber, the main normal tensile stresses above the roof decrease in comparison with the stresses of a low camera.

*Keywords:* principal stresses; stress diagrams; plane model; camera; tensile and compressive stresses; load.

**Введение.** В настоящее время в Кыргызской Республике разрабатывается ряд крупных, средних и малых месторождений отечественными и зарубежными горными предприятиями. При освоении месторождений полезных ископаемых для обеспечения безопасности и эффективности горного производства необходимо уметь управлять горным давлением и правильно выбирать системы разработок. При выборе камерной системы для безопасного извлечения полезных ископаемых из недр, нужно правильно рассчитать их параметры. Размеры устойчивых параметров камер и, особенно напряженное состояние их кровли, зависят от многих горно-геологических факторов [1]. Исследования закономерности формирования и распределения напряжений в массиве горных пород вокруг различных выработок и камер в сейсмоактивных горных регионах, весьма актуальны. Проводить исследования напряжений непосредственно в массиве горных пород вокруг различных выемок, сложно и трудоемко. Поэтому для проведения детальных исследований распределения напряжений вокруг выемок разной формы нужно использовать хорошо отработанные, надежные методы.

Цель настоящей работы – проведение измерений напряжений вблизи горизонтальных очистных камер и установление их характера распределения в плоских моделях при действии вертикальных сил. Исследования были проведены поляризационно-оптическим методом на плоских моделях [2–5] и методом математического моделирования [6].

**Постановка задач и методика исследований.** В процессе работы решали следующие задачи.

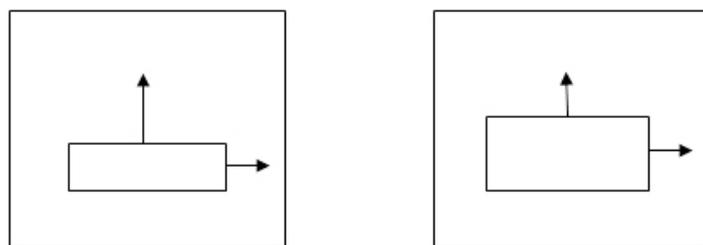
1. Определяли величину главных напряжений вблизи очистной камеры размерами  $10 \times 1,6$  см в модели № 1 при действии внешней вертикальной силы, где  $P_v = 175$  кГс и устанавливали характер их распределения.

2. Определяли величину главных напряжений вблизи очистной камеры с размерами  $10 \times 3,2$  см в модели № 2 при действии внешней вертикальной силы, где  $P_v = 175$  кГс, и устанавливали характер их перераспределения.

Исследованию подвергали две геометрически подобные плоские оптически активные модели, изготовленные на основе эпоксидной смолы. Их размеры: высота – 21,5 см, ширина – 21,2 см, толщина – 1 см. На моделях были выполнены горизонтальные прямоугольные вырезы, имитирующие горные очистные камеры. Напряжения в моделях создавали при помощи специального нагрузочного устройства. На рисунке 1, а, б приведены схемы моделей, где стрелками указаны направления осей, по которым определялись главные нормальные напряжения.

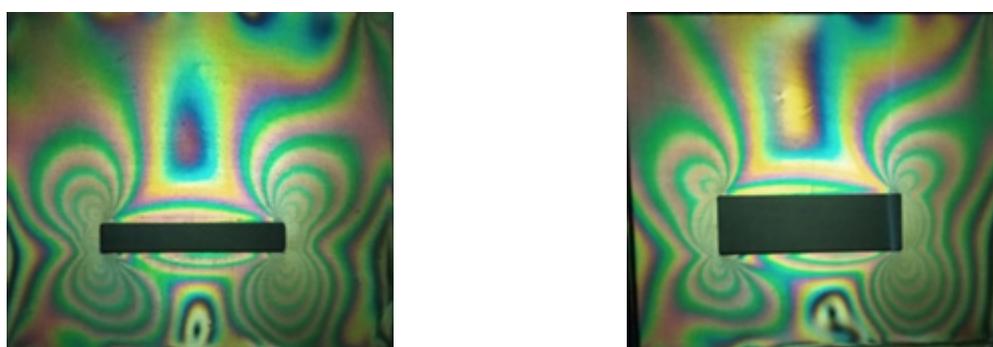
**Результаты исследований, полученные поляризационно-оптическим методом.** Созданная внешней вертикальной нагрузкой ( $P_v = 175$  кГс) картина полос полей напряжений в модели № 1 (рисунок 1, а) показывает, что высокая концентрация напряжений наблюдается в угловых частях камеры высотой 1,6 см, достигающие до 7,5 полос, в боковых частях – до 6 полос. Над кровлей камеры имеются 2,5 и в днище – 4 полосы (рисунок 2, а). Как и в первом варианте исследований, модель № 2 была нагружена внешней вертикальной нагрузкой, равной  $P_v = 175$  кГс (рисунок 1, б). Созданная при этом картина полос в модели № 2 показывает, что в верхних углах камеры число полос  $n$  достигает 6,5, а в кровле – 2. В нижнем левом углу  $n = 6,5$ , в правом  $n = 7,5$ , в днище камеры  $n = 3,5$  полосам. В боковых частях камеры по горизонтальному сечению  $n = 6,5-7$  полосам (рисунок 2, б). Сравнивая картины полос напряжений вокруг камер высотой 1,6 и 3,2 см при одинаковых условиях нагружения моделей можно заметить, что с увеличением высоты камеры до 3,2 см рост концентрации напряжений наблюдается в правой боковой части камеры. А в других точках они незначительно снижены (рисунок 2, б). Таким образом, картина полей напряжений вокруг камер с разными высотами, при действии на модели вертикальной нагрузки показала, что высокая концентрация напряжений приурочена к угловым и боковым частям камер (рисунок 2, а, б).

В нагруженных моделях по основным направлениям вблизи камер (на рисунке 1, а, б показаны стрелками) были определены величины главных напряжений и построены их эпюры. Эпюры главных нормальных напряжений и  $\sigma_2$ , построенные по вертикальному сечению над кровлей горизонтальной камеры высотой 1,6 см в модели № 1, показывают, что при действии вертикальной нагрузки в этом



а б  
Рисунок 1 – Схемы плоских оптически активных моделей

с горизонтальными камерами разной высоты: а – модель № 1; б – модель № 2



а б

Рисунок 2 – Картина полос напряжений в моделях вокруг камер:  
а – высота камеры 1,6 см; б – высота камеры 3,2 см

направлении растягивающие напряжения  $\sigma_1$  имеют более высокие величины. И они в отдельных локальных точках, достигали от 2-х до 4-х кГс /см<sup>2</sup> (рисунок 3, а). Увеличение высоты камеры до 3,2 см при таком же действии вертикальной нагрузки на модель № 2, как видно из эпюр на рисунке 3, а, над кровлей камеры привели к снижению величин опасных растягивающих напряжений  $\sigma_1$  и к росту величин сжимающих напряжений  $\sigma_2$  (рисунок 3, б). Известно, что разрушение горных пород в камерах обычно начинается со стороны кровли от растягивающих напряжений при изгибе. Также известно, что прочность при одноосном растяжении горных пород в среднем в 9 раз ниже, чем прочность при одноосном сжатию [7].

Эпюры максимальных касательных напряжений над кровлями камер показывают, что с увеличением высоты камеры в отдельных точках наблюдаются незначительные снижения их величин (рисунок 4). Сравнение эпюры главных напряжений по вертикальному сечению над кровлями камер показывает, что увеличение высоты горизонтальной камеры при действии вертикальной нагрузки на модель № 2, приводит к снижению величин растягивающих напряжений, а также в отдельных точках и величин максимальных касательных напряжений. В этом сечении увеличение высоты камеры приводит к более неравномерному распределению главных нормальных напряжений.

По горизонтальному сечению в боковой части камеры высотой 1,6 см, при действии на модель № 1 вертикальной нагрузки, образовались локальные участки со сравнительно высокими значениями растягивающих нормальных напряжений (рисунок 5, а).

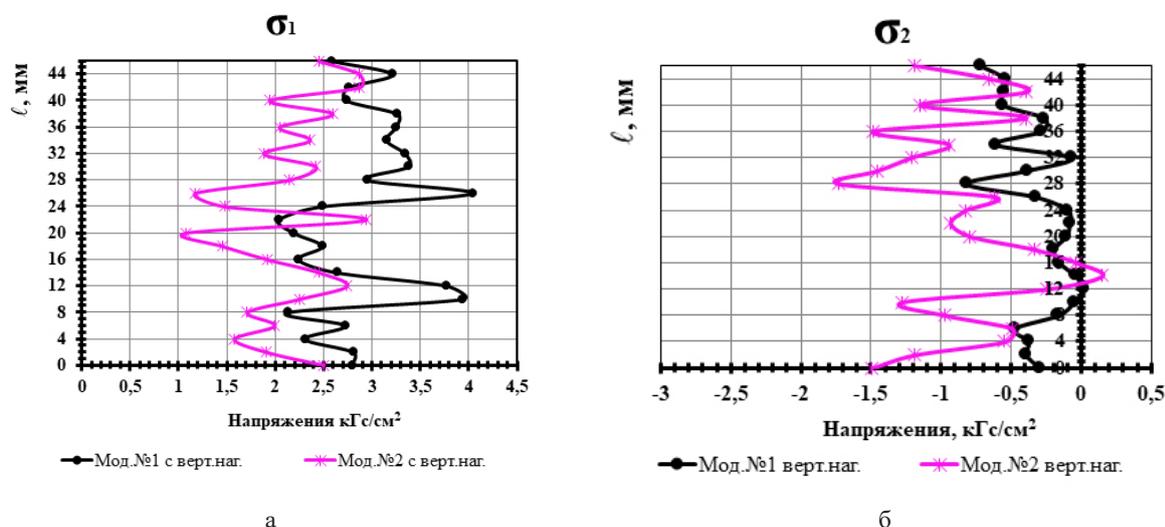


Рисунок 3 – Эпюры главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  (а) и  $\sigma_2$  (б) по вертикальному сечению над кровлями камер в модели № 1 и в модели № 2 при действии внешней вертикальной нагрузки

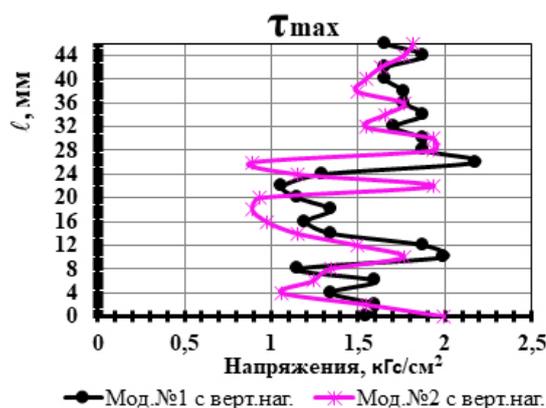


Рисунок 4 – Эпюры максимальных касательных напряжений по вертикальному сечению над кровлями камер в модели № 1 и № 2 при действии внешней вертикальной нагрузки

С увеличением высоты камеры до 3,2 см при таком же нагружении модели № 2, по горизонтальному направлению наблюдается в среднем рост величин сжимающих напряжений (рисунок 5, б). Разница в характере распределения главных нормальных напряжений в боковых частях камер в моделях незначительна (рисунок 5, а, б).

На эпюрах максимальных касательных напряжений по горизонтальному сечению в боковой части камеры шириной 3,2 см в модели № 2 видно, что в отдельных точках наблюдается снижение величин данных напряжений. Характер распределения максимальных касательных напряжений в боковых частях камер с разными высотами виден на эпюрах рисунка б.

Таким образом, исследование напряжений вблизи камер с разными высотами на плоских моделях при действии внешних вертикальных сил поляризационно-оптическим методом, позволяет определить величины главных напряжений и установить характер их распределения, что позволяет иметь представления о поле напряжений вокруг изучаемых камер.

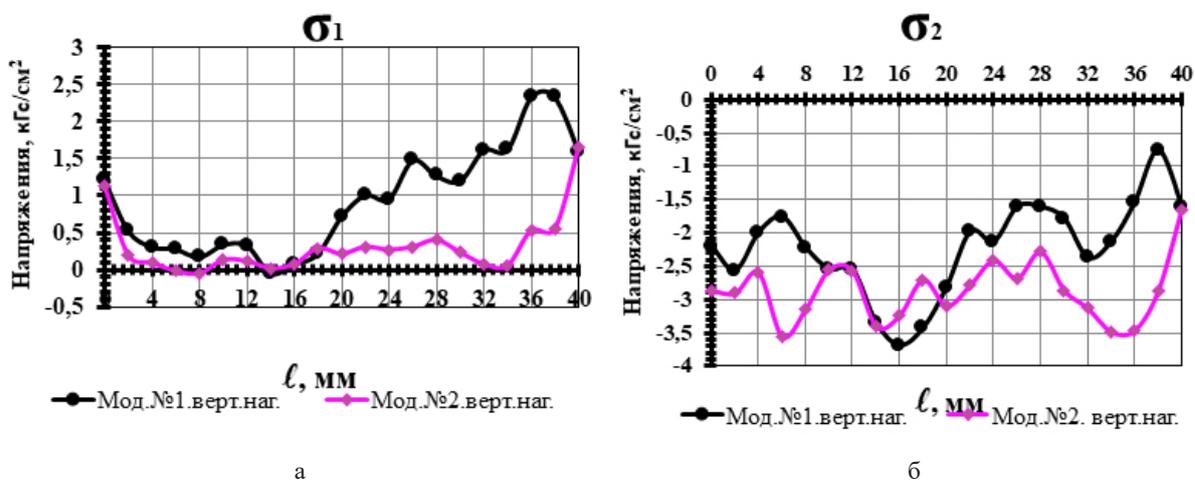


Рисунок 5 – Эпюры главных нормальных напряжений (а, б) по горизонтальному сечению в боковых частях камер при вертикальной нагрузке моделей

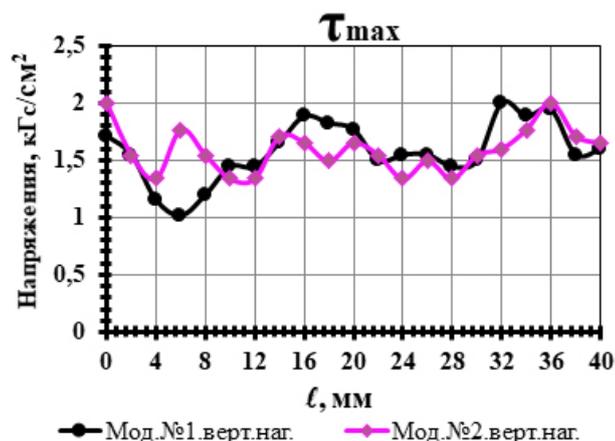


Рисунок 6 – Эпюры максимальных касательных напряжений по горизонтальному сечению в боковых частях камер при вертикальной нагрузке моделей № 1 и № 2

**Результаты исследований напряжений вокруг горизонтальных камер, полученные методом математического моделирования.** Для сравнительного анализа поставленные выше задачи решались и математическим методом моделирования, методика которого приведена в работе [8]. В результате были определены величины главных напряжений и установлен характер их распределения вокруг горизонтальной очистной камеры с разными высотами при действии вертикальных сил. Расчет полей напряжений, и построение изолиний напряжений выполняли с использованием программной системы MATCAD [9].

Ниже приводятся результаты, полученные методом математического моделирования. При моделировании свойств массива вокруг камер предполагалось, что плотность породы составляла  $1,36 \text{ г/см}^3$ ; коэффициент Пуассона был равен  $0,266$ ; модуль упругости –  $E = 0,346 \times 10^4 \text{ МПа}$ . Свойства массива подчиняется закону Гука для изотропного линейно-упругого тела.

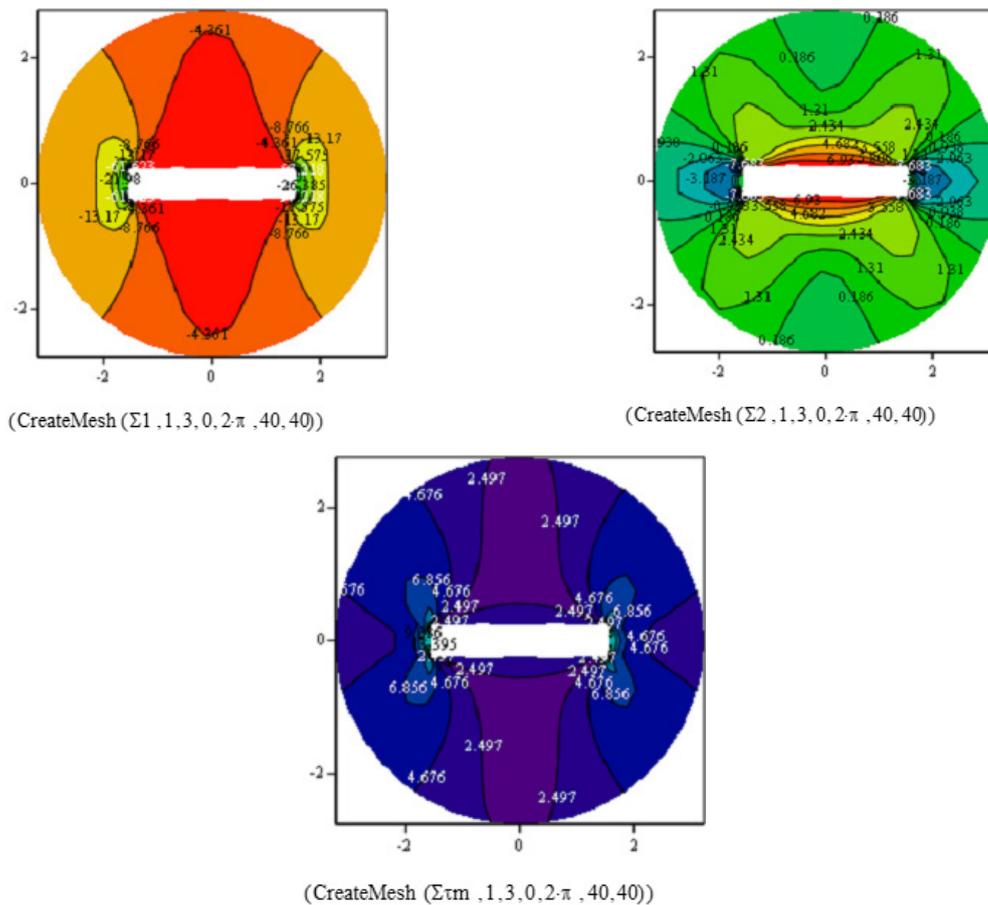


Рисунок 7 – Распределение главных напряжений вокруг камеры высотой 1,6 см в модели № 1 при действии вертикальной нагрузки: изолинии главных нормальных и касательных напряжений вокруг горизонтальной очистной камеры

Для решения первой задачи в модели № 1 камера была прямоугольной формы со сторонами  $10 \times 1,6$  см, а вертикальная сила составляла  $175 \text{ кгс/см}^2$ . Во второй задаче, при размерах камеры  $10 \times 3,2$  см в модели № 2 использовали такую же вертикальную нагрузку. Результаты определения главных нормальных и максимальных касательных напряжений вокруг камеры в модели № 1, при действии вертикальной сжимающей силы, приводится на рисунке 7. А на рисунке 8 приведены результаты определения главных нормальных и максимальных касательных напряжений вокруг камеры в модели № 2 при действии вертикальной сжимающей силы.

Сравнительный анализ полученных результатов поляризационно-оптическим и математическим методами моделирования позволил сделать следующие **выводы**.

1. Использование в моделях поляризационно-оптического метода позволило установить, что характер распределения напряжений вокруг камеры при действии вертикальной гравитационной нагрузки и увеличении ее высоты, приводят к уменьшению в 1,5–2 раза главных нормальных сжимающих напряжений над кровлей.

2. При использовании в моделях оптически активного материала было выявлено, что по горизонтальному сечению вблизи боковых стенок камер при действии вертикальной сжимающей нагрузки преобладают высокие сжимающие напряжения, а увеличение высоты камеры от 1,6 до 3,2 см приводит к росту величин сжимающих напряжений в среднем в 1,5 раза.

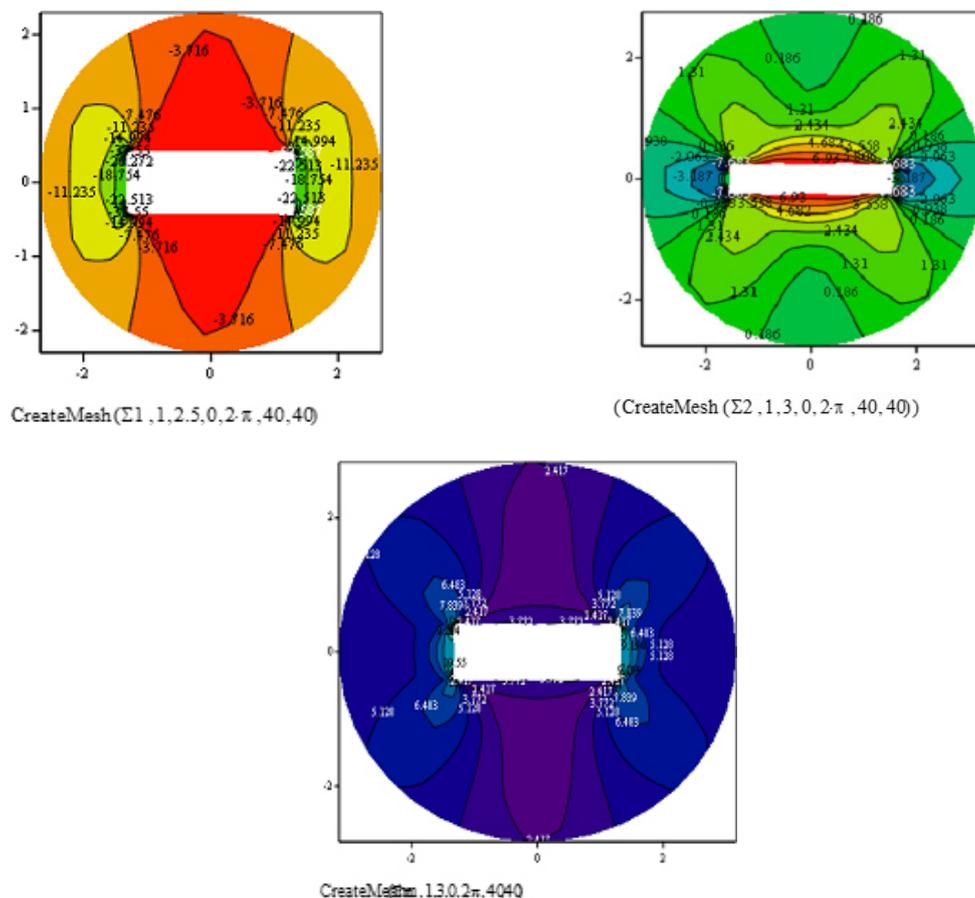


Рисунок 8 – Распределение главных напряжений вокруг камеры высотой 2,3 см в модели № 2 при действии вертикальной нагрузки: изолинии главных нормальных и касательных напряжений вокруг горизонтальной очистной камеры

3. При использовании метода математического моделирования, так же как и при определении напряжений поляризационно-оптическим методом, было установлено, что при действии вертикальной гравитационной нагрузки в непосредственной кровле камеры имеются существенные опасные растягивающие напряжения, которые могут вызвать преждевременное разрушение горных пород от растяжения при изгибе, так как прочность пород при растяжении на порядок меньше, чем прочность при сжатии.

4. Аналитические расчеты моделей позволили установить, что при действии вертикальной гравитационной силы главные нормальные сжимающие напряжения в боковой части камеры при увеличении ее высоты уменьшаются в два раза.

5. Исследования распределения напряжений вокруг камер в плоских моделях поляризационно-оптическим и аналитическим методами позволили установить зоны высоких концентраций напряжений в угловых частях камер. Выявлена неоднородность их величин и локальность зон их концентрации, где возможны такие локальные явления, как стреляния горных пород и горные удары.

#### Литература

1. Айтматов И.Т. Напряженное состояние верхней части земной коры в сейсмоактивных областях / И.Т. Айтматов // Изв. АН Кирг. ССР. 1981. № 1.

2. *Фрохт М.М.* Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений Т. 1. / М.М. Фрохт. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1948. 432 с.
3. *Фрохт М.М.* Фотоупругость. Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Т. 2 / М.М. Фрохт. М.; Л.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1948. 488 с.
4. *Хаимова-Малькова Р.И.* Методика исследования напряжений поляризационно-оптическим методом / Р.И. Хаимова-Малькова. М.: Наука, 1970. 115 с.
5. *Казакбаева Г.О.* Исследование оптическим методом некоторых факторов, влияющих на характер изменения напряжений вокруг камер / Г.О. Казакбаева // Современные проблемы механики. Гидрогазодинамика, геомеханика, геотехнологии и информатика: Научно-технический журнал. 2020. № 41 (3). С. 342–348.
6. *Савин Г.Н.* Концентрация напряжений около отверстий / Г.Н. Савин. Киев: «Наукова думка», 1968. 887 с.
7. *Тажибаев К.Т.* Деформация и разрушение горных пород / К.Т. Тажибаев. Фрунзе: Илим, 1986. 106 с.
8. *Жумабаев Б.* Напряженное состояние массивов вокруг очистной камеры с прямоугольным сечением (с отношением сторон 5) / Б. Жумабаев, А.К. Жамангапова // Вестник Забайкальского ун-та. 2020. № 2.
9. *Кирьянов Д.* // МАТСАД № 14 в подлиннике / Д. Кирьянов. СПб.: БВХ, 2007. 704 с.