

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ  
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ВЫСШЕЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



**В.И. Бузило, Т.С. Савельева, В.А. Савельев, В.П. Сердюк**

**ОБОСНОВАНИЕ РАЗМЕРОВ КАМЕР СПЕЦИАЛЬНОГО  
НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Монография

Днепропетровск  
НГУ  
2013

УДК 622.272.4:622.341  
ББК 33.332  
О13

Рекомендовано до друку вченою радою ДВНЗ «Національний гірничий університет» (протокол № 2 від 19 лютого 2013).

Рецензенти:

Л.Н. Ширін – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри транспортних систем і технологій ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ);

В.І. Голінько – д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри аерології та охорони праці ДВНЗ «Національний гірничий університет» (м. Дніпропетровськ);

С.С. Гребенкін – д-р техн. наук, проф., головний науковий співробітник ДП «Донбаський комплексний науково-дослідний і проектно-конструкторський вугільний інститут» (м. Донецьк).

**Обґрунтування** розмірів камер спеціального призначення при розробці залізородних копалин / В.І. Бузило, Т.С. Савельєва, В.А. Савельєв, В.П. Сердюк: монографія. – Д. : Національний гірничий університет, 2013. – 67 с.

ISBN 978-366-350-401-8

Исследованы общие закономерности формирования поля напряжений вокруг подземных камер и камер специального назначения в плоской и объемной постановках. В работе использованы методы конечных элементов и потенциала.

Для студентов, научно-педагогических и научно-технических сотрудников высших учебных заведений, научно-исследовательских институтов и проектных организаций, а также для инженерно-технических работников горной промышленности.

Досліджено загальні закономірності формування поля напружень навколо підземних камер і камер спеціального призначення у плоскій та об'ємній постановках. У роботі використано методи скінченних елементів і потенціалу.

Для студентів, науково-педагогічних і науково-технічних співробітників вищих навчальних закладів, науково-дослідних інститутів і проектних організацій, а також для інженерно-технічних працівників гірничої промисловості.

УДК 622.272.4:622.341  
ББК 33.332

© В.І. Бузило, Т.С. Савельєва,  
В.А. Савельєв, В.П. Сердюк, 2013

ISBN 978-366-350-401-8 © ДВНЗ «Національний гірничий університет», 2013

## ВВЕДЕНИЕ

При современной технологии производства количество людей, проживающих на планете, вызывает в окружающей природе изменения необратимого характера и таких масштабов, которые могут вызвать в ближайшем столетии обратное действие на благосостояние человека, и будет вредно влиять на рост цивилизации. Возникающие экологические, энергетические, сырьевые, демографические и продовольственные проблемы тесно связаны с наличием и эффективным использованием земельных ресурсов. Земля это и производительная сила в сельском хозяйстве, и основа для строительства и всей жизнедеятельности человека

В тоже время, развитие промышленности основано на использовании минерального сырья, что ведет к увеличению добычи полезных ископаемых, а, значит, росту числа полостей в земной коре. Использование этих полостей позволит решить некоторые экологические проблемы и эффективно использовать земельные ресурсы. Подземное пространство может быть использовано для расположения многих сооружений горного производства, например, обогатительных фабрик, а также сооружений, которые обязательно существуют в больших городах: гаражей, фабрик, заводов, коммунальных предприятий, складов, холодильников, хранилищ и т.д.

С целью сохранения поверхности земли для нужд сельского хозяйства, а также сохранения окружающей среды от вредного влияния промышленных предприятий, крупное оборудование, необходимое для добычи и переработки руды, фабрики, заводы, холодильники, гаражи, нефтехранилища, электростанции и т.д. возможно располагать под землей в существующих горных выработках или в специально созданных камерах большого размера.

Под камерами специального назначения понимаются камеры большого размера, предназначенные для размещения подземных обогатительных фабрик, складов, крупных подземных дробилок, заводов и т.д.

Примерами таких камер являются подземные холодильники в Среднем Поволжье, санатории в Закарпатье и аллергологическая больница в Ереване, винные заводы в Криково (Молдавия) и в Артемовске (Украина), теплицы в гипсовых выработках в Арзамасе Горьковской области (Россия) (рис.1). В подземных камерах размещаются обогатительные фабрики в Перу, Колумбии, Чили, где объем выработок составляет 300 тыс.м<sup>3</sup>. В Норвегии, Швеции, Финляндии все современные нефтехранилища размещены в горных выработках при объеме 15 тыс.м<sup>3</sup>. В Норвегии 120 электростанций под землей. В Японии 44 тыс. автомашин размещаются в подземных гаражах.

Так как комплекс камер специального назначения обычно имеет сложную форму, в которой трудно найти сечение, соответствующее плоской задаче, то исследования на прочность таких камер необходимо производить в объемной постановке.

До недавнего времени основные методы расчета на прочность камер больших размеров основывались на своде естественного равновесия в плоской постановке и позволяли решать только узкий круг задач.

Полагаем, что поставленные в работе задачи о расчете на прочность камер специального назначения, основанные на методах механики сплошной среды в объемной постановке расширили возможности подобных исследований. Цель работы заключается в выборе и обосновании размеров камер специального назначения, позволяющих сохранить окружающую среду и рационально использовать земельные ресурсы.

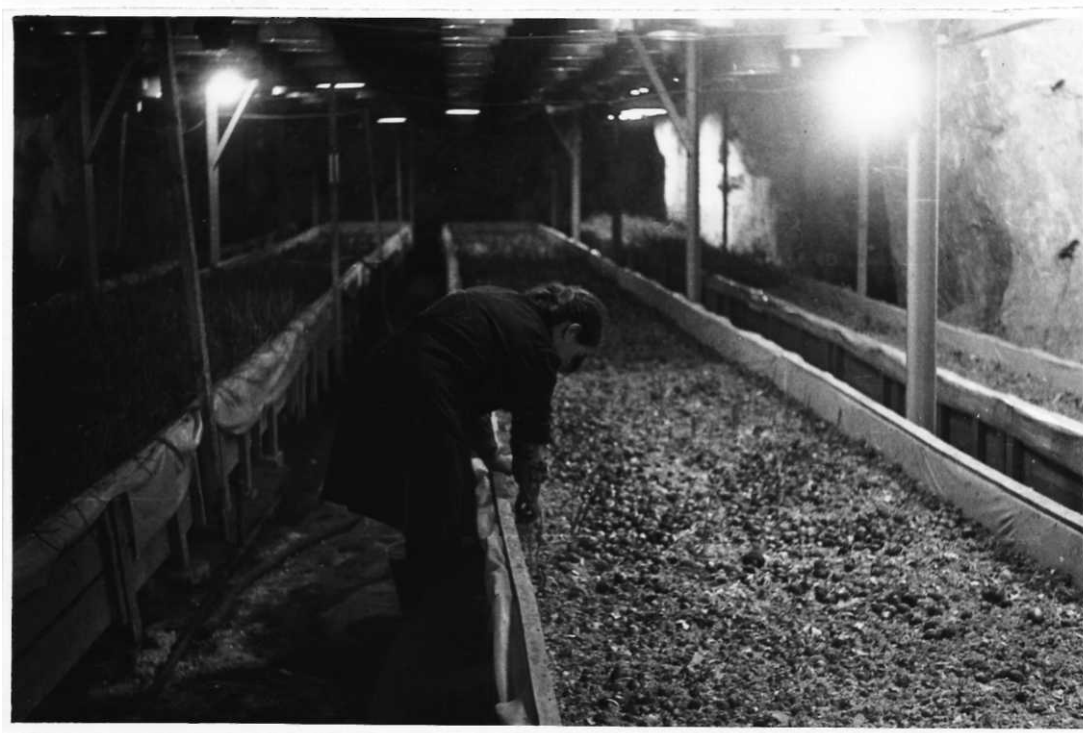


Рис. 1. Теплицы в гипсовых выработках в г. Арзамасе Горьковской области (Россия).

Работа состоит из двух частей: в первой части дается исследование общих закономерностей формирования поля напряжений вокруг камер, во второй части ведется исследование напряжений вокруг камер методом конечных элементов и методом потенциала.

Такое построение работы вызвано тем обстоятельством, что численные методы теории упругости требуют, чтобы предварительно были заданы размеры конструкции, для которой рассчитываются напряжения. Знание общих закономерностей позволяет предварительно задавать размеры с достаточно высокой степенью точности и таким путем уменьшать количество просчитываемых вариантов.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи:

- выбран один из математических методов, наиболее пригодный для исследования напряжений вокруг камер в условиях плоского и объемного напряженного состояния;
- решены задачи о напряженном состоянии пород вокруг камер в объемной постановке;
- исследовано влияние пролета камеры, ширины целиков, формы свода на напряжения в центре кровли камер большой длины;
- разработана методика определения размеров и формы свода естественного равновесия в зависимости от глубины работ.

Исследование напряженного состояния горных пород производят различными способами: экспериментально в лабораторных условиях (моделирование на эквивалентных и оптически активных материалах), путем натурных измерений (метод разгрузки) и математическими методами.

Лабораторные опыты и натурные измерения существенно расширили наши представления о природе горного давления и напряженного состояния подземных конструкций, но они не дают общих решений.

В обзоре литературы рассмотрены преимущественно математические методы, так как решение поставленной в работе задачи проводили именно этими методами.

Авторы работы [1] исследовали напряженно-деформированное состояние пород вокруг выработок, заполненных закладкой, численными методами в упругой постановке. Были использованы метод конечных элементов и метод комплексного переменного. Авторы провели натурные наблюдения и моделирование на оптически активных материалах. Результаты исследований показали, что теоретический анализ напряженно-деформированного состояния породного массива, при котором очистные выработки рассматриваются как отверстия в упругой среде, дает картину, близкую к полученной в натурных исследованиях. Следовательно, модель горного массива в достаточной степени отражает основные физические особенности поведения горных пород.

При решении горных задач в упругой постановке часто используют метод Колосова-Мухелишвили [2]. Этот метод сводится к нахождению комплексных потенциалов в плоскости с отверстием или в некоторой части полуплоскости, полосе, полуполосе. Использование конформного отображения расширило круг решаемых в горном деле задач. К исследованиям в этой области относятся ряд работ о решении задач для среды, ослабленной бесконечным числом одинаковых отверстий, центры которых расположены на одной прямой. Рассмотрены задачи, в которых расстояния между отверстиями одинаковые - периодическая, или имеют различную ширину - двояко периодическая задача. Впервые эти исследования провели Г.Н. Савин [3], С.Г. Авершин [4].

Трудность, с которой столкнулись авторы, заключалась в построении функций, конформно отображающей реальный контур на плоскость или полуплоскость.

Д.И. Шерман [5], рассматривая вопрос о напряженном состоянии междукамерных целиков, разработал метод для плоскости, ослабленной отверстиями, и преодолел эту трудность.

Д.И. Шерман [7] впервые решил задачу о напряженном состоянии упругой изотропной весомой полуплоскости, ослабленной двумя эллиптическими отверстиями.

А.С. Космодамианский [8], основываясь на результатах Д.И. Шермана, предложил приближенный метод решения задачи о напряженном состоянии упругой изотропной плоскости, ослабленной ограниченным числом криволинейных отверстий.

В дальнейшем этот метод А.С. Космодамианский использовал для исследований напряженного состояния упругой изотропной и анизотропной среды, ослабленной двумя и тремя эллиптическими и прямоугольными отверстиями [9, 10].

В дальнейшем И.М. Айталиев, В.Ю.Изаксон [6] предложили метод определения коэффициентов отображающей функции с любой наперед заданной точностью при определении напряжений в окрестности выработки несимметричного сечения.

Точное решение задачи о напряженном состоянии прямоугольника при произвольных условиях его загрузки получено Б.Л. Абрамяном [11] и М.М. Тодоровым [12] с использованием двойных тригонометрических рядов.

В рамках линеаризованной теории устойчивости на основе вариационного метода В.М. Назаренко [13] исследовал устойчивость горизонтальной выработки кругового поперечного сечения в несжимаемом упругопластичном массиве. Автор изучил потерю устойчивости при плоской деформации для конкретных горных пород. Сделан вывод, что зоны раздела физико-механических свойств породы могут существенно влиять на устойчивость выработки.

Также используя вариационный метод, В.Г. Лабазин, Л.Б. Николаева [14] исследовали распределение давления многослойной кровли на целик. Задача решена как плоская, породы упругие и изотропные.

В дальнейшем, усовершенствовав данный метод, Н.Н. Кайданов, В.Г. Лабазин [15] использовали его для исследования распределения опорного давления по контуру прямоугольной в плане выработки при жестком и податливом опорном контуре.

М.Т. Алимжанов, К.Т. Жанатаев [16] изучили напряженное состояние массива, ослабленного двумя протяженными выработками. Задача решена в упругопластичной постановке, предполагая, что вокруг каждой выработки возникают зоны неупругих деформаций.

М.А. Каюнов [17] для определения зоны возможного разрушения пород вокруг протяженной выработки использовал метод граничного элемента. Контур поперечного сечения выработки может быть произвольным. Выработка представлена как отверстие в пластине. Полученные уравнения прочности позволили найти поверхности, которые принимаются за границы зон разрушения.

Напряженное состояние изотропных целиков ленточного типа изучил О.Е. Ковалев [18]. Полученные автором зависимости позволяют оценить

вертикальную компоненту скорости перемещения материала целиков и возможное время их устойчивого состояния.

Ряд работ [19,20,21] относятся к изучению напряженного состояния массива в окрестности выработки, находящейся вдали от свободной поверхности, аналитическими методами. Однако, возможности аналитического изучения вопроса ограничены рассмотрением простых вариантов в условиях плоской деформации. Значительные успехи в решении горных задач достигнуты с помощью численных методов, например, метода конечных элементов.

Современные задачи механики горных пород определяются необходимостью пространственного планирования горных работ. Необходимость применения пространственной постановки задачи возникает, например, когда рассматривается совместная разработка взаимодействующих пластов, последовательность отработки которых зависит от проявлений горного давления, когда очистная выработка в комплексе с подготовительными представляет пространственную систему, в которой трудно найти сечение, соответствующее плоской задаче, когда в ходе горных работ меняются горно-геологические и горно-технические условия и т.д. В механике горных пород пространственные задачи начали рассматриваться недавно.

Большой вклад в развитие пространственной теории для решения горных задач внес В.Е. Миренков. В работах [27,28], используя метод интегральных уравнений, автор определил напряженно-деформированное состояние в окрестности кубического отверстия, по контуру которого приложены нагрузки, вызывающие симметричное деформирование. Автором установлена зависимость между напряжениями и смещениями на контуре выработки. Это позволило решить задачу для области с произвольной границей. Наличие условных точек, закругленных дугой окружности, дает более точное приближение к истинной форме выработки.

Важным направлением в развитии теории пространственных задач, учитывающим сложность описания реального массива горных пород, является экспериментально-аналитический метод. Данным методам определяют напряженно-деформированное состояние в окрестности выработки, используя натурные замеры смещений контура выработки и вектор смещения как граничные условия. Для полуплоскости аналитическими методами теории упругости определяют напряжения вокруг выработки.

Ряд работ Е. Бертольда, К. Фрейтага, Б.В. Власенко, Г.И. Гриценко [29,30] посвящены разработке и усовершенствованию экспериментально-аналитического метода.

М.В. Кавлакан [31] разработал метод решения неклассической смешанной пространственной задачи об опорном давлении на горизонтальный пласт, ослабленный выработкой.

Работа М.Н. Цырульникова [32] посвящена разработке аналитического метода решения пространственных задач. Метод использован для определения напряжений, возникающих в породах кровли над угольным пластом вблизи очистной выработки.

В работе [33] Л.Т. Шкелев изложил приближенный метод решения пространственной задачи теории упругости. Метод основан на использовании общего решения П.Ф. Попковича и методе прямых. Суть метода заключается в том, что он позволяет в общем виде получить приближенное значение гармонических функций, входящих в решение П.Ф. Попковича.

Г.И. Маркелов [34] исследовал деформации упругого массива в форме параллелепипеда под действием собственного веса. Деформации массива находятся путем разложения компонент перемещения по одной координате в ряды Фурье. В этом случае трехмерная задача для каждого члена разложения приводится к последовательности двумерных. Далее для решения используется метод конечных разностей с применением метода матричной прогонки.

Исследованию напряженно-деформированного состояния откосов в пространственной постановке посвятил свои работы М.А. Резников. В работах [35,36] откос горных пород рассматривается в трехмерном пространстве, в котором отыскивается поверхность с минимальным отношением удерживающих сил к сдвигающим. С применением методов механики горных пород, аналитической геометрии и математического анализа автор получил решение задачи для однородных и изотропных пород.

В настоящее время широкое применение для развития пространственной теории упругости получила линеаризованная теория устойчивости. Ф.М. Асамидинов, Г.Г. Кулиев [37] изучили устойчивость горных массивов возле криволинейных горизонтальных выработок на базе трехмерной линеаризованной теории. Авторы рассмотрели квадратную выработку при действии в массиве геостатических и геодинамических сил.

Л.В. Дериглазов [38], используя также линеаризованную теорию устойчивости, исследовал устойчивое состояние равновесия упругого горного линейного массива в окрестности горизонтальной выработки. При этом задача решалась при равномерном распределении давления.

В работе [39] Ж.С. Акопян, И.Ю. Забич, А.Н. Гузь, А.В. Навоян определили напряженно-деформированное состояние вокруг горной выработки вариационным методом с использованием линеаризованной трехмерной теории. Решена задача устойчивости горной выработки круглого сечения для линейно упругой изотропной среды, когда докритическое состояние определяется по геометрически линейной теории.

Численно-аналитический подход к решению трехмерных задач используют А.Д. Большаков, В.А. Елтышев, А.А. Поздеев [40]. Предлагается решение краевых задач теории упругости для массивов сложной формы. Получено также общее решение уравнений, для выделения частных решений. Авторы используют метод наименьших квадратов, который позволяет определять напряженно-деформированное состояние массива как из сжимаемых, так и из несжимаемых материалов.

Используя аналитические методы пространственной теории, В.М. Мирсалимов [41] рассмотрел задачу отыскания формы выработки в массиве, ослабленном рядом одинаковых выработок. Горные породы предполагались



однородным и изотропным телом, а выработки расположены достаточно далеко от поверхности земли.

Г.Н. Миренковым [42] решена пространственная задача о напряжениях внутри заглубленного пласта. Пласт представлен в виде эллипсоидального включения, одна полуось которого намного меньше двух других. Исследовано также влияние анизотропии пласта и массива на напряженные состояния наклонного пласта. Для пространственных задач новый метод определения перемещений и напряжений в грунте, вызванных завалом подземных выработок произвольной формы, предложил Г.А. Гениев [43].

Ю.Н. Подильчук, В.Ф. Ткаченко [44] используя точное решение общей задачи теории упругости для сжатого сфероида, исследовали трехмерное напряженное состояние горизонтальных и крутопадающих угольных пластов. Горный массив и угольный пласт рассматривались как упругое и изотропное тело.

Ряд авторов для решения пространственных задач горной механики использовали экспериментальные методы.

Так, Н.П. Влох, А.В. Зубков, В.П. Лешков [45] установили закономерность распределения напряжений и определили их величины в лабораторных условиях на объемных фотоупругих моделях. Так как определение величин главных нормальных напряжений связано с численным интегрированием, что трудоемко, авторы анализ устойчивости выработок производили по величине действующих касательных напряжений.

М.В. Маруашвили [46] рассмотрел вопросы взаимного влияния горных выработок в объемной постановке с помощью моделей. Дано сравнение объемных и плоских моделей и результатов, получаемых с их помощью.

Н.А. Crostask и др. [47] изучили поле напряжений вокруг выработки оптическим методом. Используя лазерную установку, получили голограммы напряжений вокруг объемных моделей.

Однако, используя существующие экспериментальные методы, построить полные поля напряжений и деформаций невозможно. В этом случае необходимо использовать также численные методы исследований, которые позволяют дополнить результаты экспериментов.

Метод конечных элементов основан на представлении области, напряженно-деформированное состояние которой необходимо определить, в виде совокупности плоских или объемных элементов. Так как свойства каждого элемента описываются в отдельности, то особенно эффективно использование метода при рассмотрении неоднородных сред. Метод дает возможность рассчитывать области сложной конфигурации.

Б.З. Амусин [22], Ж.С. Ержанов [23], О.Н. Зенкевич [24] применили метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики для определения напряжений в различных элементах конструкций.

Р. Парашкевов, Г. Андреев, С. Григоров [25], использовали метод конечных элементов, исследовали напряженное состояние пород вокруг незакрепленной горной выработки с круглым поперечным сечением. Породы представлены упругой анизотропной средой. Массив содержит один или два

слоя, плоскость раздела которых проходит через продольную ось выработки. В плоскости напластования породы изотропны, но упругие модули в этой плоскости и в направлении, перпендикулярном к ней, различаются.

С.А. Ляпцев [26] изучил напряженное состояние горных пород вблизи выработок конечной глубины на модели однородного упругого тяжелого цилиндра, ослабленного несквозной полостью. Расчет произведен также методом конечных элементов.

Метод конечных элементов, позволяющий в условиях одного алгоритма изменять внешние и внутренние границы области, свойства среды, задать разнообразные граничные условия, также нашел применение в пространственной теории упругости.

Так, W.G. Pariseau, W.K. Sorensen [48] использовали двухмерное конечноэлементное решение для проектирования трехмерного целика. Для получения соответствия решений пространственной и плоской задачи авторы предложили искусственно увеличить, нагрузив на целики введением приведенного объемного веса пород в решение методом конечных элементов.

Ю.Д. Гнучий, А.Л. Квитка, А.С. Цыбенко [49] предложили универсальный способ интегрирования по поверхности и объему трехмерных конечных элементов. Это приводит к единым выражениям при вычислении жесткостных и силовых характеристик элементов различных типов. Уравнения метода конечных элементов формируются с использованием единых алгоритмов численного анализа.

Общая пространственная теория начала развиваться на основе теории интегральных уравнений. Однако, классическая теория потенциала могла решать только ограниченную группу пространственных задач. Только с появлением теории многомерных сингулярных интегральных уравнений оказалось возможным преодоление этих трудностей.

В настоящее время в результате многолетних научных исследований создана законченная теория потенциала. Наиболее полно изложена эта теория в работах Н.А. Кильчевского [50,51], С.Г. Михлина [52], Д.И. Шермана [53], О.Д. Купрадзе, Т.Г. Гегелиа [54,55].

Построению эффективных методов решения некоторых классов задач механики на основе теории потенциала посвящена работа А.Я. Александра [56]. В работе [57] автор излагает способ решения трехмерных задач для изотропных и однородных тел произвольной формы.

Используя численный метод А.Я. Александра, Ю.А. Векслер, Н.А. Жданкин, С.Б. Колоколов [58] рассмотрели решение пространственной задачи теории упругости для подготовительной выработки, имеющей круглую и квадратную форму поперечного сечения. Исследовали также напряженно-деформированное состояние в окрестности забоя в зависимости от формы поперечного сечения выработки и коэффициента бокового давления.

Пространственная задача линейной теории упругости для полупространства рассмотрена В.А. Лихачевым, В.П. Флейшманом [59]. Использована также теория потенциала.

В работе В.Е. Миренкова [60] рассмотрена трехмерная задача теории упругости для горной выработки. Для формулировки граничных условий использованы смещения на контуре ствола шахты. Задача решена методом интегральных уравнений.

Приведенный обзор работ показывает, что задачи о напряженно-деформированном состоянии массива имеют большое количество решений, построенных на различных подходах к постановке задачи и различных методах ее решения.

Строительство подземных сооружений требует рассмотрения разных вариантов для выбора наиболее экономичного из них. В этом случае метод конечных элементов представляет определенные преимущества при решении вопросов горного строительства. Метод позволяет изменять параметры сооружений, что дает возможность рассматривать последовательные стадии строительства, позволяет изменять свойства среды, поэтому использование метода конечных элементов эффективно при неоднородности массивов.

Однако при расчете напряженно-деформированного состояния конструкций необходима дискретизация всей рассматриваемой области. Это приводит к значительному увеличению трудоемкости вычислительного процесса. Преодолеть эту трудность позволяют методы интегральных уравнений. Эти методы, обеспечивая универсальность, отличаются лаконичностью и простотой при их применении.

На основе метода интегральных уравнений Ю.В. Верюжский [61] разработал метод эластопотенциалов для расчета плоских напряженно-деформированных и пространственных тел при статическом нагружении.

Ввиду универсальности и простоты решений в настоящей работе при исследовании напряженно-деформированного состояния вокруг выработок были использованы метод конечных элементов и метод эластопотенциалов.

Обзор литературы показал, что рядом авторов решена пространственная задача применительно к исследованию напряжений вокруг капитальных горных выработок малых размеров и свиты угольных пластов.

При разработке рудных месторождений приходится оценивать напряженное состояние очистных камер и камер специального назначения в условиях объемного напряженного состояния, когда три измерения камеры численно мало отличаются одно от другого. В этом случае для расчетов в горных условиях наиболее приемлемым является метод потенциалов, так как он обладает универсальностью (позволяет решать широкий круг задач) и менее трудоемок, чем другие методы.

# 1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАМЕРАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

## 1.1. Очистные камеры

Сведения о размерах очистных камер дают определенное представление о том, какого размера могут быть созданы камеры для размещения различного оборудования, в том числе и оборудования подземных фабрик. Приведем несколько примеров.

На Запорожском железорудном комбинате (Украина) высота камер достигает 140 м, ширина (пролет) 15 м и длина 50 м. Коэффициент крепости руды составляет 6-8. Работы ведут на глубине 800-900 м от поверхности.

Такого же размера создают камеры и при разработке железных руд в Кривбассе (Украина), на Урале и Сибири (Россия). Но, обычно, высота камер ограничивается высотой этажа, которую принимают равной 60-80 м.

Интересно, что при разработке соляных месторождений образуют очистные камеры значительных размеров, хотя коэффициент крепости соли всего 2-2,5. Так на Артемовских соляных рудниках (Украина) принят пролет камер 17 м, высота 20-40 м, а длина измеряется километрами.

Разработку Стебниковского месторождения калийных солей (Украина) в начале века вели выщелачиванием. Образовались камеры в плане круглой формы диаметром 80-100 м. Эти камеры находятся в устойчивом состоянии и в настоящее время.

Можно констатировать, что при разработке рудных месторождений камерными системами создаются камеры, размеры которых вполне достаточны для размещения под землей различных производственных объектов и крупного оборудования. Конечно, в этом случае потребуется крепить камеры хотя бы простейшими видами крепи в виде набрызгбетона и штанг.

## 1.2. Камеры специального назначения

Под камерами специального назначения понимаются камеры большого размера, предназначенные для размещения подземных обогатительных фабрик, складов, крупных подъемных дробилок, заводов и т.д.

До недавнего времени поверхность Земли казалась безграничной и только в последнее время стали говорить о необходимости беречь ее.

Швецов П.Ф. и Зильберборд А.Ф. [62] отмечают, что плотность населения на территориях, наиболее удобных для расселения, растет заметно. Введя понятие экономической плотности, т.е. относительно экономически освоенной территории, авторы отмечают, что в Грузии экономическая плотность населения в 2 раза больше средней по республике плотности населения на квадратный километр. А в Египте самая большая в мире экономическая плотность – 1000 человек, а физическая всего 36 человек на квадратный километр.

По мнению специалистов, рост количества населения на планете при современной технологии производства вызовет в окружающей природе изменения необратимого характера и таких масштабов, которые могут вызвать в ближайшем столетии обратное действие на благосостояние человека и будут вредно влиять на рост цивилизации [63].

Разрешить эти задачи возможно лишь на основе решения глобальных проблем. Это экологические, энергетические, сырьевые, демографические и продовольственные задачи, которые тесно связаны с земельными ресурсами. Земля это и производительная сила в сельском хозяйстве, и основа для строительства и извлечения минерального сырья.

Поэтому, в настоящее время предлагается использовать не только поверхность земли, но и подземное пространство, где можно расположить многие сооружения, которые обязательно существуют в больших городах: гаражи, фабрики, заводы, коммунальные предприятия, склады, холодильники, хранилища и т.д. Для этого и необходимо создать специальные горные выработки или использовать уже готовые полости. В этом отношении имеются большие возможности, так как ежегодно, например, из недр в странах бывшего СССР извлекается несколько миллиардов кубометров горных пород.

Экономисты всех стран отмечают постепенное увеличение добычи полезных ископаемых. Объясняют это ростом численности населения и его потребления. Так как развитие черной и цветной металлургии, минеральных удобрений, промышленности строительных материалов, химической промышленности основано на использовании минерального сырья. Рост добычи полезных ископаемых влечет за собой увеличение числа полостей в земной коре и использование их в народном хозяйстве становится важной задачей.

Об огромных объемах полостей и выемок, образующихся в результате подземных горных работ, свидетельствуют следующие цифры. В настоящее время во всем мире действует свыше 4 тыс. горнодобывающих предприятий, которые ежегодно перерабатывают около 30 млрд. м<sup>3</sup> горной массы, добыча полезных ископаемых превышает в настоящее время 3,3 т/чел-год [62].

Для того, чтобы специально созданные камеры или вторично используемые могли долгое время служить людям, необходимо оставлять в недрах целики. То есть для создания таких камер необходимо применять камерную систему разработки.

Более 30% руды добывается камерной системой. На рудниках цветной металлургии удельный вес этой системы составляет около 25%. Камерная система характеризуется высокими технико-экономическими показателями. Камерная система разработки применяется также при выемке подземным способом таких твердых полезных ископаемых как известняк, доломит, гипс, песчаник, каменная и калийная соль. Камеры, разделенные ленточными или столбчатыми целиками, обычно сохраняются долго и, поэтому, могут быть использованы для размещения различных объектов народного хозяйства.

Одним из примеров вторичного использования отработанного пространства, достигшего наибольших успехов в этом деле, является

Криковский винный завод (Молдавия). Это своеобразный город с проспектами и улицами Фетяска, Каберне, Алиготе, Рислинг и другие. Под землей оборудован дегустационный зал, все помещения снабжены лампами дневного света, по проспектам шириной около 7 м. разъезжают грузовые и легковые автомобили. Протяженность всех галерей уже более 20 км.

В Среднем Поволжье в выработках известняка, отработанных еще в 1939 г., размещены крупные холодильники. В недалеком будущем это предприятие станет одним из наиболее крупных в своей отрасли, так как холодильники, рассчитанные на хранение 15 тыс. т. мороженого мяса, расширяются.

В 1964 г. был открыт специальный подземный аллергологический санаторий в выработках соляного рудника "Величка" (Польша). Санаторий размещен на глубине 200 м.

В Закарпатье на глубине 206 и 282 м. существует Солотвинская больница и санаторий.

Утвержден проект строительства подземной аллергологической больницы на Аванском соляном руднике в пригороде Еревана.

Много примеров вторичного использования камер также в США. Наибольшее количество камер специального назначения на месторождениях, расположенных в центральных районах страны, где густая сеть автомобильных дорог обеспечивает удобную связь подземных объектов практически со всеми районами страны.

Так в штате Канзас помимо многочисленных складов, холодильников, различных хранилищ, торгового центра в горных выработках размещен завод точного приборостроения. На всех объектах Канзас-Сити, а их около двухсот, работает почти 3 тыс. человек.

В Польше в отработанных камерах рудника "Величка" расположен один из наиболее крупных горных музеев, спортивные залы, а также церковь в выработке длиной 50 м., шириной – 14,5 м., высотой 10 м., отработанной еще в XVIII веке.

В Германии в соляной шахте расположено предприятие по производству бройлеров. Во Франции почти все шампиньоны выращивают в известняковых выработках.

С 1916 г. в Норвегии построено 120 подземных ГЭС, в Швеции – 40 ГЭС. Всего в 30 странах мира эксплуатируются и строятся свыше 300 подземных ГЭС общей мощностью 30 млн. квт.

В отработанных камерах выращивают овощи. Такие теплицы существуют на Белоусовском руднике в Казахстане, на руднике "Апатит" за Полярным кругом, в гипсовых шахтах Горьковской области (Россия) (рис.1).

Швецов П.Ф. и Зильберборд А.Ф. [62] исходя из имеющегося опыта подземного строительства, археологических и спелеологических исследований, делают вывод, что подземные сооружения могут существовать тысячелетия. Так, например, тоннели могут служить 500 лет, а наземные постройки почти в 5 раз меньше.

Все современные хранилища нефти и продуктов ее переработки в Швеции, Норвегии и Финляндии размещаются в горных выработках. При этом затраты

на изучение инженерно-геологических условий составили около 10% капитальных вложений в хранилище и они быстро окупились. Эти хранилища при объеме свыше 10-15 тыс.м<sup>3</sup> оказались выгоднее, чем наземные. Капиталовложения в подземные сооружения в Швеции составляют около 10% стоимости всего строительства в стране.

Но решение вопросов по созданию камер специального назначения необходимо осуществлять исходя из конкретных условий, основываясь на выборе оптимальных вариантов природопользования. Одним из решений, ведущих к сохранению природной среды, является комплексное, заранее планируемое использование подземного пространства. И при этом, прежде всего, необходимо частично или полностью переходить на подземную разработку полезных ископаемых, а также использовать отработанные объемы.

Примером перехода на подземную разработку с последующей переработкой полезных ископаемых в подземных камерах, являются подземные обогатительные фабрики. В Перу, Колумбии, Чили обогатительные фабрики расположены под землей. При этом объем камер под обогатительную фабрику в Чили составляет около 300 тыс.м<sup>3</sup>.

Для использования подземного пространства необходимо решение некоторых важных инженерных задач. Одной из них является определение прочности подземных сооружений больших размеров, что связано с их долговечностью и безопасностью использования.

В данной работе разработана методика исследования напряженного состояния пород вокруг камер больших размеров для использования их, как камеры специального назначения.

Исследования проводились на примере камер подземных обогатительных фабрик рудника им. Дзержинского (Кривбасс) и для условий Кременчугского железорудного месторождения.

На рис.1.1 показана камера для установки двух дробилок на шахте "Победа" рудника им. Дзержинского. Это один из примеров камеры специального назначения. Пролет камеры составляет 9м., высота – 15 м. и длина – 24 м. Камера закреплена торкрет-бетонном в сочетании со штангами.

На рис. 1.2 показано расположение камер подземной обогатительной фабрики в условиях рудника им. Дзержинского, а на рис.1.3 и 1.4 – два варианта расположения камер подземной фабрики в условиях Кременчугского месторождения. Расчеты, произведенные нами, показали, что камеры, указанных на чертежах размеров, отвечают условиям прочности.

Кременчугское железорудное месторождение весьма благоприятно для создания крупного горно-обогатительного предприятия. Месторождение расположено между Кременчугом и Полтавой и имеет длину по простиранию около 50 км. Мощность залежи 300 – 600 м. Падение почти вертикальное. Геологические запасы руды 48 млрд.т. Месторождение покрыто толщей обводненных наносов мощностью 300-400 м. Коэффициент крепости руды и пород 10-15. Небольшой участок в южной части месторождения разрабатывается Полтавским горно-обогатительным комбинатом. На остальной части месторождения возможны только подземные работы.

Основная идея заключается в том, что обогатительную фабрику располагают на глубине 800-1000 м. Добытую руду спускают по рудоспускам в бункера обогатительной фабрики. Разработку ведут камерной системой. Отходы обогащения (хвосты) складывают в отработанных камерах. К ним добавляют вяжущий материал (цемент или измельченный гранулированный шлак) и используют как твердеющую закладку. Концентрат выдают на поверхность. На руднике им. Дзержинского целесообразно произвести промышленную проверку этой идеи на сравнительно небольшом опытно-промышленном участке.

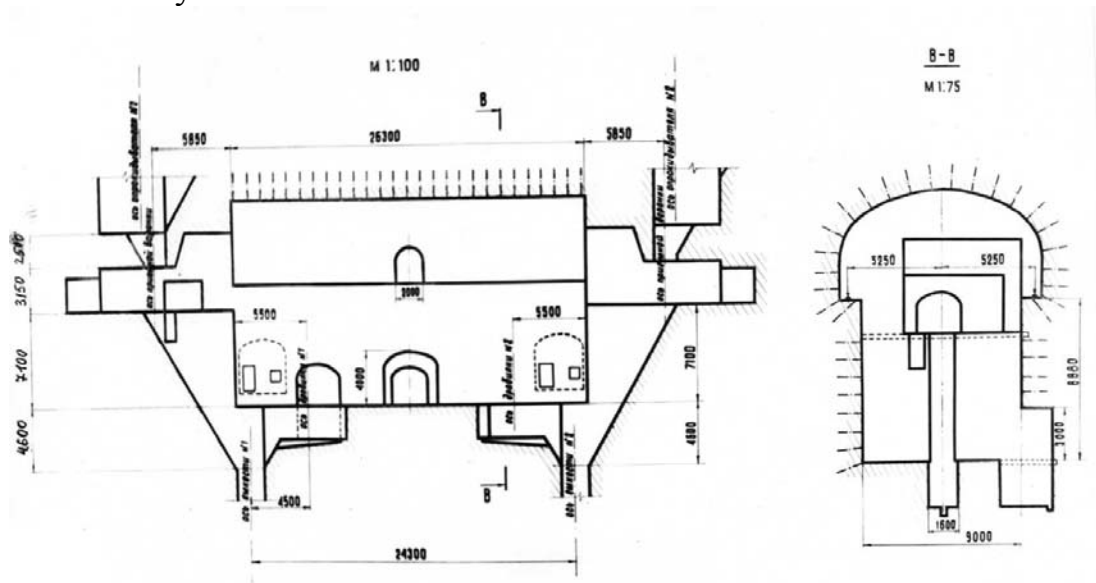


Рис.1.1. Камера подземных дробилок шахты "Победа" рудника им. Дзержинского

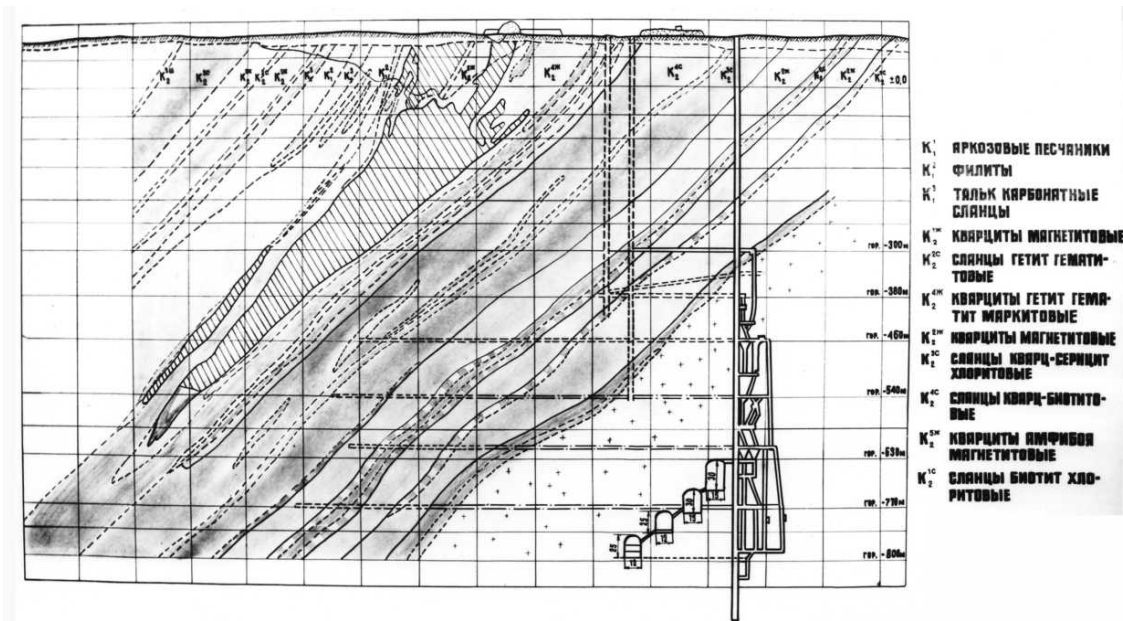


Рис.1.2. Подземная обогатительная фабрика в условиях рудника им. Дзержинского





## 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### 2.1. Основы метода конечных элементов

Метод конечных элементов является одним из популярных методов математического моделирования [64, 65]. Он представляет собой единство достижений в области механики сплошной среды и методов численного интегрирования. Метод конечных элементов нашел применение при решении плоской задачи горной механики. При решении задач этим методом исследуемая область разбивается на элементы конечных размеров, которые взаимодействуют друг с другом через соприкасающиеся точки-узлы (рис.2.1). При этом выделенный элемент имеет те же физические свойства, что и рассматриваемая среда в месте расположения элемента.

Условие равновесия элемента получается на основе принципа возможных перемещений в виде равенства работ узловых и внутренних сил, действующих на данный элемент, из соответствующих этим силам перемещениях.

Если узел  $i$  получит возможное перемещение  $U_i=1$  под действием силы  $X_i$ , приложенной к  $i$ -му узлу. Работа этой силы равна (25):

$$A=X_i \cdot U_i$$

Потенциальная энергия возможного деформирования на площади элемента определяется через деформации и напряжения, возникающие в элементе:

$$U = \iint (\varepsilon_x \sigma_x + \varepsilon_y \sigma_y + \gamma_{xy} \tau_{xy}) dx dy$$

Используя равенство, характеризующее принцип возможных перемещений о минимуме энергии системы  $\delta(U-A)=0$ , получим силу, действующую на  $i$ -тый узел:

$$X_i = \Delta \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} \quad (2.1)$$

Для того, чтобы найти соотношение между узловыми силами и перемещениями по направлению этих сил, необходимо выразить деформации через перемещение. Для этого рассматривается сплошное изотропное упругое тело, находящееся в равновесии под действием объемных и поверхностных сил. Тело разбито на треугольные элементы, в узлах которых приложены по две компоненты сил и перемещений. Эти перемещения в пределах конечного элемента задаются в виде линейных зависимостей от координат:

$$\begin{cases} U = \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y \\ V = \alpha_4 + \alpha_5 x + \alpha_6 y \end{cases} \quad (2.2)$$

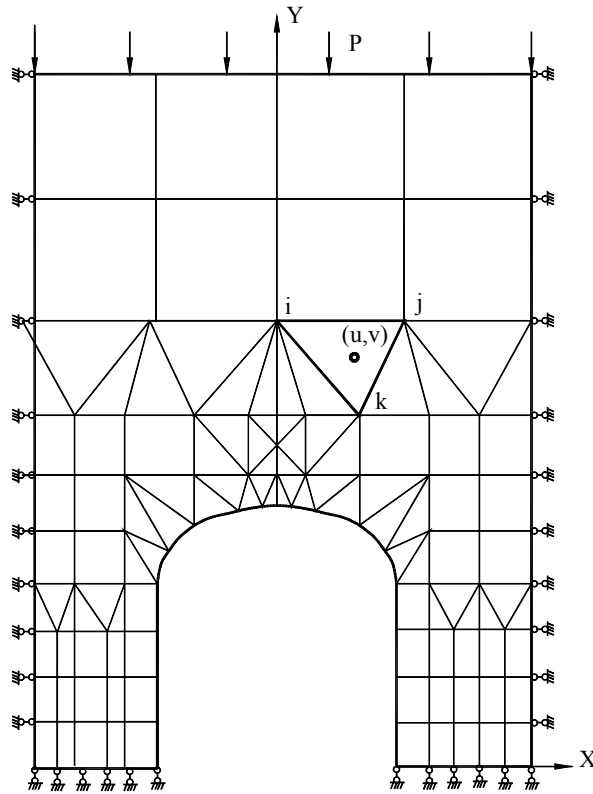


Рис.2.1. Расчетная схема для использования метода конечных элементов

Где  $\alpha_1 \dots \alpha_6$  – коэффициенты, постоянные в пределах каждого элемента. Выбор перемещений в такой форме обеспечивает выполнение условий совместности деформаций в элементах и на его границах. Деформации определяются в соответствии с формулами Коши:

$$\varepsilon_x = \frac{\delta U}{\delta x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\delta V}{\delta y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\delta U}{\delta y} + \frac{\delta V}{\delta x}$$

С учетом матрицы координат узловых точек, которая связана с площадью треугольного элемента перемещения в любой внутренней точке элемента можно определить через перемещения вершин:

$$\begin{aligned} U &= a_i(x,y)u_i + a_j(x,y)u_j + a_k(x,y)u_k \\ V &= a_i(x,y)v_i + a_j(x,y)v_j + a_k(x,y)v_k \end{aligned} \quad (2.3)$$

Где функции  $a_i(x,y)$ ,  $a_j(x,y)$ ,  $a_k(x,y)$  определяются координатами вершин треугольного элемента  $i, j, k$ .

Деформации внутри элемента связываются с перемещением его вершин в соответствии с выражением:

$$\{\varepsilon\} = [B][A]^{-1}\{U\}, \quad (2.4)$$

где  $[A]$  – матрица координат узловых точек.

$$\text{Матрица } [B] = \begin{bmatrix} 010000 \\ 001001 \\ 000010 \end{bmatrix}$$

Для перехода от деформаций тела к напряжениям применяется закон Гука:

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} = [E][B][A]^{-1}\{U\} \quad (2.5)$$

Где матрица  $[E]$  для случая плоской деформации определяется через  $E$  и  $\nu$  – модуль Юнга и коэффициент Пуассона. Таким образом, матрицы  $[E]$ ,  $[B]$ ,  $[A]^{-1}$  содержат упругие и геометрические характеристики каждого элемента рассматриваемого упругого тела.

Связь между узловыми силами и перемещениями узлов по направлению этих сил в матричной форме имеет вид:

$$\{x\} = \{K\}\{U\} \quad (2.6)$$

$$[K] = \Delta[A]^{-1T}[B]^T[E][B][A]^{-1} \quad (2.7)$$

Где  $[K]$  – матрица жесткости элемента, связывающая узловые силы с узловыми перемещениями.

Таким образом, основными соотношениями изложенного метода, являются формулы (2.5), (2.6), (2.7), связывающие напряжения в каждой точке внутри элемента с перемещениями узлов и нагрузками в узлах, а также с упругими и геометрическими характеристиками рассматриваемого тела.

В работе для решения задач на прочность использована программа, которая реализует метод конечных элементов в перемещениях [66]. Исходной информацией являются: данные о структуре системы, типы конечных элементов, места приложения и величина нагрузок, граничные условия.

Программа построена на традиционном методе перемещений и осуществляет:

- составление системы канонических уравнений;
- составление столбцов свободных членов;
- решение системы уравнений и вычисление перемещений в узлах системы;
- вычисление напряжений и перемещений в элементах, на которые разбита система. Для решения задачи предварительно определяют модуль упругости и коэффициент Пуассона горной породы, а также силы, которые нужно приложить по верхней границе рассматриваемой области.

## 2.2. Основы метода потенциала

При исследовании стационарных процессов различной физической природы обычно приходят к уравнениям эллиптического типа. Наиболее распространенным уравнением этого типа является уравнение Лапласа общий вид которого:

$$\Delta U(P) = 0 \quad (2.8)$$

где  $\Delta$  – оператор Лапласа. Если задана еще одна функция точки  $Q(P)$ , то уравнение сводится к неоднородному уравнению Лапласа:

$$\Delta U(P) = -4\pi Q(P)$$

Данное уравнение называется уравнением Пуассона.

В уравнении  $U(P)$  и  $Q(P)$  – есть функции точки  $P$  в трехмерном евклидовом пространстве. Функция  $U(P)$  называется потенциалом поля единичной массы.

Нахождение таких потенциалов при решении дифференциальных уравнений Лапласа и Пуассона известно как теория потенциала [67].

Если на замкнутой поверхности  $S$  заданы силы  $\Phi(q)$ , тогда суммарные смещения во всем пространстве представляются в виде интеграла:

$$U(P) = \int_s \Gamma(p, q) \Phi(q) dS \quad (2.9)$$

Уравнение (2.9) есть решение уравнения (2.8) в общем виде, и функция  $U(P)$  называется объемным потенциалом.

При решении многих математических задач методами теории потенциала возникает необходимость учитывать свойства изучаемой среды. Например, при решении широкого круга задач математической теории упругости. В этом случае функция  $U(P)$  уравнения (2.16) называется упругим потенциалом или эластопотенциалом.

Для нахождения единственного решения уравнения Лапласа необходимо к уравнению присоединить начальные и граничные условия. Поэтому главной задачей теории потенциала является не только отыскание более общих решений таких уравнений, но и изучение вопроса о существовании решений, удовлетворяющих некоторым заранее заданным условиям. Так задачей теории является исследование следующих краевых задач: требуется найти в области  $S$  такое решение  $U(P)$  уравнения Лапласа, которое непрерывно вместе со своими частными производными первого и второго порядка и на границе области  $S$  принимает заданные непрерывные значения. Это означает: найти функцию  $U(P)$  гармоническую, в области  $S$ , ограниченной контуром  $C$ , и удовлетворяющую на  $C$  граничным условиям:

$U|_c = f_1$  – первая краевая задача,

$dU/dn_c| = f_2$  – вторая краевая задача.

Где  $n$  – нормаль к поверхности  $C$ .

Первую краевую задачу для уравнения Лапласа называют задачей Дирихле, а вторую задачу – задачей Неймана [67].

Пусть на упругое тело действуют две системы причин и следствий. К причинам первой системы отнесем действия массовых сил  $X_i$ , поверхностных нагрузок  $P_i$  на поверхности  $A\sigma$  и перемещений  $U_i$  на  $A_\mu$ . Эти причины вызывают следствия: поле перемещений  $U_i$  и связанные с ним деформации  $\varepsilon_{ij}$  и напряжения  $\sigma_{ij}$ . В этой системе должны быть выполнены уравнения равновесия и граничные условия.

На тело действует и вторая система причин и следствий. Отметим ее штрихами. Причины:  $X_i', P_i', U_i'$ . Следствия:  $U_i', \varepsilon_{ij}', \sigma_{ij}'$ . И эта система должна удовлетворять уравнениям равновесия и граничным условиям. Тогда работа, выполненная в упругом теле первой системой причин на следствиях второй системы, равна работе, выполненной второй системой причин на следствиях первой системы [68]. Теорему взаимности Бетти можно записать уравнением:

$$\int_V X_i U_i' dV + \int_A P_i U_i' dA = \int_V X_i' U_i dV + \int_A P_i' U_i dA$$

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние трехмерного тела, которое занимает область  $S$ , ограниченную поверхностью  $\Gamma$ .

Упругая среда тела характеризуется коэффициентом Пуассона  $\nu$  и модулем упругости  $E$ . Объект подвержен действию массовых сил  $X_i$  и поверхностных нагрузок на границе  $P_i$ . Состояние тела характеризуется полями перемещений  $U_i$ , относительных деформаций  $\varepsilon_{ij}$  и внутренних напряжений  $\sigma_{ij}$ . Назовем исследуемое напряженно-деформированное состояние объекта основным. Рассмотрим также аналогичное второе состояние объекта – вспомогательное.

Используем для рассматриваемых состояний теорему взаимности Бетти. Тогда работа поверхностных нагрузок будет представлена интегральными выражениями, которые определены на  $\Gamma$ , а работа массовых сил будет выражаться объемными интегралами по  $S$ . Получим уравнение, связывающее основное и вспомогательное напряженно-деформированные состояния трехмерного тела [61]:

$$\int_S X_i^* U_i dS + \int_\Gamma P_i^{(n)*} U_i^{(n)} d\Gamma = \int_S X_i U_i^* dS + \int_\Gamma P_i^{(n)} U_i^{(n)*} d\Gamma \quad (2.10)$$

Основным уравнением эластостатики в перемещениях для определения напряженно-деформированного состояния объекта является уравнение Навье:

$$\mu \Delta^2 U + (\lambda + \mu) \text{grad div} U + X = 0 \quad (2.11)$$

где  $U$  – вектор перемещений,  $X$  – вектор массовых сил,  $\mu = E[2(1+\nu)]^{-1}$  – модуль сдвига,  $\lambda = E \nu [(1+\nu)(1-2\nu)]^{-1}$  – коэффициент Ляме [69].

Для решения данной задачи задаются граничные условия на поверхности  $\Gamma$ , ограничивающей  $S$ . Первая краевая задача состоит в нахождении распределения перемещения и напряжений внутри упругого тела, находящегося в равновесии, если внутри тела известны массовые силы, а на границе заданы перемещения. Вторая краевая задача заключается в определении перемещений и напряжений внутри тела при заданных массовых силах внутри тела и нагрузках на его поверхности.

Решение системы уравнений (2.11) для вспомогательных состояний определяют на основе решения задачи Кельвина о действии сосредоточенной силы в бесконечной среде [67]. Таким образом, находят перемещения, нормальные и касательные напряжения для точки, лежащей на границе  $\Gamma$  вспомогательного состояния.

Далее рассматриваются два состояния тела, ограниченного поверхностью  $\Gamma$ , основное и вспомогательное. Применяя теорему о взаимности работ Бетти к этим состояниям, получают формулу Сомильяны для определения перемещения точки основного состояния через известное вспомогательное [61]. Последовательное применение теоремы Бетти к определенному основному и построенным вспомогательным состояниям приводит к формированию формул Сомильяны, которые записываются в общем виде:

$$\sigma_{ml}^{(\alpha)}(K) = \iiint_S X_i(P) \sigma_{ml}^{(\alpha)} U_i^*(K, P) dS + \iint_{\Gamma} [P_i^{(n)}(N) \sigma_{ml}^{(\alpha)} U_i^{(n)}(K, N) - U_i^{(n)}(N) \sigma_{ml}^{(\alpha)} P_i^{(n)*}(K, N)] d\Gamma$$

Здесь  $\sigma_{ml}^{(\alpha)}(K)$  – напряжение или перемещение в точке  $K$  в основном состоянии, в зависимости от того, какое из вспомогательных состояний рассматривается,  $\sigma_{ml}^{(\alpha)}$  – соответствующий  $\sigma_{ml}^{(\alpha)}(K)$  оператор, обозначение которого подчеркивает назначение вспомогательного состояния. Учитывая граничные условия при решении интегральных уравнений, приходим к уравнениям Фредгольма первого и второго рода относительно неизвестных потенциалов.

В работе использована программа "Потенциал", разработанная в Киевском инженерно-строительном институте на кафедре строительной механики Ю.В. Верюжским и др. [61]. Программа предназначена для исследования напряженно-деформированного состояния сложных составных и однородных объектов в упругой постановке. Расчетная схема представлена на рис.2.2.

Исходные данные, описывающие объект исследования, можно разделить на три основные группы:

- данные, описывающие границу исследуемого объекта и нагрузки на границе;
- физико-механические характеристики материала, массовые силы;
- координаты точек внутри области.

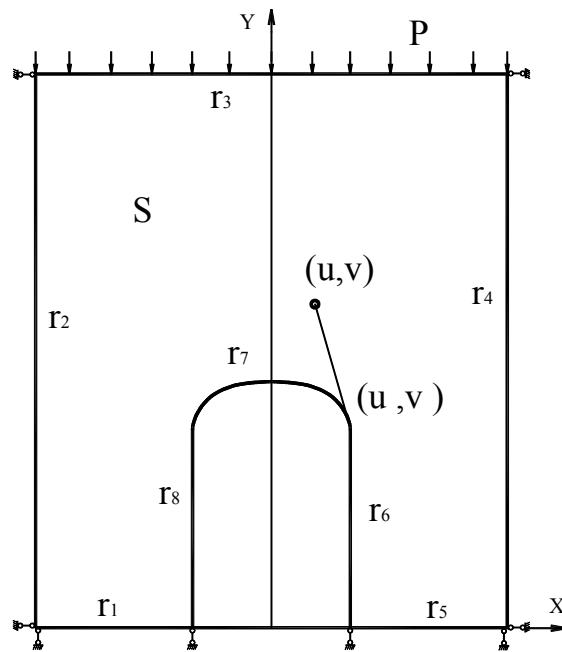


Рис.2.2. Расчетная схема для использования метода потенциала



### 3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ КАМЕР БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

В процессе ведения горных работ и образования подземных выработок происходит изменение напряженно-деформированного состояния пород. Для выбора размеров камер, отвечающих условиям длительной прочности, необходимо знать характер распределения напряжений в наиболее опасных местах: в кровле и целиках, а также влияние размеров камер на напряженно-деформированное состояние пород. Это позволит предварительно задавать размеры камер, а затем исследовать их на прочность математическими методами.

#### 3.1. Исследование напряжений в кровле камер

В кровле камер, которые создают при разработке месторождений камерно-столбовой системой, возникают растягивающие напряжения. Оценку прочности кровли камер обычно производят по величине именно этих напряжений, так как сжимающие на контуре кровли приближаются к нулю и не могут явиться причиной разрушения конструкции. Концентрацию касательных напряжений в углах сечения снижают путем закругления углов.

Изучение растягивающих напряжений в кровле камер является важной задачей, так как позволяет рассчитать на прочность пролеты камер и, следовательно, сделать горные работы безопасными и эффективными. Для исследования напряжений применен метод конечных элементов.

Задача решалась для серии камер и целиков. Периодически повторяющийся участок с разбивкой на конечные элементы и с указанием граничных условий показан на рис.3.1. Для расчетов приняты следующие размеры камер и целиков: ширина целиков – 6 м, высота камер – 10 м, пролет камер: 4, 3, 12, 20, 24, 30, 50 м. Объемный вес пород кровли –  $2,4 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, коэффициент Пуассона – 0,25, расстояние от поверхности до кровли горизонтального пласта – 70 м. Значения напряжений для всех вариантов представлены в таблицах (Приложение А).

Характерные эпюры напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  показаны на рис. 3.1. Хорошо прослеживается переход сжимающих напряжений в растягивающие.

Задача решена для весомой полуплоскости, то есть в центре каждого конечного элемента приложена сила, равная весу этого элемента, а также для невесомой полуплоскости.

Полученные нами решения сопоставлены с решениями подобной задачи аналитическими методами теории упругости. Последнее решение дано акад. А.Н. Динником и др. еще в 30-х годах для пластинки, ослабленной вырезом прямоугольной формы [69].

А.Н. Динник исследовал напряжения при различном отношении сторон отверстия без указания абсолютных размеров его [70]. Напряжения указывались в виде коэффициентов концентрации. Чтобы можно было сопоставить решения А.Н. Динника с нашими, все эти решения даны для

различных пролетов камер также в виде коэффициентов концентрации. на рис. 3.2.

Таким образом, представляется возможным сопоставить три решения одной и той же задачи о напряжениях в кровле камер, выполненные при различном построении расчетной схемы двумя различными методами (рис. 3.2).

Заметим, что каждое из этих решений в отдельности вызывает возражения. Так решение для одиночной камеры (кривая 1) нельзя без достаточных обоснований распространять на периодическую задачу с серией камер и целиков. Решение для невесомой среды (кривая 2), казалось именно в этом случае, может дать результат, отличный от такого же решения, но для весомой среды (кривая 3).

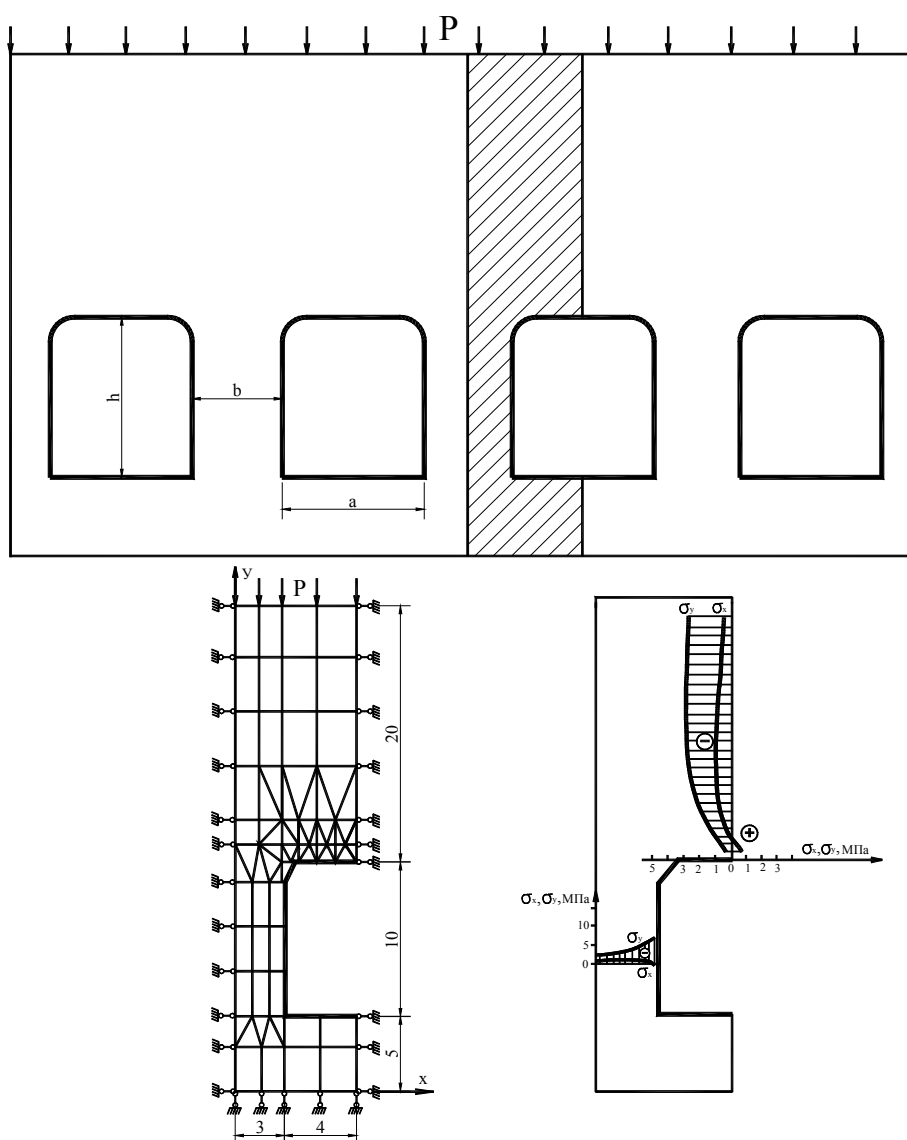


Рис.3.1. Расчетная схема и эпюры напряжений при исследовании влияния пролета камеры на напряжения в центре кровли

Прежде всего, необходимо отметить, что три решения дают общую закономерность совершенно одинаковую. В отдельных точках значения отличаются не более чем на 10-12 %. Такой разброс данных лежит в пределах точности подобных расчетов.

Существенный интерес представляет то обстоятельство, что напряжения в центре пролета растут значительно по мере увеличения пролета только до размера 25-30 м, а дальше они увеличиваются слабо [71].

Пользуясь графиком, можно рассчитать на прочность пролет камер с плоской кровлей. Нужно иметь в виду, что такой расчет справедлив только при плоской кровле. Придание кровле сводообразной формы уменьшает величину растягивающих напряжений и в этом случае пользоваться графиком нельзя.

Приведем пример расчета прочности камер для условий гипсовых рудников. Начальные условия следующие: глубина от поверхности до кровли пласта  $H = 70$  м, объемный вес пород  $\gamma = 2,4 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, разрушающее напряжение на растяжение для гипса  $147 \cdot 10^4$  Па. Примем пролет равным 5 м и определим запас прочности. По графику можно определить, что отношение  $\sigma_x / \gamma H = 0,3$ . Следовательно,  $\sigma_x = 493,9 \cdot 10^3$  Па. Запас прочности в этом случае равен 3. Такой запас прочности можно считать достаточным, следовательно, пролет 5 м отвечает условиям прочности.

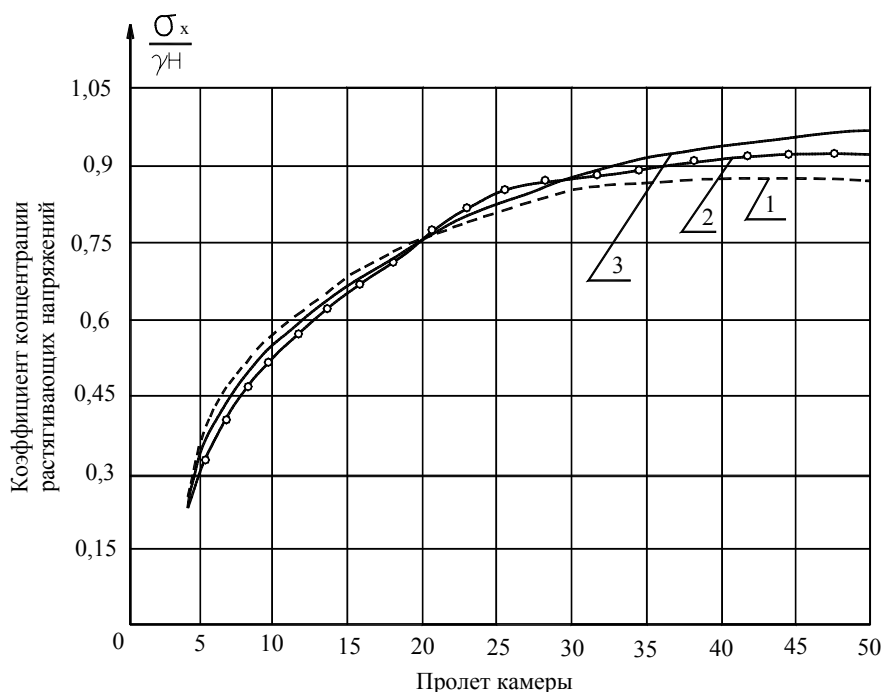


Рис.3.2. Зависимость растягивающих напряжений в кровле камер от величины пролета

Результаты расчета позволили предложить формулу для определения запаса прочности в плоской кровле камер и зависимости от величины пролета:

$$n = \frac{\sigma_{рас.}}{(l^{0,2} - 1)\gamma H},$$

где  $\sigma_{\text{рас}}$  – разрушающее напряжение на растяжение, Па;

$l$  – пролет камеры, м;

$\gamma$  – объемный вес пород, н/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина от поверхности до кровли, м.

Зная разрушающее напряжение на растяжение для породы, объемный вес, глубину разработки и пролет, можно судить о прочности камер выбранных размеров.

### 3.2. Влияние высоты камер на напряжения в междукамерных целиках

Изучению влияния размеров междукамерных целиков на напряжения в них посвящена работа В.В. Хмарского [72]. Автором проведено исследование моделей из эквивалентных материалов, нагруженных в центрифуге.

Для центробежного моделирования были приняты плоские модели в масштабе 1:375. Пролет камер и ширина целиков в натуре составляла 15 м. Высота камер изменялась от 30 до 150 м. Подобие модели натуре удовлетворялось соответствующим подбором эквивалентного материала по модулю упругости.

Моделировались четыре камеры. Полупроводниковые тензодатчики наклеивались на стенки междукамерных целиков. Результаты моделирования подтверждены замерами напряжений в целиках в натуре.

Автором сделан вывод, что напряжения в целиках зависят от высоты целиков при отношении высоты к ширине не более двух.

Следовательно, в расчетах на прочность камер можно не учитывать высоту целиков, если выполняется условие, что высота  $H$  и ширина целиков  $b$  соотносятся как  $H/b > 2$ .

Этот вывод позволяет для прочностных расчетов выбирать более простые расчетные схемы, не снижая точности вычислений.

### 3.3. Влияние ширины междукамерных целиков

При разработке месторождений камерно-столбовой системой приходится определять размеры целиков и пролетов камер, отвечающие условиям прочности. Такую задачу можно решить методом конечных элементов. Решение можно значительно упростить, если разбить эту задачу на две части, а именно, первоначально определить пролет камер как одиночной камеры, а затем рассчитать на прочность междукамерные целики. В действительности задача является периодической и напряжения в кровле камер зависят от ширины целиков. Упростить решение можно в том случае, если окажется, что при соотношениях, встречающихся в горнорудной практике, ширина целиков слабо влияет на напряжения в кровле камер.

Зависимость величины растягивающих напряжений в кровле камер от ширины целиков установлена путем решения серии задач методом конечных элементов.

Расчетная схема представлена невесомой пластинкой, ослабленной рядом прямоугольных отверстий. На рис.4.3 показана расчетная схема, удовлетворяющая условию периодичности задачи и эпюры напряжений для трех вариантов.

Приняты следующие исходные данные: расстояние от поверхности земли до кровли пласта  $H = 70$  м, высота камер равна мощности пласта и составляет 6 м, ширина камер – 8 м, модуль упругости полезного ископаемого –  $22,5 \cdot 10^9$  Па, коэффициент Пуассона – 0,25. Объемный вес –  $2,4 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>.

Напряжения в кровле камер определены при ширине целиков  $b = 1, 3, 5, 8, 10$  и 12 м.

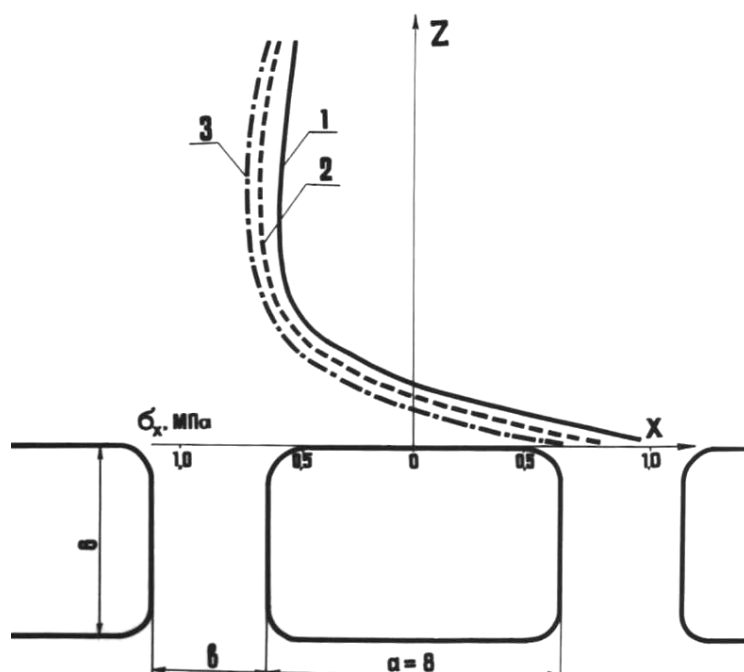


Рис.3.3. Влияние ширины целиков на напряжения в кровле камер

- 1 – ширина целиков 1 м
- 2 – ширина целиков 5 м
- 3 – ширина целиков 12 м

В периодически повторяющейся части расчетной схемы гравитационные силы представлены сосредоточенными силами в узлах конечных элементов, находящихся на горизонтальной границе полуплоскости. Вертикальные границы закреплены, и перемещение их исключено (рис.3.4).

Результаты исследований, представленные в таблицах (Приложения Б), а также в таблице 3.1 значений  $\sigma_x$  для кровли, позволяют судить о влиянии ширины целиков на напряжения в центре пролета камеры [73].

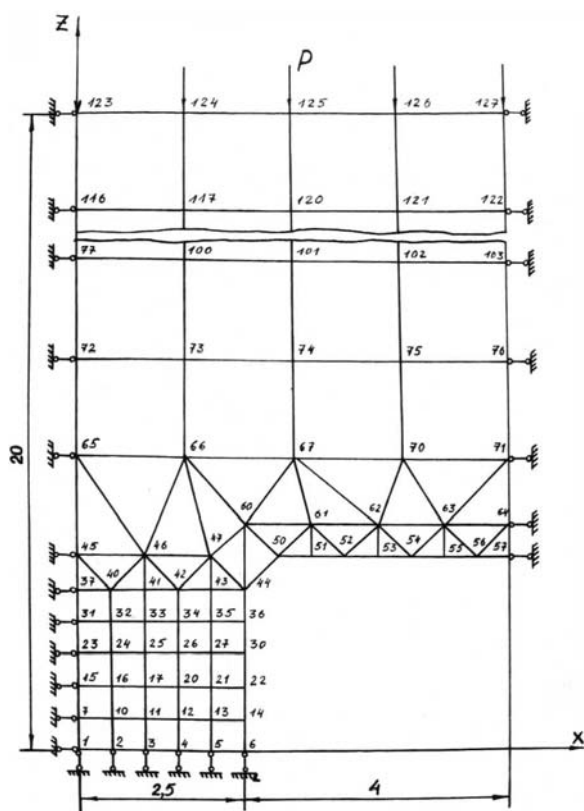


Рис.3.4. Расчетная схема для исследований влияния

Таблица 3.1

Растягивающие напряжения  $\sigma_x$  в кровле камеры в зависимости от ширины междукамерных целиков

Ширина целиков, м	1	3	5	8	10	12
Пролет камеры, м	8	8	8	8	8	8
Напряжения $\sigma_x$ в центре пролета камеры, $10^4$ Па	92,7	83,3	73,5	73,0	72,5	72,0
Напряжения $\sigma_x$ , %	100	90	79,2	78,7	78,2	77,7
Отношение ширины целика к пролету камеры.	0,13	0,38	0,63	1,0	1,25	1,5

Оказалось, что ширина целиков  $b$  оказывает влияние на напряжения в кровле камер только в том случае, если целик существенно меньше пролета камер  $a$ . Это влияние сказывается только в том случае, когда  $b/a < 0,6$ . В практике рудников отношение  $b/a < 0,4$  не встречается. При таком отношении напряжения в кровле серии камер на 12-15% больше, чем у одиночной камеры. Эта величина лежит в пределах точности подобных расчетов. Следовательно, в расчетах на прочность пролетов серии камер можно пользоваться данными о напряжениях, возникающих в кровле одиночной камеры, находящейся в

аналогичных условиях. Можно, конечно, в эти расчеты внести поправку в соответствии с данными табл. 3.8, если отношение  $b/a$ , близко к 0,4 или меньше этой величины.

### 3.4. Влияние высоты и формы свода на напряжения в кровле

Для условий Кременчугского железорудного месторождения произведем расчет на прочность кровли камер обогатительной фабрики для выбора формы кровли, отвечающей условиям длительной прочности.

Поставленная задача решалась методом конечных элементов. Камеры обогатительной фабрики расположены на глубине 950 м. Руда покрыта толщей наносов мощностью 420 м. Высота камер – 60 м, ширина – 30 м. Объемный вес руды –  $3,5 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, модуль упругости –  $10^5$  МПа, коэффициент Пуассона – 0,2.

Для выбора формы кровли, при которой напряжения в ней будут минимальными, решены три задачи.

Вариант I. Кровля плоская, радиус закругления углов 5 м. Результаты расчета сведены в таблицу 3.2. Расчетная схема и эпюры напряжений показаны на рис. 3.5.

Растягивающие напряжения в центре пролета равны 8,53 МПа. Разрушающее напряжение на растяжение для руды 13,4 МПа. Следовательно, запас прочности равен 1,57.

Вариант II. Для увеличения прочности кровли радиус закругления углов принят 7 м.

Данные по расчету приведены в таблице 3.3. Расчетная схема и эпюры напряжений показаны на рис. 3.5.

Растягивающее напряжение в центре пролета равно 8,43 МПа. Следовательно, запас прочности равен 1,59. Такой результат близок к полученному в предыдущем варианте. Следовательно, увеличение радиуса закругления углов плоской кровли не уменьшает растягивающих напряжений и в центре пролета. При этом снижается только концентрация касательных напряжений в углах кровли.

Вариант III. Кровле придана форма свода. Результаты расчета сведены в таблицу 3.4. Расчетная схема и эпюры напряжений представлены на рис. 3.5.

Растягивающее напряжение в центре пролета равно 6,65 МПа. Запас прочности равен 2, что удовлетворяет условиям прочности подземных конструкций.

Следовательно, можно сделать вывод, что увеличение радиуса закругления углов плоской кровли не вносит изменений в поле напряжений в центре пролета. Значительно снизить напряжения в центре пролета камеры позволяет придание своду коробовой формы.

Таблица 3.2

Значения напряжений для плоской кровли с радиусом закругления углов 5 м

Напряжения, МПа	
$\sigma_x$	$\sigma_y$
8,63	-2,17
7,84	-2,25
3,48	-3,15
4,80	-3,93
-1,15	-11,47
-5,42	-14,84
-7,45	-15,02
-7,16	-25,86
-6,95	-24,96

Таблица 3.3

Значения напряжений для плоской кровли с радиусом закругления углов 7 м

Напряжение, МПа	
$\sigma_x$	$\sigma_y$
8,43	-1,71
6,78	-1,65
3,06	-2,47
-3,26	-3,91
-6,11	-8,79
-7,78	-19,89
-6,14	-23,13
-6,46	-24,20
-5,09	-24,41



Таблица 3.4

Значения напряжений для сводчатой кровли камеры

Напряжение, МПа	
$\sigma_x$	$\sigma_y$
6,65	-1,09
6,39	-3,94
-7,15	-3,94
-7,39	-8,75
-6,10	-7,82
-7,79	-20,54
-5,99	-23,35
-5,40	-24,27
-5,06	-24,42

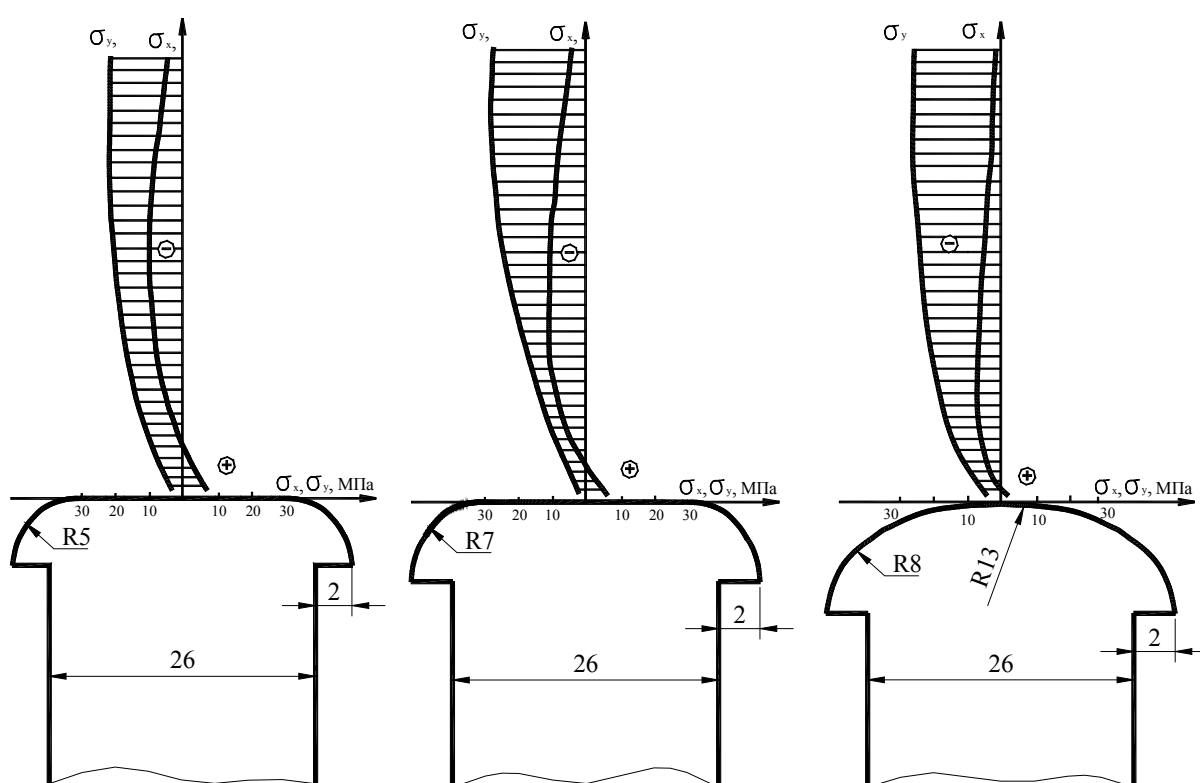


Рис.3.5. Влияние высоты и формы свода на напряжения в кровле камер

### 3.5. Определение высоты и формы свода естественного равновесия

Выбор такой формы кровли, при которой разрушающие силы будут минимальными, является важной задачей при обосновании размеров камер, так как обеспечит безопасное ведение работ под землей и максимально возможную добычу полезного ископаемого.

Принцип настоящего метода заключается в отыскании такой поверхности в кровле камер, на которой разность сдвигающих и удерживающих сил будет минимальной.

Область над кровлей камеры, соответствующую полупролету, разбивается на  $n$  вертикальных призм. На каждый элементарный участок кривой свода (рис.3.6) в выбранной системе координат действует вес призмы, который вызывает появление сил, стремящихся разрушить породы вдоль выбранного участка.

Используя методы механики сплошной среды, можно найти сдвигающие силы через компоненты напряжений, возникающих на участке.

Чтобы найти напряжение на наклонной площадке с углом наклона  $\varphi$ , воспользуемся формулами [75]:

$$\begin{aligned} X &= \sigma_x \cos \varphi + \tau_{xy} \cos(90^\circ - \varphi) \\ Y &= \tau_{xy} \cos \varphi + \sigma_y \cos(90^\circ - \varphi) \end{aligned} \quad (3.1)$$

где  $X$  и  $Y$  – составляющие полного напряжения на наклонной площадке. Полное напряжение на наклонной площадке определяется по формуле:

$$P = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (3.2)$$

Для определения оптимальной кривой свода необходимо найти минимум функции  $(F-R)$ , где  $F$  – удерживающие силы,  $R$  – сдвигающие силы, действующие на площадке в точках  $i$  и  $j$ . Полная сила  $R$ , действующая на площадке определяется через среднее значение напряжений действующих на площадке в точках  $i$  и  $j$ :

$$R = \frac{P_i + P_j}{2} l \quad , \quad (3.3)$$

где  $l$  – длина площадки, которая определяется через полупролет камеры, число призм и координаты начала и конца площадки.

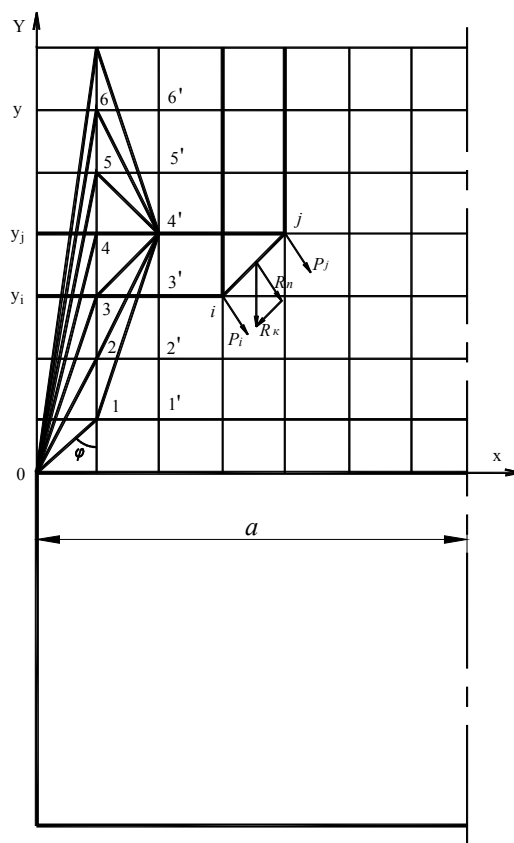


Рис.3.6. Схема для определения высоты и формы свода естественного равновесия

Алгоритм решения задачи основывается на отыскании минимума функции (3.4) с использованием метода динамического программирования [76]:

$$\min_{ij} (F - R) = \min_{ij} \left[ \frac{P_i + P_j}{2} \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (a/n)^2} (\cos \varphi - f \sin \varphi) + C \sqrt{(y_j - y_i)^2 + (a/n)^2} \right] \quad (3.4)$$

где  $P_i$  и  $P_j$  – определяются через значения напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  по формулам 3.1 и 3.2,  $f$  – коэффициент внутреннего трения пород,  $C$  – удельное сцепление,  $a$  – полупролет камеры,  $n$  – число призм,  $y_i$ ,  $y_j$  – координаты начала и конца площадки. С помощью метода потенциала можно определить напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  на координатных площадках.

Определяя значения функций  $(F-R)$  для всех возможных положений кривой свода (точки 1,2,3,4 и 1', 2', 3', 4') находим точки  $i$ , для которых значение функции будет минимальное. После проведения данных расчетов будут найдены точки на всех линиях, для которых значения функции (3.4) минимально и через которые пройдет кривая свода.

Используя вышеизложенный метод, построены кривые свода естественного равновесия для камер, находящихся в породах с объемным весом  $2,3 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, модулем упругости  $2 \cdot 10^9$  Па, коэффициентом Пуассона 0,25.

Глубина разработки менялась от 70 до 500 м.

По полученным результатам построена номограмма изменения высоты свода от глубины разработки, свойств породы и пролета камеры (рис.3.7).

Номограмма дает возможность, зная глубину разработки и пролет камеры, определить высоту свода и, тем самым, задавать оптимальную форму кровли камеры.

Ранее предполагалось, что за пределами этого свода породы не испытывают изменений и влияние выработки не сказывается. Породы внутри свода постепенно разрушаются. При этом высота свода определяется через величину пролета выработки и свойства породы и не зависит от расстояния выработки до земной поверхности. Несовершенство теории обнаружилось с переходом на большие глубины и большие сечения выработок.

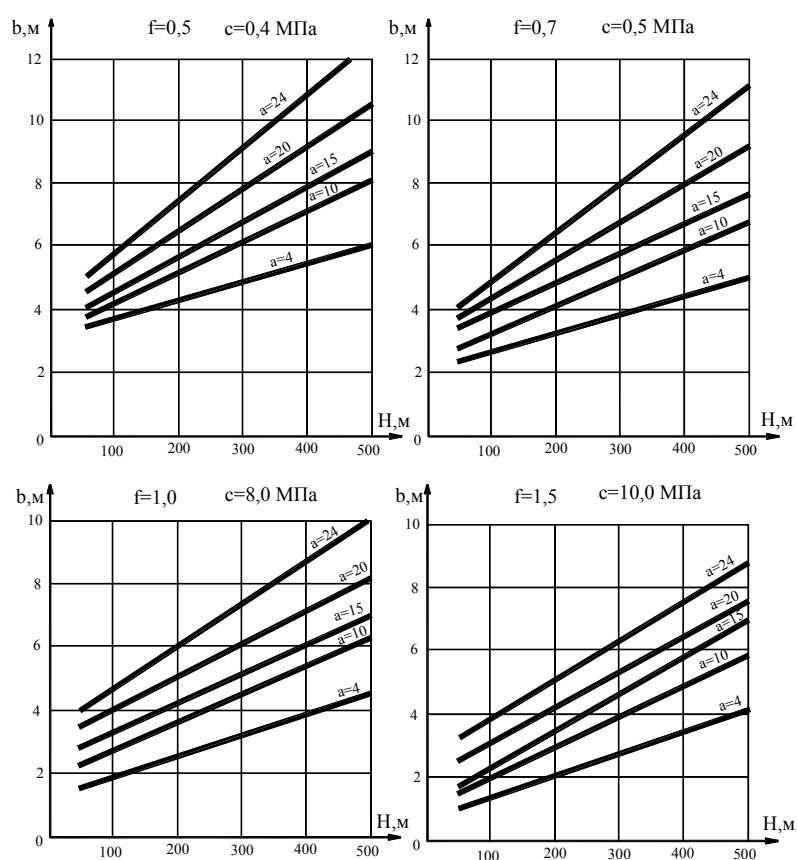


Рис.3.7. Номограмма зависимости высоты свода естественного равновесия от глубины разработки, свойств породы и пролета камеры

Предложенная в работе методика позволяет определять высоту свода естественного равновесия в зависимости от глубины работ, для выработок большого сечения и с учетом неоднородности пород, т.е. более полно учитываются реальные условия в породах, окружающих выработку.

## 4. РАСЧЕТ ПРОЛЕТОВ ПОДЗЕМНЫХ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ

### 4.1. Расчет для рудника им.Дзержинского (Кривбасс)

Используя численный метод потенциала, произведен расчет на прочность кровли и стенок камер подземной обогатительной фабрики для рудника им. Дзержинского.

Приняты следующие размеры камер: пролет – 15 м, высота – 30 м, свод высотой – 5 м. Камеры будут расположены на глубине 630 м.

Порода имеет следующие физико-механические свойства: разрушающее напряжение на сжатие – 155 МПа, на растяжение – 19 МПа, объемный вес –  $3,3 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, модуль упругости –  $7 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона – 0,17.

В расчетной схеме по левой и правой границам рассматриваемой области отсутствуют горизонтальные перемещения, поэтому эти границы шарнирно закреплены, распределенные нагрузки приложены по внешней горизонтальной линии.

Входные данные основываются на геометрии внешней границы, количестве задаваемых участков на фрагментах границы, нагрузках и координатах внутренних точек. При этом перемещения по произвольно заданному множеству внутренних точек определяются на основе заданной нагрузки и перемещений на границе.

Граница конструкции описана семью прямыми фрагментами и тремя фрагментами, представляющими собой части окружностей. Нумерацию фрагментов производим таким образом, чтобы область, занимаемая конструкцией, всегда оставалась справа. Совокупность данных описывавших геометрию всех фрагментов образует матрицу геометрии  $A (N, 5)$ , где  $N$  – общее число граничных фрагментов. Каждая строка этой матрицы характеризует  $i$ -й фрагмент.

Данные о граничных условиях и количестве элементарных участков на фрагментах вносятся в массив признаков границы  $JA(i, 1) = 1$ . Первый элемент  $i$ -й строки матрицы признаков является коэффициент, определяющий тип фрагмента границы.

Внешние усилия задаются в виде равномерно-распределенных нагрузок по фрагментам границы в матрице нагрузок  $AA (N, 3)$ . Для нанесения поля внутренних точек использованы сервисные подпрограммы. Матрицы имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} 1 & -7,5 & 0 & -17,5 & 0 \\ 1 & -17,5 & 0 & -17,5 & 60 \\ 1 & -17,5 & 60 & 17,5 & 60 \\ 1 & 17,5 & 60 & 17,5 & 0 \\ 1 & 17,5 & 0 & 7,5 & 0 \\ 1 & 7,5 & 0 & 7,5 & 25,2 \\ 60 & 4,0 & 4,0 & 25,2 & 30 \\ 60 & 11,4 & 0 & 18,6 & 90 \\ 60 & 4,0 & -4,0 & 25,2 & 150 \\ 1 & -7,5 & 25,2 & -7,5 & 0 \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{JA} = \begin{vmatrix} 1 & 10 & 5 & 1 \\ 1 & 20 & 5 & 1 \\ 1 & 15 & 0 & 1 \\ 1 & 20 & 5 & 1 \\ 1 & 10 & 5 & 1 \\ 1 & 20 & 0 & 1 \\ 3 & 4 & 0 & 1 \\ 3 & 9 & 0 & 1 \\ 3 & 4 & 0 & 1 \\ 1 & 20 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$\mathbf{AA} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ -1833 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Результаты расчета методом потенциала представлены в виде эпюр на рис. 4.1 и внесены в табл. 4.1.

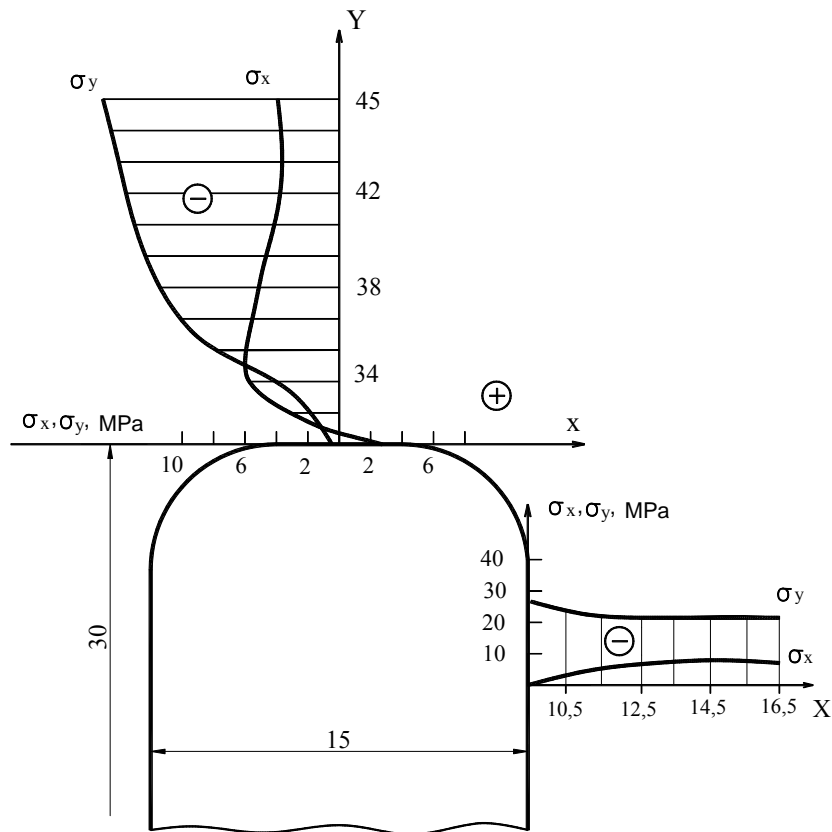


Рис.4.1. Расчетная схема и эпюры напряжений для камер подземной обогатительной фабрики на руднике им. Дзержинского

Таблица 4.1

Результаты расчета на прочность камер  
обогащительной фабрики методом потенциала

Координаты точек		$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
X	Y		
В кровле			
0	30	2,39	-0,32
0	31	-0,31	-0,63
0	32	-3,60	-1,90
0	33	-5,50	-3,53
0	34	-6,59	-5,26
0	35	-7,09	-6,94
0	36	-7,25	-8,49
0	37	-7,20	-9,89
0	38	-7,04	-11,10
0	39	-6,82	-12,18
0	40	-6,57	-13,10
0	41	-6,30	-13,90
0	42	-6,08	-14,58
0	43	-5,80	-15,12
0	44	-5,60	-15,68
0	45	-5,42	-16,10
В стенках			
8,5	15	-0,62	-26,70
10,5	15	-0,89	-24,28
12,5	15	-1,98	-23,59
14,5	15	-2,50	-23,41
16,5	15	-2,75	-22,44

Напряжения рассчитаны для 16 точек, расположенных вдоль вертикальной прямой через один метр в кровле камеры и 5 точек вдоль горизонтальной прямой в стенках.

Разрушающее напряжение на сжатие для руды равно 155 МПа, на растяжение – 19 МПа, структурная неоднородность породы учтена коэффициентом, равным 0,5 [77]. Растягивающее напряжение в центре кровли на границе равно 2,39 МПа. Следовательно, запас прочности в кровле равен 3,9. Максимальное сжимающее напряжение в стенках камеры равно 26,7 МПа, следовательно, запас прочности составит 2,9.

Полученные результаты удовлетворяют условиям длительной прочности конструкции, и рекомендуется создание подземных камер фабрики рудника им. Дзержинского с размерами: высота – 30 м, пролет – 15 м, свод высотой – 5 м. [78].

#### 4.2. Расчет для условий Кременчугского месторождения железистых кварцитов

Расчет на прочность камер подземной обогатительной фабрики Кременчугского железорудного месторождения произведен методом конечных элементов.

Обогатительная фабрика расположена на глубине 950 м. Высота камеры – 60 м, ширина – 20 м, свод высотой – 7 м. [ 79].

Разрушающее напряжение руды на сжатие 90 МПа, на растяжение 13,4 МПа. Объемный вес породы –  $3,5 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, модуль упругости –  $10^5$  МПа, коэффициент Пуассона равен 0,2.

Для расчета использован метод конечных элементов. Идеализированная схема конструкции разбита на конечные элементы, прямоугольные и треугольные (рис.4.2). В участках, где требуется установить напряжения более точно, произведено местное сгущение расчетной сетки.

Граничные условия следующие: по левой и правой границам рассматриваемой области отсутствуют горизонтальные перемещения, поэтому в узлах этих границ указаны закрепления. Распределенные нагрузки заменены сосредоточенными силами, приложенными в узлах по внешней горизонтальной линии.

Входные данные основываются на геометрии всех конечных элементов, координатах каждого узла, описании граничных условий каждого граничного узла, физико-механических характеристик каждого элемента, нагрузках. Напряжения и перемещения рассчитываются в центре тяжести каждого элемента.

Для оценки прочности конструкции достаточно знать распределение напряжений в центре пролета камеры и в стенках. Величины этих напряжений сведены в таблице 4.2. По этим данным построены эпюры напряжений (рис.4.2).

Разрушающее напряжение на сжатие для руды равно 90 МПа, сжимающее напряжение в стенках камеры равно 44 МПа, следовательно, запас прочности в стенках составит 2,1.

Разрушающее напряжение на растяжение равно 13,4 МПа, напряжение в центре пролета на высоте 0,5 м от кровли – 2,47 МПа, запас прочности в кровле составит 5,3.

Полученные запасы прочности в кровле и стенках камеры удовлетворяют условию длительной прочности. Следовательно, камеры выбранных размеров могут быть использованы для размещения в них обогатительной фабрики [80].



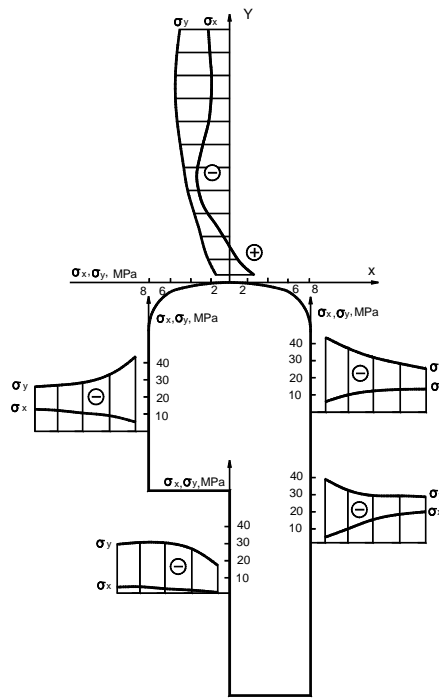


Рис.4.2. Эпюры напряжений для камер подземной обогатительной фабрики в условиях Кременчугского железорудного месторождения

Таблица 4.2

Результаты расчета на прочность камер обогатительной фабрики методом конечных элементов

Напряжения, МПа	
$\sigma_x$	$\sigma_y$
В стенках выработки	
-5,80	-32,14
-5,52	-33,09
-4,51	-35,75
-1,66	-39,32
-3,99	-31,47
-4,00	-31,98
-4,31	-32,83
-5,14	-44,02
В кровле выработки	
2,47	-0,30
-5,43	-0,37
-6,42	-2,96
-6,98	-14,16
-5,03	-9,86
-8,67	-22,71
-6,76	-22,90
-5,85	-23,65

### 4.3. Выбор метода решения

Интенсивно разрабатываемые методы приближенного расчета различных конструкций позволили преодолеть трудности, с которыми связано применение методов классической теории упругости, ввиду сложности контуров, ступенчатого изменения жесткости и т.д.

Кроме того, в аналитических расчетах получение точного решения связано с решением сложных дифференциальных уравнений. При этом приходится прибегать к идеализации свойств среды и схематизации геометрических форм. Современная же вычислительная техника позволяет строить математические модели весьма сложных объектов и исследовать поведение этих моделей в различных условиях.

Так метод конечных элементов позволил получить в механике горных пород решение самых сложных задач, таких, как исследование устойчивости горных выработок, анализ напряженно-деформированного состояния анизотропных пород горного массива и т.д. Однако использование его создает определенные трудности. Сложность граничных контуров, непостоянство физико-механических свойств, необходимость дискретизации всей рассматриваемой области приводит к значительной трудоемкости вычислительного процесса. Существенно упростить вычисления, не снижая их точности, позволил метод потенциала. Метод потенциала, примененный в работе для исследования напряженно-деформированного состояния подземных конструкций, основан на пофрагментном описании границы области. Каждый из фрагментов, описывающий определенный участок внешней границы рассматриваемой области, разбивается на участки. Перемещения и усилия на этих участках принимаются постоянными. Напряжения в любых произвольно выбранных точках внутри области находятся из уравнений, связывающих неизвестные величины с напряжениями на граничных участках. В отличие от метода конечных элементов, где вся исследуемая область разбивается на элементы конечных размеров, метод потенциала позволяет находить напряжение в любой внутренней точке области, разбив на участки только ее границу. Кроме того, метод потенциала позволяет исследовать напряжение на границе рассматриваемой области. Это важно, например, при расчетах на прочность кровли подземных выработок. Такое исследование невозможно методом конечных элементов, так как он позволяет получить напряжение только в центре тяжести каждого элемента.

Входные данные при использовании метода потенциала объединены в два файла. Первый файл включает в себе данные из трех матриц: геометрии (координат граничных фрагментов), признаков (закреплений границы), и нагрузок. Второй файл: координаты внутренних точек.

Таким образом, наиболее приемлемым методом решения горных задач на прочность подземных конструкций в объемной постановке является метод потенциала.

#### 4.4. Оценка прочности подземных камер

Полученные компоненты напряженно-деформированного состояния позволяют оценить прочность горных пород вокруг камер. При этом разрушение пород может быть описано различными компонентами состояния.

В предыдущих параграфах оценка прочности кровли и стенок камер проводилась с использованием первой теории прочности – теории наибольших нормальных напряжений. По этой теории разрушение пород наступает при достижении наибольшим нормальным напряжением допустимого значения. При этом влияние других компонентов тензора напряжений не учитывается. Поэтому, для более полного анализа прочности пород вокруг камер, была применена теория прочности О.Мора [81].

По условию прочности Мора разрушение пород определяется соотношением касательных и нормальных напряжений в каждой точке тела.

Условие прочности имеет вид:

$$\sigma_{\text{экв.1}} = \sigma_1 - \frac{\sigma_{\text{рас.}} \cdot \sigma_3}{\sigma_{\text{сж.}}} \leq \sigma_p$$
$$\sigma_{\text{экв.2}} = \frac{\sigma_1 \sigma_{\text{сж.}}}{\sigma_p} - \sigma_3 \leq \sigma_{\text{сж.}}$$

Использование методов конечных элементов и потенциала позволило получить компоненты напряженно-деформированного состояния  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  в каждой заданной точке вокруг камер.

Величины главных напряжений определялись по формулам [82]:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$
$$\sigma_3 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}$$

Таким образом, зная напряжения  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\tau_{xy}$  и определив  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ , учитывая условие прочности Мора, можно определить запас прочности в заданной точке вокруг камеры:

$$n_1 = \frac{\sigma_p}{\sigma_{\text{экв.1}}}; \quad n_2 = \frac{\sigma_{\text{сж.}}}{\sigma_{\text{экв.2}}}$$

Использование данного метода позволило получить поле запасов прочности в породах вокруг камер подземной обогатительной фабрики Кременчугского железорудного месторождения. Полученные значения запасов прочности для некоторых элементов внесены в табл. 4.3.

Из этих данных видно, что по мере удаления от контура кровли запасы прочности возрастают и минимальные их значения получены в углах, в центре кровли и стенках камеры.

По теории Мора в центре кровли камеры получен запас прочности 5,2, в стенках – 2,9.

По первой теории прочности получен запас прочности в кровле камеры 5,3, в стенках – 2,1.

Аналогичные расчеты запасов прочности были проведены для камер подземной обогатительной фабрики рудника им. Дзержинского. При этом запасы прочности по теории Мора в центре кровли – 3,9, в стенках – 3,6. По первой теории запасы прочности составили: в кровле 3,9, в стенках 2,9.

Таким образом, полученные запасы позволяют сделать вывод, что выбранные размеры камер удовлетворяют условиям длительной прочности конструкции.

При этом полученные запасы прочности по первой теории и по теории Мора в кровле отличаются незначительно. В стенках камер первая теория прочности дает запас прочности меньше. Поэтому, с достаточной для практики точностью, можно оценивать прочность центра кровли и стенок по первой теории прочности.

Для более полного анализа прочности камер необходимо, в соответствии со свойствами породы, использовать теории прочности, учитывающие и касательные, и нормальные напряжения в каждой точке вокруг исследуемой конструкции. Разработанная методика оценки прочности позволила, учитывая все компоненты тензора напряжений, получить запасы прочности в точках вокруг камеры. Тем самым, это позволило оценить соответствие условиям прочности не только центра кровли и стенок, но и всего контура камеры.

Таблица 4.3

Запасы прочности в точках вокруг камеры обогатительной фабрики

Запасы прочности	
В кровле выработки	В стенках выработки
5,2	3,4
5,4	3,0
6,9	2,9
9,5	3,3
10,0	3,2
6,7	3,8
1,8	3,5
6,9	2,9
6,7	2,9
14,0	3,3
10,0	5,2
5,3	3,0

## 5. ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ КАМЕР ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ

### 5.1. Условие перехода к решению задач в объемной постановке

Для установления границы влияния торцов камеры на напряжения в срединной плоскости кровли использовался метод потенциалов.

Решена серия задач для камер с различным отношением пролета к длине. Рассмотрены следующие отношения пролета камеры к длине: 1:7, 1:5, 1:4, 1:3, 1:2, 1:1. Камеры имеют высоту 6 м, пролет 6 м.

Физико-механические свойства породы следующие: модель упругости  $7 \cdot 10^3$  МПа, коэффициент Пуассона 0,2, объемный вес  $2 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>.

Результаты расчета представлены в таблице 5.1. Анализируя полученные результаты, можно сделать выводы, что при длине выработки, равной трем пролетам, дальнейшее увеличение длины не вносит изменений в напряженно-деформированное состояние срединной плоскости.

При решении задач на прочность камер с длиной меньше трех пролетов, необходимо использовать объемную расчетную схему.

Таблица 5.1

Напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  в центре пролета срединной плоскости сечения для различного отношения пролета камеры к длине

1:1		1:2		1:3		1:4		1:5		1:7	
$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
-0,20	-0,27	-0,19	-0,25	-0,19	-0,21	-0,19	-0,07	-0,185	-0,09	-0,19	-0,06
-0,36	-0,15	-0,34	-0,17	-0,46	-0,25	-0,47	-0,19	-0,48	-0,19	-0,48	-0,18
-0,31	-0,12	-0,31	-0,12	-0,47	-0,23	-0,49	-0,23	-0,49	-0,24	-0,5	-0,24
-0,25	-0,12	-0,23	-0,14	-0,43	-0,21	-0,45	-0,25	-0,46	-0,25	-0,47	-0,27
-0,22	-0,11	-0,2	-0,13	-0,39	-0,19	-0,43	-0,26	-0,43	-0,26	-0,44	-0,28
-0,39	-0,39	-0,32	-0,25	-0,43	-0,48	-0,41	-0,35	-0,41	-0,39	-0,40	-0,31
-0,25	-0,45	-0,23	-0,37	-0,41	-0,49	-0,39	-0,40	-0,4	-0,41	-0,39	-0,32

### 5.2. Сопоставление решений в условиях плоской задачи с решением в объемной постановке

Камеры подземной обогатительной фабрики рудника им.Дзержинского (Кривбасс) имеют размеры: пролет 15 м, длина 15 м, высота 30 м, свод высотой 5 м. При подобном соотношении размеров необходимо производить решение в объемной постановке.

Физико-механические свойства пород следующие: разрушающее напряжение на сжатие 155 МПа, на растяжение 19 МПа, объемный вес  $3,3 \cdot 10^4$

н/м<sup>3</sup>, модуль упругости  $7 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона 0,17, коэффициент структуры 0,5 [77]. Глубина разработки 650 м.

В расчетной схеме левая и правая границы расчетной схемы закреплены от горизонтальных перемещений, а нижняя - от вертикальных. Верхняя граница нагружена весом вышележащих пород. Схема представлена одиночной выработкой в массиве горных пород (рис.5.1). Напряжения рассчитывались в центре кровли и стенках камеры. Действие касательных напряжений в углах снижено за счет закругления углов.

Решение задачи сопоставлялось с решением в плоской постановке для одинаковых сечений. Результаты сопоставления приведены в таблице 5.2.

По полученным данным сделаны выводы, что замена объемного состояния плоским для камер ограниченной длины дает погрешность около 20 %.

Разрушающее напряжение на сжатие для руды равно 155 МПа, коэффициент структуры 0,5. Следовательно, запас прочности для стенок камер подземной обогатительной фабрики в условиях объемной постановки равен 3,6, для плоской постановки 2,9.

Разрушающее напряжение на растяжение равно 19 МПа, коэффициент структуры – 0,5.

Следовательно, запас прочности для кровли камер в объемной постановке равен 3,4, в плоской – 3,9.

В целом по решению задач в объемной постановке сделаны выводы, что характер распределения напряжений вокруг камер в объемной постановке близок к характеру напряженно-деформированного состояния в плоской постановке.

Распределение напряжений в плоскости стенки выработки мало отличается от результатов решения плоской задачи. В стенках камеры возникают максимальные сжимающие напряжения  $\sigma_z$ , величина которых уменьшается по мере удаления от выработки. Напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  возрастают при приближении к центру кровли. Максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  возникают в серединной части выработки. По мере удаления от выработки напряжения при решении объемной и плоской задач близки.

### **5.3. Выбор формы камеры подземной обогатительной фабрики**

Размеры камер обогатительной фабрики заданы определенными технологическими соображениями и могут изменяться в ограниченных пределах. Форма же камер может быть различной. Для выбора формы камеры, отвечающей условиям длительной прочности, исследованы камеры с поперечным сечением в форме квадрата и круга, т.е. камеры имеют форму параллелепипеда и цилиндра (рис.5.2).

Размеры камер следующие: радиус поперечного сечения цилиндрической камеры и сторона основания камеры в виде параллелепипеда 15 м, высота камер 30 м, свод высотой 5 м. Результаты решения для камер различных форм приведены в таблице 5.3.

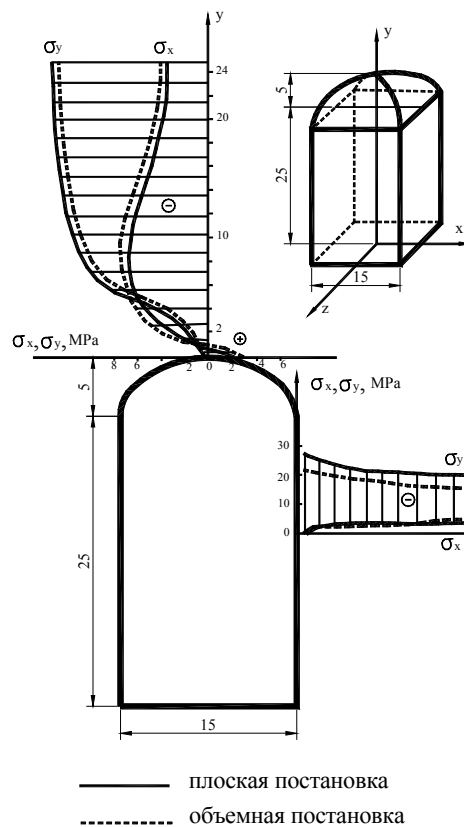


Рис.5.1. Сопоставление результатов решения задачи в плоской и объемной постановках

Таблица 5.2  
Результаты расчета на прочность камер обогатительной фабрики  
в объемной и плоской постановках

Плоская постановка		Объемная постановка	
$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
В кровле			
2,39	-0,32	2,86	-0,20
-0,30	-0,63	-2,21	-0,41
-3,60	-1,90	-5,20	-2,10
-5,50	-3,50	-6,55	-3,20
-6,60	-5,30	-7,12	-5,00
-7,10	-6,90	-7,34	-6,70
-7,30	-8,50	-7,37	-8,30
В стенках			
0,62	-26,70	0,40	-21,12
-0,89	-24,28	-0,75	-21,05
-1,98	-23,59	1,47	-20,54
-2,50	-23,41	-2,30	-19,28
-2,70	-22,40	-2,95	-16,97

Так как поперечные сечения камер представляют собой правильные геометрические фигуры, то продольные сечения, параллельные плоскостям  $uox$  и  $uoz$ , находятся в одинаковых условиях и их напряженно-деформированные состояния одинаковы. В связи с этим анализ результатов проводили только для одной плоскости сечения  $uox$ .

Рассмотрение полученных результатов показало, что характер распределения напряжений для выбранных форм камер одинаков, а численные значения компонентов напряжений отличаются в некоторых точках на 10 %.

Максимальные растягивающие напряжения  $\sigma_x$  и  $\sigma_y$  возникают в центре кровли камер. При этом для выработки цилиндрической формы растягивающее напряжение равно 2,55 МПа, а для выработки в форме параллелепипеда – 2,86 МПа, т.е. разница составляет 11 %.

По мере удаления от кровли камеры напряжения для обеих форм отличаются незначительно.

Максимальные сжимающие напряжения  $\sigma_z$  возникают в стенках камер и для цилиндрической формы составили 19,3 МПа, а для выработки в форме параллелепипеда 21,1 МПа, что дает разность около 10 %. В целом компоненты напряженно-деформированного состояния пород для цилиндрической выработки ниже, что позволяет рекомендовать такую форму для камер обогатительной фабрики.

Запасы прочности для камер в виде параллелепипеда составят: для кровли 3,3, для стенок 3,6. Запасы прочности для цилиндрической камеры с учетом коэффициента структуры составят: для кровли – 3,7, для стенок – 4.

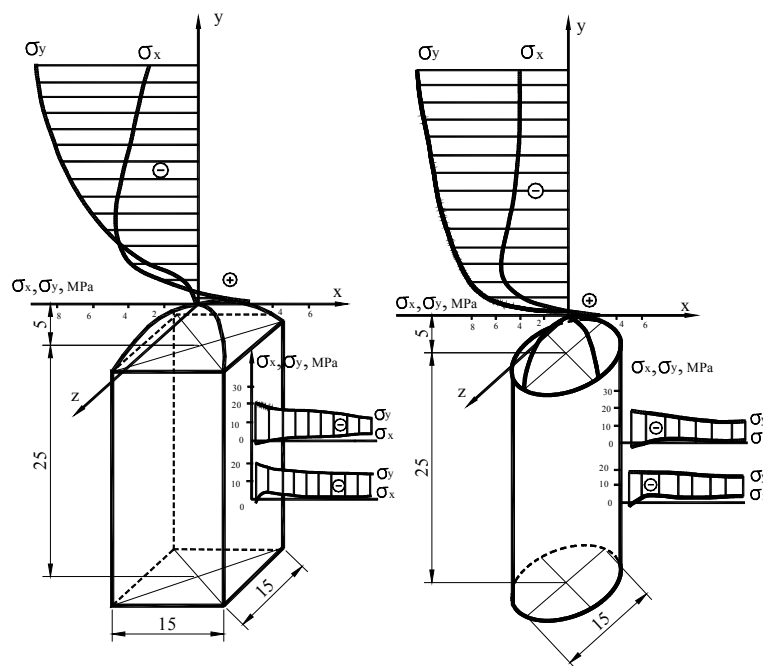


Рис.5.2. Выбор формы камеры подземной обогатительной фабрики



Таблица 5.3

Значения напряжений для камер в форме параллелепипеда и цилиндра

Параллелепипед		Цилиндр	
$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа	$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
В кровле			
2,86	-0,20	2,55	-1,10
-2,21	-0,41	0,14	-6,40
-5,20	-2,10	-7,28	-6,70
-6,55	-3,20	-6,79	-6,90
-7,12	-5,00	-6,90	-7,50
-7,34	-6,70	-6,61	-10,1
-7,37	-8,30	-6,40	-11,0
-6,89	-12,00	-6,39	-12,3
В стенках			
0,40	-21,12	0,43	-19,30
-0,75	-21,05	-0,35	-19,07
-1,47	-20,54	-1,20	-18,08
-2,30	-19,28	-2,10	-16,11
-2,95	-16,97	-2,60	-13,07

#### 5.4. Расчет на прочность очистных камер наклонного пласта

После проведения очистных работ, образовавшиеся камеры могут быть использованы для размещения в них складов, оборудования и т.д., то есть очистные камеры могут использоваться, как камеры специального назначения. В них может быть расположена и подземная обогатительная фабрика.

Для оценки прочности очистных камер в наклонном пласте произведен расчет методом потенциала в объемной постановке.

Расчетная схема представлена изотропным массивом породы, ослабленным рядом отверстий. На рис.5.3 показана расчетная схема, удовлетворяющая условию периодичности задачи и эпюры напряжений.

Приняты следующие исходные данные: высота камер 30 м, ширина 15 м, длина 15 м, свод высотой 5 м, ширина целиков 20 м, модуль упругости  $7 \cdot 10^4$  МПа, коэффициент Пуассона 0,17, объемный вес  $3,3 \cdot 10^4$  н/м<sup>3</sup>, глубина разработки 650 м. Угол наклона пласта 60°.

В периодически повторяющейся части расчетной схемы вертикальные границы закреплены от горизонтальных перемещений, а нижняя – от вертикальных.

Результаты исследований представлены в таблице 5.4, и по ним построены эпюры напряжений (рис.5.3).

Результаты решения сопоставлены с решением для горизонтального пласта с камерами, находящимися в аналогичных условиях.

Установлено, что напряжения в центре пролета камер горизонтального и наклонного пластов отличаются незначительно.

Максимальные сжимающие напряжения возникают в породах висячего бока и отличаются от максимальных сжимающих напряжений в стенках камер горизонтального пласта на 18 %, от напряжений в породах лежачего бока на 13%.

Максимальное сжимающее напряжение в стенках висячего бока составило 16,33 МПа, разрушающее напряжение на сжатие для руды равно 155 МПа, коэффициент структуры 0,5. Запас прочности равен 4,7.

Максимальное растягивающее напряжение в кровле камер равно 2,67 МПа, разрушающее напряжение на растяжение для руды равно 19 МПа, коэффициент структуры 0,5, запас прочности равен 3.5.

Такие запасы прочности удовлетворяют условиям длительной прочности конструкции и камеры, находящиеся в подобных условиях, могут быть использованы как камеры специального назначения.

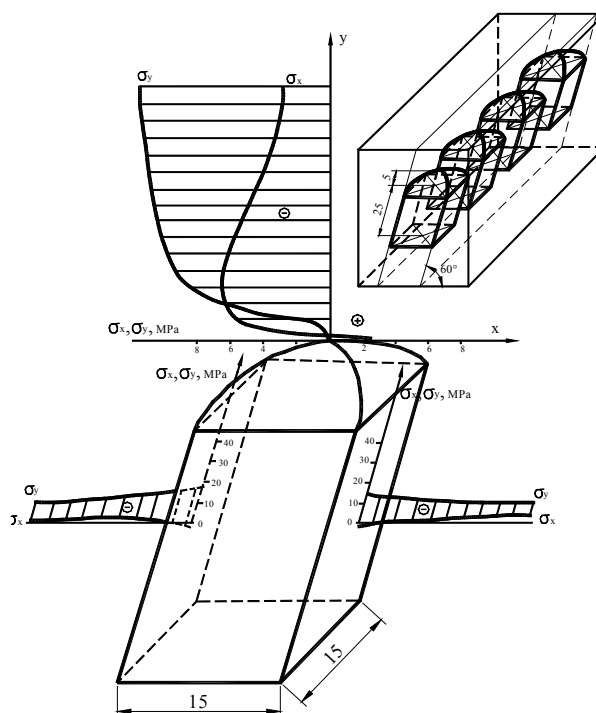


Рис.5.3. Эпюры напряжений для очистных камер в наклонном пласте

В целом решение задач в объемной постановке показало, что напряжения в кровле камер при решении объемных задач больше, чем при решении плоских. Это связано с тем, что в объемной постановке камеры имеют соизмеримые размеры, и напряжения в центре кровли увеличиваются за счет близости углов с большой концентрацией напряжений. Так как закругление углов в камере в форме параллелепипеда приводит к образованию формы близкой к

цилиндрической, а разница в напряжениях в центре кровли камер цилиндрической формы и при решении плоской задачи менее 2 %, то это и подтверждает сделанный вывод о влиянии концентрации напряжений в углах камеры.

Напряжения в станках камер при решении задач в объемной постановке меньше, чем при решении в плоской. Это можно объяснить тем, что в объемной задаче вес пород над камерой распределяется на массивы пород с четырех сторон камеры, а в плоской - на массивы пород с двух сторон.

Погрешность при замене объемного состояния плоским составила около 20% для максимальных напряжений.

Таблица 5.4

Результаты решений для очистных камер в наклонном и горизонтальном пластах

Наклонный пласт				Горизонтальный пласт	
$\sigma_x$ , МПа		$\sigma_y$ , МПа		$\sigma_x$ , МПа	$\sigma_y$ , МПа
В кровле					
2,67		-0,07		2,94	-0,20
-2,11		-1,88		-2,21	-0,41
-4,79		-4,62		-5,20	-2,10
-5,85		-7,08		-8,55	-3,20
-6,19		-9,04		-7,12	-5,00
-6,24		-10,6		-7,34	-6,70
-6,17		-11,9		-7,37	-8,30
-6,06		-12,3		-6,89	-12,0
В стенках					
Висячий бок	Лежачий бок	Висячий бок	Лежачий бок		
2,04	1,34	-16,33	-14,24	1,20	-20,02
1,92	1,14	-16,26	-13,90	1,90	-17,50
1,34	0,44	-16,12	-13,50	0,34	-17,14
0,56	-0,54	-15,82	-12,94	-0,75	-17,02
-0,25	-1,69	-10,09	-11,99	-2,39	-14,20
-1,04	-2,90	-10,55	-10,36	-2,75	-12,39

### 5.5. Результаты проведенных исследований

В работе проведены исследования по выбору и обоснованию размеров камер специального назначения на примере подземных обогатительных фабрик рудника им. Дзержинского и для условий Кременчугского железорудного месторождения.

Изучены некоторые общие закономерности формирования поля напряжений вокруг камер в плоской постановке: влияние пролета, и ширины целиков и формы кровли на напряжения в центре пролета камер. Это позволило предварительно выбрать размеры камер специального назначения. Камеры, предварительно выбранных размеров, в соответствии с проведенными исследованиями и с учетом размещаемого технологического оборудования, были исследованы на прочность методами потенциала и конечных элементов. При этом установлено, что камеры выбранных размеров соответствуют условиям длительной прочности, для оценки которой была использована теория прочности Мора. Определение тензора напряжений в заданных точках вокруг камер позволило получить запасы прочности не только в центре кровли и стенок, но и по всему контуру камеры.

Так как камеры специального назначения обычно сложной формы или соизмеримых размеров, то исследование их на прочность необходимо производить в объемной постановке.

Ряд исследований проведен с использованием объемных расчетных схем методом потенциала Ю.В. Верюжского. Эти исследования позволили рекомендовать для камер специального назначения форму, приближенную к цилиндрической, если она будет приемлема по технологическим условиям. Также доказана возможность использования очистных камер в наклонном пласте железистых кварцитов рудника им. Дзержинского как камер специального назначения.

Сопоставление результатов решения задач в объемной и плоской постановке показало, что расхождение в результатах при замене объемной постановки плоской составляет около 20 % для максимальных значений напряжений.

Проведенные исследования позволили рекомендовать для камер подземных обогатительных фабрик рудника им. Дзержинского пролет 15 м, для Кременчугского железорудного месторождения – 20 м.

Результаты исследований были использованы институтом Механобрчермет при составлении проектных решений по созданию подземной обогатительной фабрики на Кременчугском железорудном месторождении. Рекомендованы дальнейшие разработки в этом направлении и создание опытно-промышленного участка на руднике им. Дзержинского.

В настоящей работе расчеты, имеющие практическое значение, произведены для проектируемого Кременчугского подземного горно-обогатительного комбината [83]. Поэтому ожидаемый экономический эффект определяется как прибыль, которая будет получена после создания такого комбината.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов механики сплошной среда позволило исследовать напряженно-деформированное состояние пород вокруг камер большой и ограниченной длины. На основе этих исследований обоснованы размеры камер подземной обогатительной фабрики.

Основные выводы в работе заключаются в следующем:

1. Исследовано напряженное состояние пород вокруг подземных камер в плоской и объемной постановках. Показано, что в объемной постановке напряжения в кровле получаются больше, а в стенках меньше чем в плоской постановке. Объясняется это влиянием концентрации напряжений в углах камер. Расхождение между решениями в плоской и объемной постановках достигает 20%.

2. Исследовано напряженное состояние пород вокруг камер подземных обогатительных фабрик рудника им. Дзержинского и для условий Кременчугского железорудного месторождения методом конечных элементов и методом потенциала. Обоснованы пролеты камер: для рудника им. Дзержинского 15 м., для условий Кременчугского месторождения 20 м. Сопоставление различных методов определения напряжений, возникающих в породах вокруг камер, показало, что наиболее совершенным для решения горных задач является метод потенциала.

3. Предложена новая форма оценки соответствия пород вокруг камер условиям прочности: в каждом элементе, на которые разбивается сечение, вычисляется запас прочности, причем напряжения оцениваются по теории прочности Мора.

4. Исследованы некоторые общие закономерности формирования поля напряжений вокруг камер большой длины. Установлено, что напряжения в кровле камер растут по мере увеличения пролета до 20-25 м. При дальнейшем увеличении пролета напряжения остаются почти неизменными. На основании этих исследований предложена формула для определения запаса прочности в плоской кровле камер.

Показано, что ширина целиков оказывает влияние на напряжения в кровле камер только в том случае, когда отношение ширины целиков к пролету меньше 0,6.

Установлено, что напряжения в кровле камер зависят от формы свода. Изучена плоская кровля камер с различными радиусами закругления углов и в форме коробового свода. Наименьшие напряжения подучены при коробовой форме свода.

5. Предложена методика определения размеров и формы свода естественного равновесия, основанная на сопоставлении удерживающих и сдвигающих сил. Показана зависимость высоты свода от глубины работ.

6. В объемной постановке исследованы на прочность камеры различной формы. Установлено, что напряжения вокруг камер цилиндрической формы на 10-12% меньше чем вокруг камер в форме параллелепипеда. Это позволяет рекомендовать для подземных камер форму, приближенную к цилиндрической, если она будет приемлема по технологическим условиям.

7. Исследованы напряжения вокруг очистных камер в наклонном пласте железистых кварцитов в условиях рудника им. Дзержинского. Задача решена в объемной постановке. Показано, что эти камеры могут быть использованы как камеры специального назначения.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А.1  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 4 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности.		
3,56	-3,44	-2,77
-5,22	-5,91	-4,24
-6,49	-4,10	-2,46
-7,10	-9,27	-2,46
-5,36	-14,64	-1,59
-5,40	-18,22	-1,12
-5,09	-18,63	-0,61
-2,60	-17,72	-0,47
В целике		
-3,71	-32,45	-1,59
-3,09	-36,12	-4,72

Таблица А.2  
Значения напряжения для камер с  
пролетом 3 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
7,41	-2,69	-0,21
2,05	-0,7	-0,88
1,89	-1,74	-0,88
-5,03	-4,88	-2,45
-7,36	-12,59	-3,49
-6,09	-16,30	-1,25
-4,95	-17,08	-0,38
-4,44	-16,79	-0,09
В целике		
-5,90	-44,32	-2,60
-4,85	-50,28	-7,45

Таблица А.3  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 12 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
11,37	-4,90	-2,74
1,35	-1,69	-0,19
-2,39	-1,92	-3,16
-7,27	-8,37	-3,57
-7,16	-13,60	-2,02
-5,87	-15,92	-0,94
-5,36	-16,53	-0,34
В целике		
-9,02	-55,69	-4,06
-7,79	-65,74	-12,09

Таблица А.4  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 20 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
10,91	-2,63	-1,17
7,92	-1,74	-0,92
7,85	-2,81	-1,37
2,17	-2,75	-2,78
-6,35	-5,01	-4,69
-8,40	-11,55	-4,25
-7,19	-15,22	-2,43
-5,80	-16,59	-1,19
-5,31	-16,72	-0,46
В целике		
-15,14	-87,61	-6,74
-13,04	-103,63	-19,61

Таблица А.5  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 24 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
11,57	-2,50	-0,68
9,02	-2,09	-0,79
4,16	-2,34	-1,75
-7,03	-5,47	-4,22
-8,87	-12,36	-3,54
-7,26	-16,05	-1,93
-5,75	-17,13	-0,84
-5,90	-16,88	-0,29
В целике		
-19,02	-107,48	-8,81
-15,89	-127,16	-23,98

Таблица А.6  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 30 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
14,37	-3,29	-1,18
11,59	-2,37	-0,76
6,25	-3,67	-2,74
-0,23	-3,59	-4,47
-5,03	-7,21	-2,06
-4,95	-14,13	-7,83
-7,35	-17,66	-1,11
-5,12	-17,16	-0,25
В целике		
-23,96	-134,86	-11,36
-20,18	-160,69	-30,83

Таблица А.7  
Значения напряжений для камер  
с пролетом 50 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
16,86	-3,50	-0,66
11,77	-1,47	-0,11
11,76	-1,56	-0,11
6,91	-1,94	-1,20
-8,62	-4,25	-4,68
-11,44	-10,08	-5,09
-10,82	-14,68	-4,01
-9,16	-17,34	-2,65
-7,58	-18,45	-1,63
-6,38	-18,55	-0,97
-5,59	-18,02	-0,56
-5,27	-17,09	-0,24
В целике		
-51,41	-248,85	-23,45
-49,21	-311,61	-73,29



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблица Б.1  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 1 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
9,27	-3,22	-1,44
2,05	-3,85	-3,05
-5,87	-6,83	-5,10
-6,74	-16,12	-3,61
-5,66	-18,43	-1,11
-5,13	-19,09	-0,28
-4,91	-19,22	-0,06
В целике		
-2,77	-174,52	-0,67

Таблица Б.2  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 3 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли камеры до поверхности		
8,33	-2,85	-1,25
1,99	-3,38	-2,66
-5,49	-5,85	-4,55
-7,25	-14,62	-3,78
-6,22	-17,65	-1,53
-5,45	-18,81	-0,53
-5,13	-19,16	-0,62
В целике		
13,75	-61,55	-3,58
-13,93	-66,39	-13,03
-12,65	-85,99	-20,93

Таблица Б.3  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 5 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре кровли до поверхности		
7,35	-2,63	-1,21
1,40	-3,19	-2,55
-5,37	-5,64	-4,31
-7,29	-13,87	-3,60
-6,49	-17,01	-1,68
-5,74	-18,51	-0,71
-5,46	-19,09	0,26
В целике		
-12,51	-43,21	-1,19
-3,03	-43,68	-1,68
-0,26	-50,42	-2,04
1,43	-50,31	-3,62
10,22	-73,67	7,16

Таблица Б.4  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 8 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре до поверхности		
7,30	-2,49	-1,07
1,99	-2,95	-2,27
-4,47	-5,05	-3,91
-7,18	-12,46	-3,37
-6,89	-15,90	-1,91
-6,51	-17,88	-1,04
-6,73	-18,93	-0,46
В целике		
-10,22	-28,51	-0,03
-10,29	-29,50	-0,048
-10,14	-32,15	-0,52
-9,02	-37,62	-1,79
-5,38	-48,16	-5,57

Таблица Б. 5  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 10 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре до поверхности		
7,25	-2,61	-1,10
2,45	-3,12	-2,31
-5,79	-6,89	-4,34
-7,24	-12,39	-3,09
-6,95	-15,77	-1,84
-6,74	-17,79	-1,06
-7,18	-18,89	-0,43
В целике		
-9,45	-26,25	0,04
-9,56	-26,82	0,05
-9,68	-28,19	0,0001
-9,65	-30,99	-0,43
-8,65	-36,47	-1,68
-5,21	-46,93	-5,39

Таблица Б.6  
Значения напряжений для камер  
с шириной целиков 12 м

Напряжения, $10^5$ Па		
$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\tau_{xy}$
В центре до поверхности		
7,20	-2,40	-0,91
2,10	-3,45	-1,20
-6,31	-5,71	-3,35
-7,54	-10,20	-1,80
-6,33	-14,80	-1,72
-6,29	-17,30	-1,10
-6,40	-19,74	-0,90
В целике		
-6,32	-25,31	0,01
-6,73	-27,40	0,06
-7,10	-29,46	-0,43
-7,95	-37,50	-0,95
-6,90	-44,90	-4,78

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Напряженно-деформированное состояние пород, окружающих заполненные закладкой крутопадающие очистные выработки большой высоты на руднике С.С.А (г. Кобар, Австралия). – В кн.: Горнорудная промышленность: М.: Экспресс-информация, 1976. – № 2. – С. 15-25.
2. Мухелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Изд. АН СССР, 1954. – 707 с.
3. Савин Г.Н. Напряжения в упругой плоскости с бесконечным рядом равных вырезов. // Доклады АН СССР. – 1939. – Т.23. – № 6. – С. 58-67.
4. Авершин С.Г., Груздев В.Н. Распределение напряжений вокруг горных выработок. – Фрунзе, 1971. – 130 с.
5. Шерман Д.И. К вопросу о напряженном состоянии междукамерных целиков. // Известия АН СССР. – 1952. – № 6. – С. 840-857.
6. Айталиев И.М., Изаксон В.Ю. Массивы горных пород в окрестности выработки несимметричного сечения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1979. – № 3 – С. 28-33.
7. Шерман Д.И. Весомая среда, ослабленная периодически расположенными отверстиями круговой и некруговой формы // Инженерный журнал. – 1962. – № 1. – С. 16-18.
8. Космодамианский А.С. К вопросу определения напряженного состояния упругой среды с криволинейными отверстиями // Прикладная механика. – 1966. – Т.2. – Вып.8. – С. 65-71.
9. Космодамианский А.С. Упругое равновесие анизотропной пластинки с конечным числом эллиптических отверстий. – Изв. АН Арм.ССР, т.13, 1960, № 6, С 15-19.
10. Космодамианский А.С. Упругое равновесие изотропной пластинки, ослабленной конечным числом криволинейных отверстий // Прикладная механика. – 1961. – Т.7. – Вып. 6. – С. 81-97.
11. Абрамян Б.Л. К плоской задаче теории упругости для прямоугольника // Прикладная механика. – 1957. – Т.21. – Вып. I. – С. 93-98.
12. Годоров М.М. О решении плоской задачи теории упругости для прямоугольника посредством двойных тригонометрических рядов // Изв. АН СССР. – 1959. – № 4. – С. 17-24.

13. Назаренко В.М. Устойчивость горизонтальной горной выработки в массивах с трансляционным упрочнением // Прикладная механика. – 1981. – № 9. – С. 124-127.
14. Лабазин В.Г., Николаева Л.Б. Исследование распределения давления на целик со стороны многослойной кровли // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л. – 1980. – № 6 – С. 46-48.
15. Кайданов Н.Н., Лабазин В.Г. Упругая деформация слоистого массива над прямоугольной выработкой в случае жесткого и упругого опорного контура // Устойчивость и крепление горных выработок. – Л. – 1980. – № 6. – С. 32-38.
16. Алимжанов М.Т., Жанатаев К.Т. Об упругопластическом напряженном состоянии массива, ослабленного двумя протяженными круговыми выработками // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 1981. – № 1. – С. 20-24.
17. Каюнов М.А. Применение метода граничного элемента для оценки возможных зон разрушения слоистого массива вокруг подземной полости // Изв. АН Каз.ССР. – Алма-Ата. – 1981. – № 11. – Рукопись деп. в ВИНТИ. – С. 314-81.
18. Ковалев О.В. Напряженно-деформированное состояние целиков при разработке калийных месторождений с применением камерных систем // В кн.: Зап. Ленинград. горн. ин-та. – 1980. – С.124-128.
19. Михлин С.Г. О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР. – Сер. ОТН. – 1942. – № 7. – С. 13-28.
20. Баренблатт Г.И. Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. – Сер. ОТН. – 1955. – № 11. – С. 73-86.
21. Кузнецов С.В. Об управлении кровлей горной выработки. – В кн.: Математические методы в горном деле. ч. II, Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963, С.33-59.
22. Амусин Б.З. Метод конечных элементов при решении задач горной геомеханики. – М.: Недра, 1975. – 143 с.
23. Ержанов Ж.С. Метод конечных элементов в задачах механики горных пород. – Алма-Ата: Наука, 1975. – 238 с.
24. Зенкевич О.Н. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 539 с.
25. Парашкевов Р., Андреев Г., Григоров С. Исследование напряженного состояния около круглой подземной выработки. – Техника, 1981, № 14, С. 59-64.

26. Ляпцев С.А. Исследование напряженного состояния горных пород вокруг вертикальной выработки методом конечных элементов. – Изв. ВУЗов. Горн.журнал, 1981, № 10, С. 23-25.
27. Миренков В.Е. Об одном методе решения пространственных задач. – Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых, 1980, № 4, С.97-101.
28. Миренков В.Е. Связь напряжений и смещений на контуре выработки. – Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых, 1978, № 3, С. 19-23.
29. Бертольд Е., Фрейтаг К., Власенко Б.В. Применение экспериментально-аналитического метода для определения пространственного напряженно-деформированного состояния кровли при разработке калийных месторождений ГДР. – Физико-технич. Проблтыvs разработки полезных ископаемых, 1979, № 2, С. 10-16.
30. Гриценко Г.И., Власенко Б.В. Пространственный экспериментально-аналитический метод определения механического состояния массива горных пород. – Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых, 1977, № I, С. 3-11.
31. Кавлакан М.В. Об одном методе решения пространственных неосесимметричных задач об опорном давлении. – Физ.-технич.пробл. разработки полезных ископаемых, 1981, № 6, С. 17-27.
32. Цырульников М.Н. О распределении напряжений в породах кровля впереди забоя. – Научн. сообщения. Ин-т горного дела ям. А.А.Скочинского, 1981, № 196, С. 56-61.
33. Шкелев Л.Т. Приближенный метод решения пространственной задачи теории упругости. Сопротивление материалов и теории сооружений. – Киев, 1980, № 37, С. 64-67.
34. Маркелов Г.И. Исследование деформации упругого массиве в форме параллелепипеда. - Йошкар-Ола, 1980, с.8. – Рукопись представлена Марийским политехн. ин-том.Деп. в ВИНТИ,1980, № 35.
35. Резников М.А. Задача оценки устойчивости откосов горных пород в объемной постановке. – Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых, 1980, №9 6, С. 15-19.
36. Резников М.А. Объемная задача оценки устойчивости откосов горных пород. Магнитогорск, горно-металлургический ин-т. – Свердловск-Магнитогорск,1978, с.59. – Рукопись представлена Уральским политех. ин-том. Деп. в ин-те "Черметинформация", № 579.

37. Асамидинов Ф.М., Кулиев Г.Г. Устойчивость горного массива, 1980, 16, № 14, С.125-128.
38. Дериглазов Л.В. К устойчивости горизонтальной выработки в ортотропном массиве при неравномерном сжатии. – Прикладная механика, 1979, № 2, С. 99-102.
39. Исследование устойчивости горизонтальных и вертикальных горных выработок / Акопян Ж.С., Бабич И.Ю., Гузь А.Н., Навеян А.В. – В кн.: Теоретическая и прикладная механика, 1981, № 12, С. 99-104.
40. Большаков А.Ю., Елтышев В.А., Поздеев А.А. Об одном подходе к решению трехмерных задач теории упругости. – В кн.: Краев. задачи. – Пермь, 1979, С. 54-57.
41. Мирсалимов В.М. Равнопрочная выработка в горном массиве. – Физико-технич. проблемы разработки полезных ископаемых, 1979, № 4, С. 24-23.
42. Миренков Г.Н. Напряженное состояние анизотропного пласта. – Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1978, № II, С. 31-34.
43. Гениев Г.А. Пространственная задача о напряженно-деформированном состоянии грунтовых массивов при подземных выработках. – Строительная механика и расчет сооружений, 1978, № 6, С. 6-11.
44. Подильчук Ю.Н., Ткаченко В.Ф. О напряженном состоянии ненарушенного пласта и окружающих пород. – Прикладная механика, 1978, № 12, С. 38-46.
45. Влох Н.П., Зубков А.В., Лешков В.П. Совершенствование методики определения напряжений с помощью объемного фотоупругого моделирования. – Физ.-техн. проблемы разработки полезных ископаемых, 1978, № 4, С. 98-101.
46. Маруашвили М.В. Исследование напряженного состояние массива вокруг сопряжения горных выработок методом фотоупругости. – Научн. сообщения. Ин-т горного дела им.Скочинского, 1981, № 196, С. 130-131.
47. H.-A. Crostack, W.R. Fisher, G.Kinze. Analysis by optical methods. "Prod. Liabil.and Reliabil Proc. Joint Conf. Brit. Soc. Strain Meas and Inst. Prod. Eng. Vol. 2. –Birmingham, 1980,pp. 1-20 discuss.
48. W.G. Pariseau, W.K. Sorensen. 3d mine pillar design information from 2nd FEM analysis //Int. J. Numer. And Anal. Math. Geom., 1979, 3, N2, pp. 145-157.
49. Гнучий Ю.Б., Квитка А.Л., Цыбенко А.С. К вопросу деформирования уравнений метода конечных элементов при решении трехмерных задач. – Проблемы прочности, 1979, № 5, С.18-21.

50. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. – Киев: Наукова думка, 1976. – 315 с.
51. Кильчевский Н.А. Основы аналитической механики оболочек. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. – 354 с.
52. Михлин С.Г. Многомерные сингулярные интегральные уравнения. – М.: Физматгиз, 1962. – 254 с.
53. Шерман Д.И. Метод интегральных уравнений в плоских и пространственных задачах статической теории упругости. – В кн.: Труды II Всесоюзного съезда по теоретической и прикладной механике. – М.: Изд-во АН СССР, 1962, С. 14-59.
54. Купрадзе В.Д. Методы потенциала в теории упругости. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
55. Трехмерные задачи математической теории упругости и термоупругости / В.Д. Купрадзе, Т.Г. Гегелиа, М.О. Башелейшвили, Т.В. Бурчуладзе. – М., Наука, 1976, С.627.
56. Александров А.Я. Решение основных задач теории упругости путем численной реализации метода интегральных уравнений. – В кн.: Успехи механики деформируемых сред. – М.: Наука, 1975, С. 3-44.
57. Александров А.Я., Зиновьев Б.М. Приближенный метод решения плоских и пространственных задач теории упругости для тел с армирующими элементами и разрезами. – В кн.: Механика деформируемых тел и конструкций. – М.: Машиностроение, 1975, с. 15-25.
58. Векслер Ю.А., Жданкин Н.А., Колоколов С.Б. Решение пространственной задачи теории упругости для подготовительной выработки. – Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых, 1981, № 4, С. 15-23.
59. Лихачев В.А., Флейшман Н.Т. Первая основная задача для упругого полупространства, произвольно нагруженного по прямоугольным площадкам. – Сопротивление материалов и теория сооружений. – Киев, 1980, № 36, С. 57-60.
60. Миренков В.Е., Цицаркин В.Н. Напряженное состояние в окрестности шахтного ствола. – В кн.: Крепление и охрана горных выработок. – Новосибирск, 1981, С. 10-12.
61. Верюжский Ю.В. Численные методы потенциала в некоторых задачах прикладной механики. – Киев: Вища школа, 1978. – 182 с.
62. Швецов П.Ф., Зильберборд А.Ф. Под землю, чтобы сберечь Землю. – М.: Наука, 1983. – 143 с.

63. Капица П.Л. Эксперимент, теория, практика. – М.: Наука. 1981, – 446 с.
64. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Finite Element Method: Volume 1 – The Basis. Butterworth Heinemann, London, 2000. – 712 pp.
65. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L., Finite Element Method: Volume 2 – Solid Mechanics. Butterworth Heinemann, London, 2000. – 480 pp.
66. Городецкий Л.С. Инструкция к программе "Мираж". – Киев: Изд. ин-та Гипрохиммаш, 1971. – 105 с.
67. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики, т.2. – М.: Гостехиздат, 1945. – 544 с.
68. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
69. Динник А.Н., Моргаевский А.Б., Савин Г.Н. Распределение напряжений вокруг подземных горных выработок. – В кн.: Труды совещания по управлению горным давлением. – М.: Академиздат, 1939, С. 714.
70. Исследования по обоснованию основных параметров камерно-столбовой системы разработки для условий гипсовых рудников, обеспечивающих безопасное ведение очистных работ / С.Г. Борисенко, В.И. Бузило, Т.С. Савельева, Е.А. Морозов. – В кн.: Охрана труда и природной среда при добыче и обогащении полезных ископаемых. Таллин, 1982, С. 161-162.
71. Борисенко С.Г., Савельева Т.С. Исследование напряжений в кровле камер в зависимости от величины пролета. – Изв. ВУЗов. Горный журнал, 1983, № 5, С. 25-30.
72. Хмарский В.В. Выбор рациональной высоты камер при разработке мощных крутых рудных месторождений. - Автореферат кандидатской диссертации. – Днепропетровск: ДГИ, 1981. – 20 с.
73. Савельева Т.С. Влияние ширины междукамерных целиков на напряжения в кровле камер в условиях камерно-столбовой системы разработки. – Днепропетровск, 1984, с. 5. – Рукопись депонирована в УкрНИИТИ, № 684 Ук-84 Деп.
74. Борисенко С.Г. Вскрытие и системы разработки рудных месторождений. – Киев: Вища школа, 1977. – 294 с.
75. Самуль В.И. Основы теории упругости и пластичности. – М.: Высшая школа. 1970. – 288 с
76. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. – М.: Наука, 1969. – 117 с.
77. Строительные нормы и правила. Подземные горные выработки. – М.: Стройиздат, 1982. – 30 с.



78. Савельева Т.С. Определение размеров камер специального назначения при разработке железорудных месторождений. – Днепропетровск. 1984. с. 10, – Рукопись представлена Днепропетров. горным ин-том в УкрНИИТИ, 1984, № 685 Ук–84 Деп.
79. Борисенко С.Г., Бузило В.И., Савельева Т.С. Расчет на прочность методом конечных элементов подземной обогатительной фабрики. – В кн.: Исследование, прогноз и контроль проявления горного давления. М.: МГУ, 1982. С. 29-30.
80. Борисенко С.Г., Бузило В.И., Савельева Т.С. Подземный горно-обогатительный комбинат с размещением отходов обогащения (хвостов) под землей. – В кн.: Охрана труда и природной среды при добыче и обогащении полезных ископаемых, – Кохтла-Ярве: Знание, 1982, С. 225-226.
81. Турчанинов И.А., Иофис М.А., Каспарьян Э.В. Основы механики горных пород. – Л.: Недра, 1977. – 503 с.
82. Степин П.А. Сопротивление материалов. – М.: Высшая школа, 1968. – 423 с.
83. Подземный горно-металлургический комбинат / С.Г. Борисенко, В.И. Кармазин, В.П. Мартыненко и др. – Metallургическая и горнорудная промышленность, 1980, № I. – С. 49-52.

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О КАМЕРАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ .....	12
1.1. Очистные камеры .....	12
1.2. Камеры специального назначения .....	12
2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ .....	18
2.1. Основы метода конечных элементов .....	18
2.2. Основы метода потенциала .....	21
3. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ КАМЕР БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ .....	25
3.1. Исследование напряжений в кровле камер .....	25
3.2. Влияние высоты камер на напряжения в междукамерных целиках .....	28
3.3. Влияние ширины междукамерных целиков .....	28
3.4. Влияние высоты и формы свода на напряжения в кровле .....	31
3.5. Определение высоты и формы свода естественного равновесия .....	34
4. РАСЧЕТ ПРОЛЕТОВ ПОДЗЕМНЫХ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ФАБРИК В УСЛОВИЯХ ПЛОСКОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ .....	37
4.1. Расчет для рудника им.Дзержинского (Кривбасс) .....	37
4.2. Расчет для условий Кременчугского месторождения железистых кварцитов .....	40
4.3. Выбор метода решения .....	42
4.4. Оценка прочности подземных камер .....	43
5. ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ ВОКРУГ КАМЕР ОГРАНИЧЕННОЙ ДЛИНЫ .....	45
5.1. Условие перехода к решению задач в объемной постановке .....	45
5.2. Сопоставление решений в условиях плоской задачи с решением в объемной постановке .....	45

5.3. Выбор формы камеры подземной обогатительной фабрики.....	46
5.4. Расчет на прочность очистных камер наклонного пласта .....	49
5.5. Результаты проведенных исследований .....	51
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	53
ПРИЛОЖЕНИЕ А .....	55
ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....	57
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	59
СОДЕРЖАНИЕ .....	66

Наукове видання

**Бузило** Володимир Іванович  
**Савельєва** Тамара Степанівна  
**Савельєв** Володимир Андрійович  
**Сердюк** Володимир Петрович

**ОБҐРУНТУВАННЯ РОЗМІРІВ КАМЕР СПЕЦІАЛЬНОГО  
ПРИЗНАЧЕННЯ ПРИ РОЗРОБЦІ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОПАЛИН**

Монографія

(Російською мовою)

Видано за редакцією авторів

Підп. до друку 13.03.2013. Формат 30x42/4.  
Папір офсет. Ризографія. Ум. друк. арк. 3,9.  
Обл.-вид. арк. 4,9. Тираж 300 пр. Зам. №

Підготовлено до друку та видруковано  
в Національному гірничому університеті.  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004 р.

49005, м. Дніпропетровськ, просп. К. Маркса, 19.