



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**им. И.РАЗЗАКОВА**

**КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СТРОИТЕЛЬСТВА,**

**ТРАНСПОРТА И АРХИТЕКТУРЫ им.Н.ИСАНОВА**

На правах рукописи  
УДК 624.012

**СУЙУНТБЕКОВА ИНДИЙКА АМАНТАЕВНА**

**ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МОДУЛЕЙ  
ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ И ИХ БЛОКОВ**

**Специальность 05.23.17 – строительная механика**

**Диссертация на соискание ученой степени**

**кандидата технических наук**

**Научный руководитель**

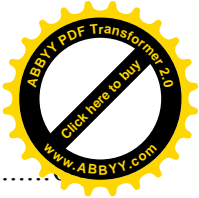
**д.т.н., профессор Кутуев М.Д.**

**Бишкек - 2013**



# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>ОГЛАВЛЕНИЕ</b> .....	2
<b>ВВЕДЕНИЕ</b> .....	4
<b>ГЛАВА 1. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД СКЛОНОВ ГОР В ЗОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ</b> .....	9
1.1. Решение задачи механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов в программном пакете MathCad. ....	9
1.1.1. Расчет матрицы жесткости системы.....	15
1.1.2. Решение системы уравнений. ....	18
1.2. Алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород склонов гор и бортов карьеров.....	23
1.2.1. Расчет напряженного состояния массивов пород бортов карьера .....	27
1.2.2. Расчет напряженного состояния массивов пород склонов гор .....	31
1.2.3. Расчет напряженного состояния массивов пород.....	33
<b>ВЫВОДЫ по главе I.</b> .....	37
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДИКА, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ МАССИВОВ ПОРОД БОРТОВ КАРЬЕРА И СКЛОНОВ ГОР</b> .....	39
2.1. Критерии оценки разрушения бортов карьера и склонов гор.....	39
2.2. Оценка устойчивости склонов гор и бортов, нагорных карьеров.....	47
<b>ВЫВОДЫ по главе II.</b> .....	49
<b>ГЛАВА 3. УПРАВЛЕНИЕ НДС ПЛОТИН НА СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕШЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ</b> .....	53
3.1. Выбор программного обеспечения для реализации моделирования гидротехнических сооружений .....	53
3.1.1. Компьютерное моделирование в расчете плотин .....	55
3.2. Устойчивость плотин против сдвига и прочность их скальных оснований.....	58
3.3. Гашение энергии при режиме свободноотброшенной струи.....	66
3.4. Воздействие температуры на арочные плотины.....	68



3.4.1. Температурный режим арочных плотин .....	
3.4.2. Стационарный процесс .....	69
3.5. Метод центробежного моделирования.....	69
<b>ВЫВОДЫ по главе III .....</b>	<b>73</b>
<b>ГЛАВА 4.РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ .....</b>	<b>78</b>
4.1.Описания языка базы знаний.....	77
4.2.Использование сервера MATLAB .....	87
4.3.Структура базы данных .....	939
4.4.Описание Web – сайта информационной системы.....	94
<b>ВЫВОДЫпо главе IV .....</b>	<b>95</b>
<b>ГЛАВА 5.РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЯЕМОГОПРОЕКТА.....</b>	<b>100</b>
5.1.Состав эксплуатационных расходов .....	97
5.2.Расходы на содержание персонала.....	97
5.3.Расходы на функционирование программы.....	97
5.4.Расчеты на накладные расходы .....	98
5.5.Прочие расходы.....	98
5.6.Расчет экономии за счет увеличения производительности труда инженера- проектировщика.....	99
5.7.Расчет экономического эффекта.....	100
<b>ВЫВОДЫпо главе V.....</b>	<b>101</b>
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>106</b>
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....</b>	<b>108</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ 1 .....</b>	<b>121</b>



## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** С момента перехода к оседлому образу жизни человек стал строить гидротехнические сооружения из-за неравномерной трансформации стока рек по времени года. Поэтому развитие таких наук, как физика, математика, астрономия, а в настоящее время этот список дополнили компьютерные технологии, способствует совершенствованию гидротехнических сооружений [1]. Кыргызстан богат горными реками, которые обогащаются водой вследствие таяния ледников. Снижение дефицита энергопотребления, обеспечение оросительной водой населения и хозяйств регионов решаются в основном за счет строительства и эксплуатации гидротехнических сооружений в горных и предгорных районах на территории Кыргызстана. Регулирование горного речного стока во времени является необходимым условием обеспечения безопасности жизнедеятельности населения, существования и эффективности работы аграрного сектора экономики. В настоящее время недостаточно полно развит механизм полноценного использования водных ресурсов.

Кроме этого, климатические условия большей части Кыргызстана приводят к тому, что при эксплуатации гидротехнических сооружений возникают проблемы, связанные с обмерзанием металлических конструкций и их элементов. Особенно это относится к высокогорным зонам, где рентабельно строительство сооружений малых ГЭС, так как морозный период здесь длится не менее 6–8 месяцев (с октября по апрель). Зимой деривационные каналы гидроэлектростанции страдают из-за шугообразования, обмерзания механического оборудования (в частности, затворов водозаборных сооружений), забивки льдом, а также неправильной эксплуатации сооружений ГЭС [2].

Технический прогресс во многих отраслях промышленности неразрывно связан с широким применением вычислительной техники, систем связи и интернета. В настоящее время ведутся интенсивные исследования и разра-



ботки различных пакетов прикладных программ для определения параметров геомеханических процессов, происходящих в массиве горных пород при ведении строительных работ (напряжённо-деформированное состояние массива, смещение и разрушение отдельных областей массива, влияние горноинженерных воздействий на состояние массива, развитие процессов разрушения пород вокруг гидротехнических сооружений во времени, взаимодействие крепи с разрушенными породами и ее влияние на напряженное состояние и смещения пород и т.д.). Ключевым условием решения подобных задач является широкое применение вычислительной техники и современных программных комплексов, которые позволяют выполнить постановку весьма сложных плоских и объёмных задач горного давления путём использования метода конечных элементов, новых теорий прочности и совершенных алгоритмов.

Однако существующие программные разработки наталкиваются на значительные сложности, что обусловлено вероятностным и малодостоверным характером исходных данных, необходимостью учёта сложного иерархического и неоднородного строения массива, технологическими особенностями сооружения и эксплуатации горных разработок и их вариациями во времени и пространстве и т.д.

Эти задачи решаются на стыке различных научных и информационных методов, поскольку требуют обобщения разнообразной информации, подходов к учёту комплекса гидрологических, водохозяйственных, экономических, экологических, юридических вопросов оптимизации использования ресурсов рек. Следовательно, для управления вычислениями в сети, накопления и хранения научных данных, систематизированной обработки имеющейся информации, проектирования математических моделей, анализа и выдачи правильного решения требуется использование мощных компьютерных интернет-технологий, основанных на информационных системах, базах знаний и экспертных системах. Использование таких технологий приводит к доста-



точно полному и глубокому исследованию технической эксплуатации гидротехнических сооружений.

Создание информационных систем для разработки данного класса технических сооружений, имеющих важное народно-хозяйственное значение, является актуальной задачей. Кыргызстан имеет возможность постройки крупных и мелких гидротехнических сооружений в горной местности, разработка которых слабо оснащена средствами автоматизации на базе информационных и экспертных систем[7]. Применение автоматизированных систем позволит ускорить процесс и найти новые решения в области строительства гидротехнических сооружений.

**Цель и задачи исследования.** Основной целью диссертационной работы является оптимизация элементов гидротехнических сооружений и их оснований через совершенствование методики расчета с применением современных информационных технологий и возможностей компьютерной графики для визуализации выходных данных.

– Моделирование и расчет геомеханических объектов гидротехнических сооружений на основе современных численных методов с использованием компьютерных технологий.

– Выявление преимуществ привлечения методов аналитического программирования для получения расчетных формул с учетом характеристик пород оснований плотин.

– Определение влияния состояния изменений температурных характеристик на различные блоки гидротехнических сооружений с применением метода конечных элементов.

**Научная новизна полученных результатов:**

– Предложена методика по расчету элемента сооружения через исследование напряженно-деформированного состояния плотин на основе современных численных методов с трехмерной визуализацией результатов с использованием новых компьютерных технологий.



– Приведено решение класса задач по исследованию моделей конструкции плотин с привлечением альтернативных методов моделирования.

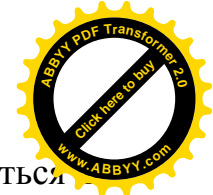
– Разработано моделирование основания плотин при изменении температурных режимов.

– Применена расчетно-информационная система на основе современных технологий PHP и MySQL, предназначенная для накопления и обработки данных исследований по расчету гидротехнических конструкций и использования их в процессе эксплуатации.

**Практическая значимость полученных результатов** состоит в том, что разработаны программы на встроенном языке программирования MATLAB, которые позволяют в расчете оснований плотин определять внутренние усилия, перемещения и напряженно-деформированное состояние с использованием сплайн-интерполяции в рамках вариационного подхода. Разработана информационная система, пригодная для управления автоматизации отдельных этапов расчета с представлением результатов в виде трехмерных изображений с наиболее оптимальными параметрами просмотра.

**Апробация результатов диссертации.** Основные результаты диссертационной работы были опубликованы в научных изданиях: «Наука и новые технологии» (Бишкек, 2008г.), Международной конференции по распространению упругих и упругопластических волн, посвященной 100-летию со дня рождения академика, Героя Социалистического Труда Х.А.Рахматулина (Бишкек, 2009г.), «Информационные технологии в строительной механике» (Бишкек, УСТА, 2010г.), докладывались на республиканских и международных конференциях: III Международной научной конференции «Рахматулинские чтения» (Бишкек, 2011г.), Интернет-журнале ВАК Кыргызской Республики (Бишкек, 2012г.), Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы механики сплошных сред» (Бишкек, 2012г.), «Вестник КРСУ» (Бишкек, 2013г.).

**Реализация работы:** разработанные автором методики использования программного обеспечения в математическом моделировании и использова-



нии численных методов расчета характеристик плотинмогут применяться в качестве учебного материала для практических занятий студентов (Акт о внедрении результатов диссертационной работы в учебный процесс КГУСТА за №482/01 14.05.2013г). В дальнейшем накопленный материал может быть использован в интеллектуальных информационных системах, связанных с проектированием ограждающих конструкций (Акт о внедрении результатов диссертационной работы в процесс работы Мелиоративная гидрогеологическая экспедиция за №232 от 01.11.2013г) и Чуйского Бассейнового управления водного хозяйства (Акт о внедрении №01/570 от 29.10.2013г).

**Публикации.** Основные научные результаты, полученные в диссертации, отражены в 9-ти печатных работах, в том числе 4 статьи в соавторстве.

**Структура и объем работы:** Диссертация состоит из введения, 5х глав, заключения- всего 122страниц, а также списка литературыиз 113 наименования и приложения.

**Личный вклад соискателя:** Постановка задачи и направления исследований осуществлялись совместно с научным руководителем проф. М.Д.Кутуевым. Автору принадлежит численная реализация уравнений, описывающих расчет модулей гидротехнических сооружений, расчет и визуализация результатов с применением встроенного языка программирования математических пакетов MATLAB и MathCAD; создание информационной системы расчетов и математических моделей гидротехнических сооружений на основе сетевых технологий.





## ГЛАВА 1. РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД СКЛОНОВ ГОР В ЗОНАХ РАСПОЛОЖЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ.

В практике горного производства и при проектировании гидротехнических сооружений приходится выполнять расчет напряженно деформированного состояния горных пород скальных оснований бортов сооружений, которые, в большинстве случаев, включают поиск решения краевой задачи теории упругости в постановке плоской деформации. При этом наличие полостей неправильной формы, сложная конфигурация расчетной области, физическая неоднородность и анизотропия свойств материала исключительно затрудняют либо делают невозможным нахождение решения в аналитическом виде. Поэтому при решении таких задач получили распространение численные методы, среди которых наиболее совершенным является метод конечных элементов (МКЭ).

Преимущества МКЭ не подлежат сомнению, когда возникает необходимость учета в расчетах сложных свойств материала, разнообразных граничных условий для областей сложной конфигурацией. Программы, реализующие МКЭ, как правило, относятся к классу «тяжелых» САД-систем и обычно являются дорогостоящими. Поэтому для исследователя с небольшим опытом представляют интерес более доступные средства. Для инженера, не являющегося в то же время опытным программистом, удобным инструментом может стать пакет MathCad.

### **1.1. Решение задачи механики деформируемого твердого тела методом конечных элементов в программном пакете MathCad.**

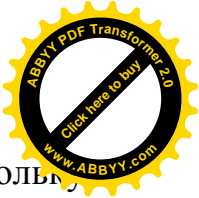
При решении различного класса задач проектирования моделей гидротехнических сооружений конструкторы очень часто сталкиваются со сложными расчетами напряженно деформированного состояния массива горных пород оснований, который в большинстве случаев включает поиск решения краевой задачи теории упругости в постановке плоской деформации. При



этом сложная конфигурация расчетной области, физическая неоднородность и анизотропия свойств материала исключительно затрудняют либо делают невозможным нахождение решения в аналитическом виде. Поэтому при решении таких задач получили распространение численные методы, среди которых наиболее совершенным является метод конечных элементов (МКЭ). Использование, которого можно рассматривать как некую совокупность конструктивных элементов отдельных блоков гидротехнических сооружений, соединенных в конечном числе узловых точек. Если известны соотношения между силами и перемещениями для каждого отдельного элемента, то, используя методы строительной механики, можно описать свойства и исследовать поведение конструкции в целом. При разбиении сплошного тела на отдельные элементы предполагается, что взаимодействие между ними происходит в узловых точках, в которых действуют фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов и сосредоточенные в узловых точках (рис. 1.1.а).

Исходя из постановки задачи (расчет напряжений деформаций твердого тела) можно предположить, что математическая модель должна иметь большую площадь, две степени свободы (перемещение элементов конечно-узловой сетки происходит только по двум координатам  $X$  и  $Y$ ), при этом на тело должны действовать поперечные узловые силы, вызывающие деформацию. Остаточные напряжения и напряжения, возникшие во время действия силы  $P$  (рис. 1.1.б). Решение такой задачи при минимизации потенциальной энергии сводится к применению метода Ритца. Следовательно оптимальный вариант для решения плоской задачи является выбор треугольной конечно-узловой сетки.

Стандартная математическая форма записи выражений и возможность задания программных блоков делает прозрачной теоретическую основу этого метода и позволяет достаточно просто реализовать алгоритм метода конечных элементов. Средства MathCad в данном случае позволяют избежать необходимости решать задачи обращения и транспонирования матриц, нахождение



ния корней системы алгебраических линейных уравнений и др., поскольку для этого предусмотрены специальные функции и инструменты.

Изложенная методика может применяться инженерами горных гидротехнических и строительных специальностей при расчете напряженно-деформированного состояния среды конструкций, а также в учебных целях.

Берется некоторое сплошное тело, объем которого равен  $V$ , разбивается на простые элементы (рис. 1.1.). Пусть на границе заданы поверхностные силы  $P$  и на тело действуют объемные силы  $Q$ . На основе принципа минимума потенциальной энергии поле перемещений узлов конечно-элементной сетки, удовлетворяющее уравнениям равновесия и совместности для двумерной задачи упругости, минимизирует функционал, заданный уравнением (1.1).

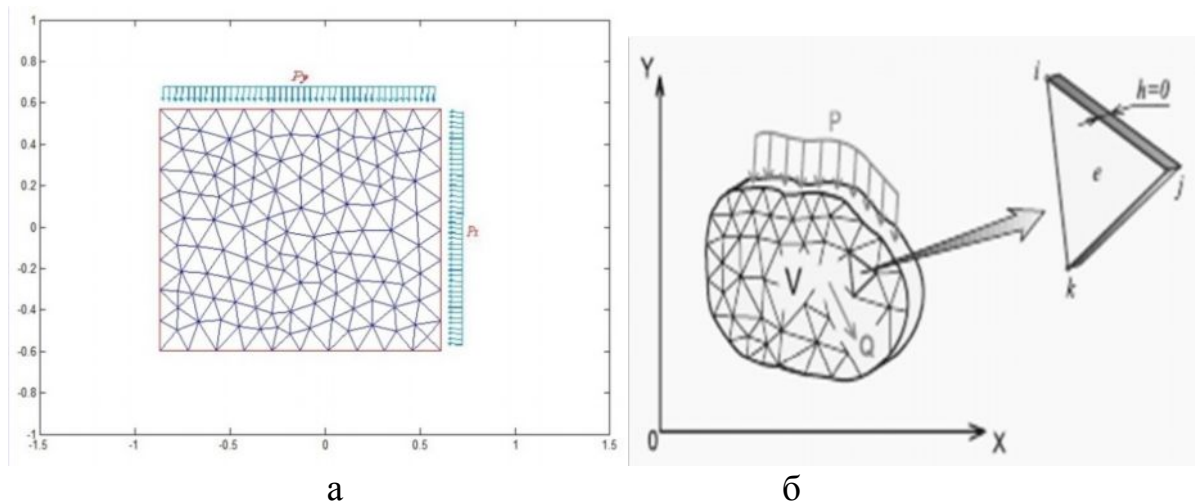


Рис. 1.1. Расчетная схема и её конечно-элементное представление

$$\mathfrak{N} = \int_V \frac{1}{2} \cdot \{\varepsilon\}^T \{Q\} dV - \int_V \{\delta\}^T \{Q\} dV - \int_S \{\delta\}^T \{P\} dS \quad (1.1)$$

где  $\{Q\} = \begin{bmatrix} q_x \\ q_y \end{bmatrix}$ ,  $\{P\} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \end{bmatrix}$ , силы, действующие на объем  $V$  и внешнюю поверхность  $S$ , соответственно,  $\{\delta\} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix}$  – вектор узловых перемещений.

Потенциальная энергия деформации тела также определяется перемещениями или

$$\int_V \frac{1}{2} \{\varepsilon\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \frac{1}{2} \{\delta\}^T [K_c] \{\delta\} dV,$$



$$\{\varepsilon\} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix}, \{\sigma\} = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

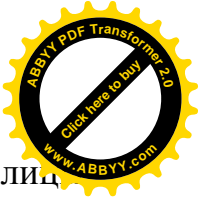
где  $\varepsilon$  и  $\sigma$  – векторы деформации и напряжений,  $[K_c]$  – матрица жесткости системы (МЖС) размерности  $f \times n$ , ( $f$  – показатель степени свободы для узлов элементов, при этом  $f = 2$  – для двумерной задачи,  $f = 3$  – для трехмерной;  $n$  – количество элементов). Из (1.2) и (1.3) можно получить

$$[K_c]\{\delta\} = \{F\} \quad (1.3)$$

где  $\{F\}$  – вектор узловых сил. (1.3) является основным матричным уравнением метода конечных элементов. Компоненты матрицы жесткости определяются координатами узлов элементов и их упругими характеристиками: модулем упругости и коэффициентом Пуассона. Поэтому достаточным условием является определенность вектора нагрузки (узловых сил) или вектора смешанных сил, а также смешанные, взаимно уравновешивающие условия [39, 71].

Для подтверждения оценки устойчивости горных бортов и наших предположений, а также проверки теории построена математическая модель на базе метода конечных элементов с использованием программного продукта *MathCad* на примере карьера «Кумтор». Были взяты 3 вида горной породы, находящиеся в разрезе. Это крепкие песчаники (скальные породы), аргиллиты (полускальные) и пески глинистые мелкозернистые (рыхлые породы). Коэффициенты Пуассона выбираются в соответствии с исследуемой горной породой:  $\nu = 2,6 \text{ г/см}^3$ ;  $\nu = 2,45 \text{ г/см}^3$ ;  $\nu = 1,8 \text{ г/см}^3$ . Для построения математической модели необходимым условием является определенность вектора нагрузки (узловых сил) или вектора смешанных сил, а также смешанные, взаимно уравновешивающие условия.

На базе вышеуказанных условий рассмотрим простейший вариант применения МКЭ. Для этого разобьем область на конечные элементы – треугольники (рис 1.1). Это самый распространенный способ использования



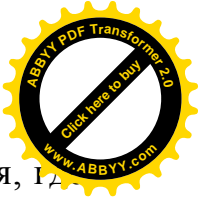
МКЭ. Все сведения об узлах и элементах формируются в виде таблиц *Excel*(Прил.2) и затем импортируются в программный пакет *MathCad* в виде файлов формата *.prn*. Для фиксации узлов конечных элементов созданы два параметра:  $P_x$  и  $P_y$ , которым присваивается признак фиксации перемещения вдоль оси  $x$  или  $y$  (принимает значения 1 – если задано нулевое значение и 0 – если перемещение неизвестно).

Для получения данных из файлов в *MathCad* используется функция *READPRN("filename.prn")*. Ранее созданные файлы находятся в папке *DATA* на диске *D*. Их содержимое присваивается матрицам *DEL* и *DKN*(рис.1.2):

$DEL := READPRN("f:\Индра\DATA\EL_1.prn")$	- загрузка параметров элементов
$M := rows(DEL) \quad M = 64$	- количество элементов
$EL := augment(DEL^{(1)}, DEL^{(2)}, DEL^{(3)})$	- номера узлов, окружающих элементы
$E := DEL^{(4)}$	- модуль упругости
$\nu := DEL^{(5)}$	- коэффициент Пуассона
$\gamma := DEL^{(6)}$	- плотность
$DKN := READPRN("f:\Индра\DATA\KN_1.prn")$	- загрузка параметров узлов
$R := rows(DKN) \quad R = 45$	- количество узлов
$XY := augment(DKN^{(1)}, DKN^{(2)})$	- координаты узлов
$X := DKN^{(3)} \quad Y := DKN^{(4)}$	- осевые компоненты узловых сил
$U := DKN^{(6)} \quad V := DKN^{(7)}$	- заданные осевые перемещения узлов
$PX := DKN^{(5)} \quad PY := DKN^{(8)}$	- признаки заданных осевых перемещений

Рис. 1.2. Загрузка компонентов программы.

Для проверки правильности исходных данных и использования их в дальнейшем расчете формируется вектор узловых сил с учетом действия массовых сил, векторы заданных перемещений, признаков и расчета площади-



элементов. Площадь  $n$ -го элемента задается в виде функции пользователя,  $i \in 1..M$  в векторе  $V$  перечисляются глобальные номера узлов элемента (рис.1.3).

```

A(n) :=
  for i ∈ 1..3
    Vi ← ELn,i
  for i ∈ 1..3
    xi ← XYVi,1
    yi ← XYVi,2
  Δ ←  $\left| \frac{[(x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_3) - (x_1 - x_3) \cdot (y_1 - y_2)]}{2} \right|$ 

```

Рис. 1.3. Функция вычисления площади  $n$ -го элемента КЭ.

Далее рассчитывается общая площадь расчетной области (рис. 1.4):

$$\sum_{i=1}^M (A(i) \cdot m^2) = 14.867 m^2$$

Рис. 1.4. Расчет общей площади расчетной области.

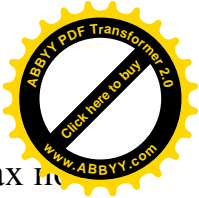
В массовые силы пересчитывается вес элементов, поровну на каждый из их узлов (рис.1.5):

```

FM :=
  for i ∈ 1..R
    Yi ← 0
  for n ∈ 1..M
    for i ∈ 1..3
      Vi ← ELn,i
    for i ∈ 1..3
      YVi ← YVi +  $\frac{A(n) \cdot \gamma_n \cdot g}{3}$ 
  Y

```

Рис. 1.5. Расчет массы силы.



Узловые силы, перемещения и их признака размещаются в векторах и следуют парами значений: на четных позициях вертикальные компоненты, на нечетных – горизонтальные (рис. 1.6).

Вектор заданных узловых сил системы	Вектор заданных узловых перемещений	Вектор признаков заданных узловых перемещений
$F_c := \begin{cases} \text{for } i \in 1..R \\ F_{c_{2,i-1}} \leftarrow X_i \cdot 10^{-3} \\ F_{c_{2,i}} \leftarrow (Y_i + FM_i) \cdot 10^{-3} \\ F_c \end{cases}$	$\delta_c := \begin{cases} \text{for } i \in 1..R \\ \delta_{c_{2,i-1}} \leftarrow U_i \\ \delta_{c_{2,i}} \leftarrow V_i \\ \delta_c \end{cases}$	$S_c := \begin{cases} \text{for } i \in 1..R \\ S_{2,i-1} \leftarrow PX_i \\ S_{2,i} \leftarrow PY_i \\ S \end{cases}$
$\sum_i F_{c_i} = -2.423$	$\sum_i \delta_{c_i} = 20.41$	$\sum_i S_i = 36$

Рис. 1.6. Расчет вектора узловых сил и перемещений.

где  $F_c$  – вектор заданных узловых сил системы;  $\delta_c$  – вектор заданных узловых перемещений и  $S$  – вектор признаков заданных узловых перемещений.

### 1.1.1. Расчет матрицы жесткости системы.

Матрица жесткости системы  $[K_c]$  получается путем объединения матриц жесткости элементов  $[K]$ , которые, в свою очередь, рассчитываются по следующему выражению:  $[K] = \Delta [B]^T [D] \cdot [B]$ .

где  $\Delta$  - площадь элемента,  $[B]$  – матрица производных функций формы (функция влияния узлов),  $[D]$  – матрица упругости:

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (1.4)$$

Площадь элемента вычисляется с помощью ранее заданной функции пользователя  $A(n)$ . Матрицу  $[D]$  также удобно задать в виде функции пользователя.

Для условий плоской деформации будет иметь вид:

$$D(E, \nu) = \frac{E}{(1-2\nu) \cdot (1+\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix}$$



Рис. 1.7. Матрица связей и напряжений и деформаций.

Матрица  $[B]$  связывает между собой перемещения узлов элемента с его деформацией (1.5)

$$\{\varepsilon\} = [B] \cdot \{\delta\} \quad (1.5)$$

где  $\{\delta\} = \{u_i, v_i, u_j, v_j, u_k, v_k\}^T$ ,  $\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}\}^T$ ,

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_j}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_k}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & \frac{\partial N_j}{\partial y} & \frac{\partial N_j}{\partial x} & \frac{\partial N_k}{\partial y} & \frac{\partial N_k}{\partial x} \end{bmatrix}$$

где  $N_i = \frac{1}{2\Delta}(a_i + b_i x + c_i y)$ ;  $a_i = x_j y_k - x_k y_j$ ;  $b_i = y_j - y_k$ ;  $c_i = x_k - x_j$

выражения для функций формы  $N_i, N_j, N_k$  получаются путем круговой подстановки индексов в порядке  $i, j, k$ , где  $i, j, k$ - номера узлов элемента, а  $x_{i,j,k}$ ,  $y_{i,j,k}$ - координаты узлов. После несложных преобразований матрицу  $[B]$  можно записать в виде

$$[B] = \begin{bmatrix} b_i & 0 & b_j & 0 & b_k & 0 \\ 0 & c_i & 0 & c_j & 0 & c_k \\ c_i & b_i & c_j & b_j & c_k & b_k \end{bmatrix}.$$

Расчет матрицы  $[B]$  представим в виде функции пользователя, задав предварительно вспомогательную матрицу  $P$ , определяющую порядок перестановки индексов в функциях формы:





```

B(n) := | for i ∈ 1..3
          Vi ← ELn,i
          P :=  $\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 2 & 3 & 1 \\ 3 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ 
          for i ∈ 1..3
            | xi ← XYVi,1
            | yi ← XYVi,2
          for i ∈ 1..3
            | bi ← yPi,2 - yPi,3
            | ci ← yPi,3 - yPi,2
          Δ ←  $\left| \frac{[(x_1 - x_2) \cdot (y_1 - y_3) - (x_1 - x_3) \cdot (y_1 - y_2)]}{2} \right|$ 
          B ←  $\frac{1}{2 \cdot \Delta} \begin{pmatrix} b_1 & 0 & b_2 & 0 & b_3 & 0 \\ 0 & c_1 & 0 & c_2 & 0 & c_3 \\ c_1 & b_1 & c_2 & b_2 & c_3 & b_3 \end{pmatrix}$ 

```

Рис. 1.8. расчет матрицы В.

Матрица жесткости системы вычисляется в следующем блоке (рис. 1.9)

```

i := 1..2·R      j := 1..2·R      M0i,j := 0

Kc := | MJS ← M0
       | for n ∈ 1..M
       |   for i ∈ 1..3
       |     | V2·i-1 ← 2·ELn,i - 1
       |     | V2·i ← 2·ELn,i
       |     K ← A(n)·B(n)T·D(En,νn)·B(n)
       |     MJE ← M0
       |     for i ∈ 1..6
       |       for j ∈ 1..6
       |         MJSVi,Vj ← MJSVi,Vj + Ki,j
       | MJS

```

Рис. 1.9. Расчет матрицы жесткости системы.

Матрица жесткости системы (МЖС) производится по следующему правилу: членМЖС  $K_{i,j}$  является суммой членов  $K_{i,j}$  из матриц жесткости всех элементов, примыкающих кузлу с  $i$ -й степенью свободы.



### 1.1.2. Решение системы уравнений

Основное уравнение МКЭ (1.3) представляет собой систему линейных алгебраических уравнений. Если  $i$ -е узловое перемещение задано, то число неизвестных уменьшается на единицу. При этом элементы  $i$ -го столбца МЖС следует умножить на заданное перемещение и результаты умножения вычесть из заданных узловых сил:

$$F_i := \left| \begin{array}{l} \text{for } i \in 1..n \\ F_i \leftarrow F_{c_i} - \sum_{j=1}^n (K_{c_i,j} \cdot \delta_{c_j} \cdot S_j) \\ F \end{array} \right.$$

Рис. 1.10.

Расчет узловых

сил

После этого  $i$ -й столбец и  $i$ -я строка МЖС, а также  $i$ -й неизвестный член в векторе сил могут быть удалены. Для удаления строк и столбцов из МЖС используем подматрицы, заданные функциями пользователя;  $M_{II}$  – удаляет первую строку и столбец,  $M_{nn}$  – последние,  $M_{I-IV}$  – промежуточные (рис. 1.11).

Таким образом, нужно решить систему линейных уравнений

$$[K] \cdot \{\delta\} = [F] \quad (1.6)$$

В данном случае возможности пакета *MathCad* позволяют сильно упростить задачу. Для этого предусмотрена функция *Isolve(M, V)*, которая использует итерационный метод Левенберга–Маркардта (Levenberg–Marquardt) для нахождения вектора решения СЛАУ, коэффициенты которой содержатся в массиве  $M$ , а свободные члены — в векторе  $V$ .



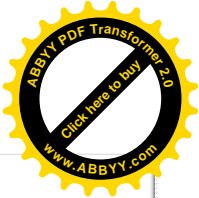
```
δ1 := Isolve(K,F)

δ := | vc ← 1
      | for i ∈ 1..n
      |   | δi ← δci if Si = 1
      |   | δi ← δ1vc if Si = 0
      |   | vc ← vc + 1 if Si = 0
      | δ

(u
 v) := | for i ∈ 1..R
        |   | ui ← δ2·i-1
        |   | vi ← δ2·i
        | (u
          v)
```

Рис. 1.11. Решение системы линейных уравнений методом Левенберга–Маркардта

Программный модуль (рис. 1.12.) возвращает в общем векторе заданные узловые перемещения, ранее из него удаленные. Второй блок создает два вектора с осевыми компонентами узловых перемещений.



$$M_{11}(A, p, n) := \text{submatrix}(A, p + 1, n, p + 1, n)$$

$$M_{nn}(A, p, n) := \text{submatrix}(A, 1, p - 1, 1, p - 1)$$

$$MI\_IV(A, p, n) := \begin{cases} I \leftarrow \text{submatrix}(A, 1, p - 1, 1, p - 1) \\ II \leftarrow \text{submatrix}(A, 1, p - 1, p + 1, n) \\ III \leftarrow \text{submatrix}(A, p + 1, n, p + 1, n) \\ IV \leftarrow \text{submatrix}(A, p + 1, n, 1, p - 1) \\ M \leftarrow \text{stack}(\text{augment}(I, II), \text{augment}(IV, III)) \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \underline{K} := \\ \quad vc \leftarrow 0 \\ \quad M \leftarrow Kc \\ \quad \text{for } i \in 1..n \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} M \leftarrow M_{11}(M, i - vc, n - vc) \text{ if } (i - vc = 1) \wedge (S_i = 1) \\ M \leftarrow M_{nn}(M, i - vc, n - vc) \text{ if } (i = n) \wedge (S_i = 1) \\ M \leftarrow MI\_IV(M, i - vc, n - vc) \text{ if } (i - vc \neq 1) \wedge (i \neq n) \wedge (S_i = 1) \\ vc \leftarrow vc + 1 \text{ if } S_i = 1 \end{array} \right. \\ \quad M \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \underline{F} := \\ \quad V \leftarrow F1 \\ \quad \text{for } i \in 1..n \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} V \leftarrow \text{submatrix}(V, i + 1 - vc, n - vc, 1, 1) \text{ if } (S_i = 1) \wedge (i - vc = 1) \\ V \leftarrow \text{submatrix}(V, 1, i - 1 - vc, 1, 1) \text{ if } (S_i = 1) \wedge (i = n) \\ V \leftarrow \text{stack}(\text{submatrix}(V, 1, i - 1 - vc, 1, 1), \text{submatrix}(V, i + 1 - vc, n - vc, 1, 1)) \text{ if } (S_i = 1) \wedge (i - vc \neq 1) \wedge (i \neq n) \\ vc \leftarrow vc + 1 \text{ if } S_i = 1 \end{array} \right. \\ \quad V \end{array}$$

Рис. 1.12. Подпрограмма удаления строк.

На следующем этапе с помощью полученных узловых перемещений, рассчитываются деформации и напряжения для каждого элемента по соотношениям (1.5) и (1.6):



```

(εx εy γxy σx σy τxy) := for i ∈ 1..M
    δe ← submatrix(M0,1,6,1,1)
    for j ∈ 1..3
        V2,j-1 ← 2·ELi,j - 1
        V2,j ← 2·ELi,j
    for j ∈ 1..6
        δεj ← δVj
    DE ← B(i)·δε
    DS ← D(Ei,νi)·DE
    εxi ← DE1
    εyi ← DE2
    γxyi ← DE3
    σxi ← DS1
    σyi ← DS2
    τxyi ← DS3
(εx εy γxy σx σy τxy)

```

Рис. 1.13. Расчет деформации и напряжения

В каждом элементе также подсчитываются главные напряжения и угол между осью  $y$  и вектором максимального главного напряжения  $\sigma_1$ . Чтобы избежать деления на нуль, в строке вычисления угла использовано условное выражение, которое в случае равенства нулю знаменателя дроби присваивает углу  $\alpha_i$  значение  $\pi/2$ .

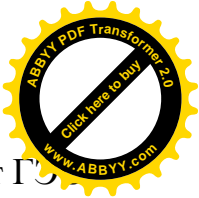
```

(σ1 σ3 α) := for i ∈ 1..M
    σ1i ← 1/2 · [σxi + σyi + √((σxi - σyi)2 + 4(τxyi)2]
    σ3i ← 1/2 · [σxi + σyi - √((σxi - σyi)2 + 4(τxyi)2]
    αi ← if (τxyi = 0, π/2 · sign(σ1i - σyi), atan( (σ1i - σyi) / τxyi ))
    αi ← αi · 180 / π
(σ1 σ3 α)

```

Рис. 1.14. Расчет вектора напряжений

Для примера приводится расчет НДС в зоне опорного давления правого борта Камбаратинской ГЭС с учетом и без учета влияния рельефа. Предпола-



гается, что участки ниже опорного давления правого борта и левый борт ГС находятся в устойчивом состоянии, а также он не может состоять из рыхлых пород.

В целях упрощения расчетная область принята в виде квадрата со сторонами  $6D$  ( $D$  – диаметр исследуемой области), нагрузка от веса вышележащих горных пород задана в виде распределенных напряжений на границах области:  $p_y = \gamma H = 1000 \text{ кПа}$ ,  $p_x = 0,3\gamma H = 300 \text{ кПа}$ . В силу симметрии достаточно рассмотреть четверть области (рис. 1.1). В данном случае исследуемая область разбита на треугольные элементы и состоит из 45 узлов и 64 элементов. Нумерация – произвольная. Все виды нагрузки, действующие на исследуемую область и формирующие в ней определенное напряженно-деформированное состояние, приводятся к статически эквивалентным силам, приложенным в узлах.

В силу симметрии граничные условия по перемещениям следующие: горизонтальные компоненты вдоль вертикальной ( $x = 0$ ) и вертикальные вдоль горизонтальной ( $y = 0$ ) сторон квадрата равны нулю. Неизвестны перемещения всех узловых точек внутри массива, на контуре выработки и на грани области.

Результаты расчета эпюр напряжений представлены на рис. 1.15.

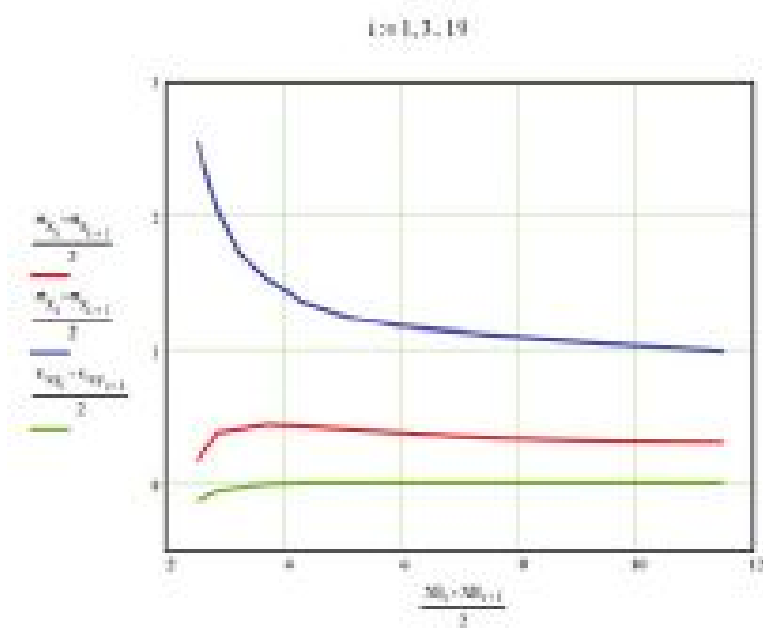


Рис. 1.15. Эпюры напряжений.

Изолинии напряжений или перемещений поверхностей уровня представлены на рис. 1.16а и рис. 1.16б.

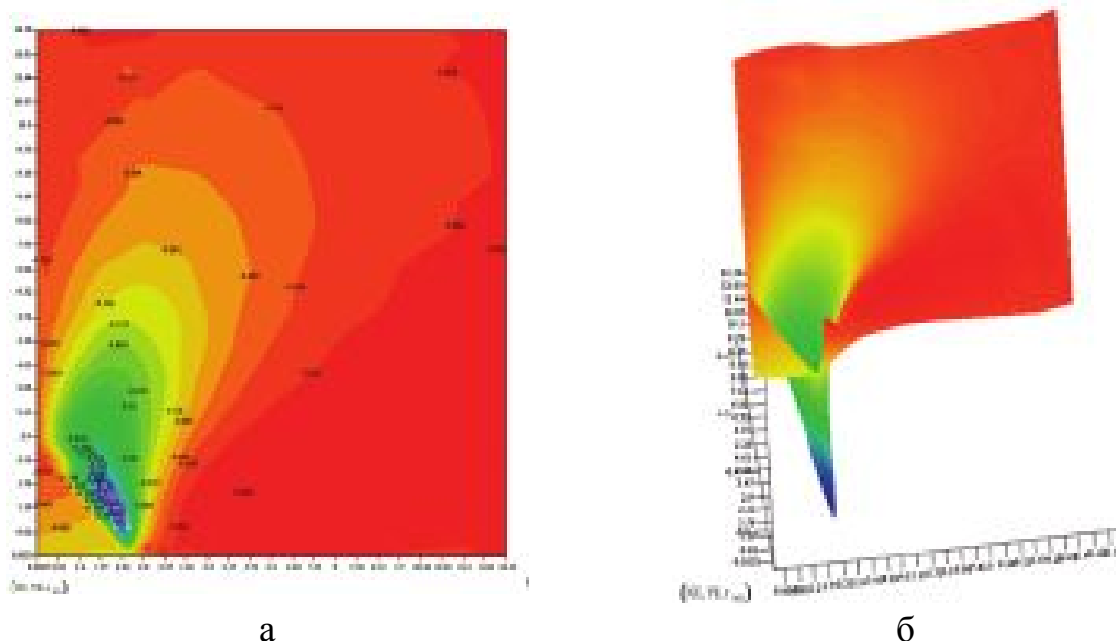
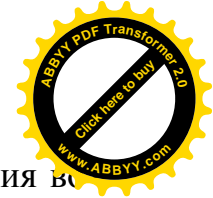


Рис. 1.16. Изображение результата расчета пакета *MathCad*.

## 1.2. Алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород склонов гор и бортов карьеров

Для реализации созданной аналитической модели напряженно-деформированного состояния массивов пород склонов гор и бортов карьеров [7] составлены алгоритмы и программы расчета напряжений в массивах пород. Содержание составленных программ соответствует поставленным в главах 2 и 3 задачами является записью полученных аналитических соотношений на языке программирования используемых программных пакетов MATLAB и MathCad. Суть и содержание этих программ заключаются в следующем:

- построение математической модели температурных режимов работы узлов гидротехнических сооружений, отображающих функций, исходя из реальных форм рельефа склонов гор и бортов карьеров;
- расчет полей напряжений, деформаций, смещений и упругих энергий деформации массивов склонов гор и бортов карьеров методом конечных элементов;



- расчет полей напряжений массивов склонов гор в зонах влияния ВД дохранилищ;
- расчет коэффициентов запаса устойчивости массивов склонов гор и бортов карьеров.

Для обеспечения надежности и достоверности получаемых результатов моделирования в составленных программах необходимо конкретизировать значения параметров геомеханических факторов. Это связано с изменчивостью значений параметров в широких пределах, которые были введены в аналитические модели для учета того или иного геомеханического фактора. Иными словами, несмотря на точность и безупречность используемого математического аппарата, достоверность и надежность прогноза напряженно-деформированного состояния массивов пород бортов карьера и склонов прилегающих гор в большей мере зависит от того, насколько экспериментально точно и надежно определены значения параметров геомеханических факторов. Если учесть неоднородность состава и строения, а также изменчивость физико-механических свойств массивов пород, то станет очевидным, насколько важна обоснованная конкретизация значений каждого параметров перед выполнением прогнозных расчетов. При решении этого вопроса, несомненно, определяющее значение приобретают результаты натуральных и лабораторных экспериментов и наблюдений, а также надежность получаемых ими результатов.

Локальные и мелкие по масштабу геометрические особенности реального рельефа бортов карьера и склонов прилегающих гор весьма сложны. В рассмотренных выше моделях учтены лишь главные по масштабу особенности рельефа массивов карьера и горы с помощью гладких криволинейных цилиндрических поверхностей. Влияние геометрических факторов, мелких по масштабу, не учитывалось. Поэтому вычисленные и принятые как точно удовлетворяющие граничным условиям величины контурных напряжений следует рассматривать как осредненные.

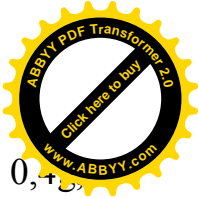




Параметры силовых факторов в аналитических моделях конкретизируются достаточно достоверно для гравитационных составляющих сил и для внешних сил (от веса водохранилища). Значения параметров тектонических и сейсмических сил заранее не определены, так как возникновение тектонических процессов, землетрясения и другие глубинные явления земной коры до сих пор однозначно не прогнозируются.

Методика определения величины тектонической силы ( $T_x$ ) опирается на данные измерения напряжений в натурных условиях. В этой работе использованы результаты измерения напряжений в натурных условиях, полученные И.Т.Айтматовым, К.Ч.Кожогуловым (2,7) и В.Я.Степановым[80] в различных районах Средней Азии и Казахстана. Методика конкретизации значений  $T_x$  осуществляется двояким образом. Сущность заключается в следующем. Измеренные и аппроксимированные соотношениями И.Т.Айтматова[2], Н.Хаста[93] и др. по формуле значения напряжений  $\sigma_{ij}^{изм}$  нами принимаются в виде суммы гравитационных и тектонических полей напряжений. Поэтому для массивов с горизонтальной дневной поверхностью гравитационная часть напряжений  $\sigma_{ij}^g$  вычисляется с помощью соотношений (1.4)[2], а тектоническая часть берется как разность  $\sigma_{ij}^{изм} - \sigma_{ij}^g$  измеренных и вычисленных полей напряжений. Если измерение напряжений осуществлено в массивах с горным рельефом, то предварительно создается две модели напряженно-деформированного состояния. Первая – от действия силы гравитации, а вторая – от действия тектонической силы с единичной интенсивностью. Затем, потребовав чтобы суммарная величина напряжений, получаемая из двух моделей, была равна величине измеренного  $\sigma_{ij}^{изм}$ , определяется значение  $T_x$ .

Параметры сейсмической силы  $K_0 = \frac{\beta A}{g}, C_1, C_2, T_0$ , введенные согласно «Строительных норм и правил» [77] для сейсмоактивных районов, задаются только в вероятностном смысле. Если сейсмичность региона 7,8,9-ти бальная,



то величина сейсмического ускорения  $A$  принимается равной  $0,1g, 0,2g, 0,3g$ , а коэффициент  $\beta$  изменяется от  $0,12$  до  $1,0$  в зависимости от вида сооружения, состава и строения массива и других параметров. Скорости  $C_1, C_2$ , период колебаний  $T_0$  и направление распространения сейсмических волн  $\delta$  задаются также приближенно. Поэтому при моделировании и прогнозе напряженно-деформированного состояния массивов бортов карьера и склонов гор, в любом случае, потребуется выполнение многовариантных расчетов полей напряжений, деформаций и смещений пород, которые будут соответствовать вариациям значений тех или иных факторов или группы факторов.

После конкретизации значений геомеханических факторов с помощью составленных программ выполняются расчеты по вычислению прогнозируемых величин в конкретных точках массива. Густота точек в исследуемой области задается в зависимости от формы рельефа и от ожидаемой концентрации напряжений в определенных зонах. Например, такая зона в случае карьера располагается на расстоянии  $0,5$  характерного размера карьера справа и слева от него по горизонтали и  $1,5$  размера – по глубине от основания карьера. При этом в каждой точке основными вычисляемыми величинами являются компоненты тензора напряжений  $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0, \sigma_z^0 = \mu(\sigma_x^0 + \sigma_y^0)$  или главные напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{max}$ , а также компоненты смещений  $u^0, v^0$  и деформаций  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$ . Главные компоненты напряжений  $\sigma_1, \sigma_2, \tau_{max}$  определяются известными формулами(1.7).

$$\sigma_{1, \sigma_2} = \frac{[(\sigma_x^0 + \sigma_y^0) \pm \sqrt{(\sigma_y^0 - \sigma_x^0)^2 + 4(\tau_{xy}^0)^2}]}{2} \tag{1.7}$$

$$\tau_{max} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} = \frac{\sqrt{(\sigma_y^0 - \sigma_x^0)^2 + 4(\tau_{xy}^0)^2}}{2}$$

Для установления достоверности результатов полученных теоретических решений выполнены тестовые расчеты. Результаты сравнивались с натурными данными и с имеющимися в научной литературе аналогичными результатами других исследователей.



### 1.2.1. Расчет напряженного состояния массивов пород бортов карьера

Предложенный в научных изданиях[3-20] метод расчета без дополнительных разработок может быть использован для оценки напряженного состояния массивов пород бортов карьера. В качестве примера на рисунках 1.17 и 1.18 приведены эпюры контурных напряжений бортов карьера, взятые из [1-8]. Для удобства расчетов размеры карьера отнесены к его глубине ( $h$ ), а величины напряжений  $\sigma_{ij}^0$  - к весу вышележащего столба горных пород, т.е. к  $\gamma h$ . Поэтому все величины  $x, y, \sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$  являются безразмерными.

На рис.1.17 принят постоянный наклон борта карьера 45 и рассмотрена различная ширина его основания, а на рис.1.18, наоборот, приняты различные наклоны бортов при постоянной ширине основания. При моделировании геометрических форм карьера использована предложенная в [15] методика отображения. Причем на этих рисунках совмещены результаты расчетов, получаемые при двух вариантах значений бокового распора  $\lambda = 0,25$  и  $\lambda = 1$ . Возникающие при этом законы распределения контурных напряжений обозначены соответственно пунктирными и сплошными линиями эпюр напряжений. Характер распределения указывает, что величина коэффициента бокового распора существенно влияет на напряженное состояние массивов пород бортов карьера. Это влияние как качественно, так и количественно сказывается на значениях контурных напряжений  $\sigma_{\xi}^0$ , которые приведены в табл.1.1. В этой таблице точки контура А, В, С, D, Е карьера расположены в следующем порядке: точка А – на оси симметрии карьера, точка В – в подошве карьера, точки 3, 4 – на середине, а точка Е вне зоны влияния карьера, т.е. на горизонтальной дневной поверхности (рис.1.1а). Значения бокового распора изменялось с шагом 0,1 от нуля до единицы, поскольку коэффициент Пуассона изменяется от 0 до 0,5. Из рисунков 1.17 и 1.18 и табл.1.1 следует, что при значениях бокового распора  $\lambda \leq 0,6$  на оси симметрии карьера массивы горных пород испытывают растяжения, а при  $\lambda > 0,6$  в этой зоне имеет ме-

сто сжатие; в основании борта карьера наблюдается аналогичное состояние соответственно при  $\lambda \leq 0,35$  и сжатие при  $\lambda > 0,35$ ; в середине борта карьера и в выше расположенных точках (С, D, E) при всех значениях  $\lambda$  контурные напряжения являются сжимающими, причем их значения в зоне вершины борта карьера (точки D, E) убывают при увеличении значения бокового распора.

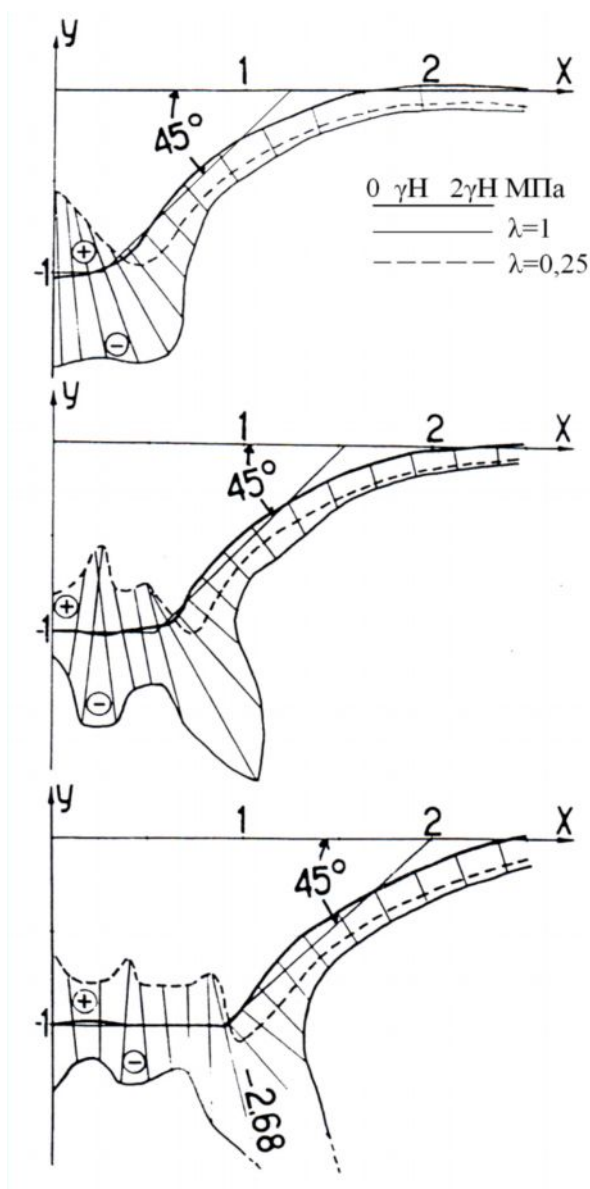


Рис.1.17. Контурные напряжения бортов карьера при изменении ширины его основания

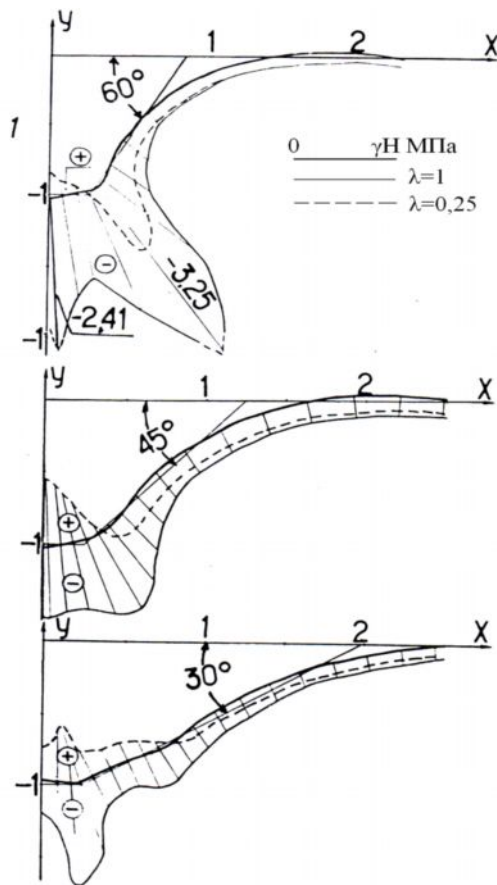


Рис.1.18. Контурные напряжения бортов карьера при изменении наклона его борта

Таблица 1.1. Значения контурных напряжений

боковой распор, $\lambda$	Значения контурных напряжений $\sigma_{\xi}^0$ ,				
	точки контура карьера				
	A	B	C	D	E
0,00	1,58	0,67	-0,29	-0,27	-0,25
0,10	1,32	0,48	-0,25	-0,25	-0,24
0,20	1,07	0,30	-0,26	-0,23	-0,22
0,30	0,81	0,12	-0,24	-0,21	-0,20
0,40	0,55	-0,06	-0,22	-0,19	-0,18
0,50	0,30	-0,24	-0,21	-0,17	-0,16
0,60	0,04	-0,43	-0,19	-0,15	-0,15
0,70	-0,21	-0,67	-0,17	-0,13	-0,13
0,80	-0,47	-0,79	-0,16	-0,12	-0,11
0,90	-0,73	-0,97	-0,14	-0,10	-0,09
1,00	-0,98	-1,15	-0,13	-0,08	-0,08



На рис.1.19 представлены изолинии напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  для карьера построенного при помощи компьютерного моделирования, а на рисунке 1.16 изолинии главных напряжений  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  для карьера, построенного по экспериментальным данным. Они наглядно показывают, что в зоне основания при бортовых зонах имеются зоны концентрации напряжений, причем растягивающих, если значение бокового распора  $\lambda = 0,25$ . Последние, если учесть слабую сопротивляемость горных пород на растяжение, указывают, в каких зонах массива пород карьера расположены зоны возможных разрушений.

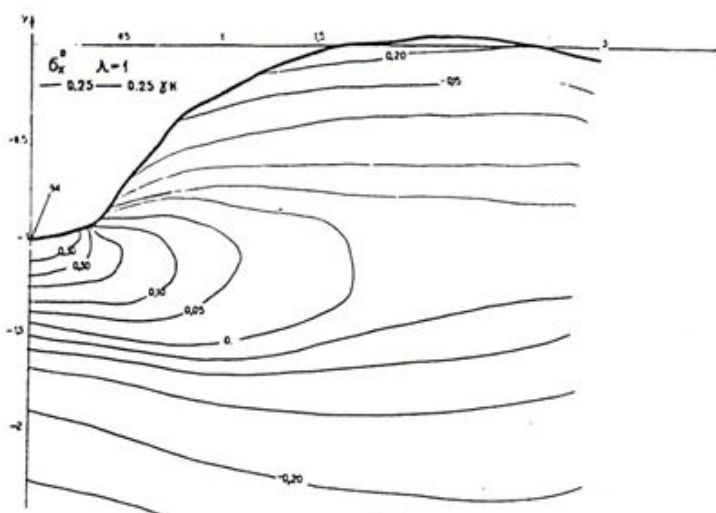


Рис.1.19. Распределение напряжений в массиве пород карьера с узким основанием

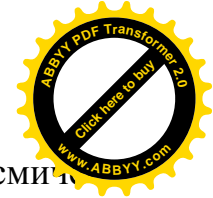
При обработке данных компьютерная модель напряжений карьера, построенная с помощью МКЭ, совпадает с графиком изолиний напряжения, построенного по данным, полученным впоследствии полевых измерений, т.е. экспериментальных данных. Различие между графиками составляет 25 – 45 процентов. Кроме этого, при компьютерном моделировании возможно представление результатов в трехмерном изображении, что позволяет в наиболее полном масштабе представить картину изменения параметров модели. Это подтверждает тот факт, что методику создания математических моделей гидротехнических сооружений с помощью компьютерных технологий в даль-



нейшем можно использовать в более сложных компьютерных процессах, связанных с построением интеллектуальных систем.

### 1.2.2. Расчет напряженного состояния массивов пород склонов гор

Объектом моделирования послужил горный массив, под которым должна была проходить предполагаемая трасса водосбросного туннеля Каинды-Иныльчек. Высота горы  $H=1400$  м, объемный вес пород  $\gamma=2,7\text{т/м}^3$ . На рис.4.6 представлены результаты расчета распределения напряжений  $\sigma_1^0, \sigma_2^0, \sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$  вдоль оси туннеля, возникающих только от действия силы гравитации при  $\lambda = 0,33$  и  $\lambda = 1$ . Из эпюр следует, что вертикальная компонента напряжений возрастает пропорционально глубине, а от правой части до центра горы изменяется от 7,4 МПа до 31,9 МПа при  $\lambda = 0,33$  и от 10,2 до 34,4 МПа при  $\lambda = 1$ . Горизонтальная компонента напряжений вдоль трассы изменяется незначительно, так, при  $\lambda = 0,33$  в краевой части она равна 12,1 МПа, в центральной части 13,8 МПа, достигая максимума 16,2 МПа на расстоянии, примерно равном 1/3 расстояния от краевой части горы до ее центра (при  $\lambda = 1$  в краевой части она равна 15,6 МПа в центральной 19,5 МПа). При  $\lambda = 1$  главные напряжения  $\sigma_1^0, \sigma_2^0$  в центре ориентированы горизонтально и вертикально и равны компонентам  $\sigma_x^0, \sigma_y^0$  соответственно; в краевых частях наблюдается отклонение  $\sigma_1^0, \sigma_2^0$  от  $\sigma_x^0, \sigma_y^0$ . При  $\lambda = 0,33$  в центральной части горы  $\sigma_y^0 = 31,9$  МПа (34,4 МПа при  $\lambda = 1$ ), т.е. они несколько меньше веса налегающей толщи пород (37,8 МПа), а в краевых частях как вертикальные, так и горизонтальные напряжения превышают вес налегающей толщи. Изменение коэффициента бокового распора в наибольшей степени сказывается на распределении напряжений  $\sigma_x^0$ . Наибольшие различия наблюдаются в эпюрах напряжений  $\sigma_1^0, \sigma_x^0$  и в меньшей мере в эпюрах напряжений  $\sigma_2^0, \sigma_y^0$  (не более 8%).



Во втором варианте нагружения массива принято: величина сейсмического ускорения  $A=0,4g$ , что соответствует девятибалльной сейсмичности; значение  $\beta = 0,25$ , которое рекомендовано (77) для расчета гидротехнических сооружений. Поэтому расчетные значения равны:  $\gamma = A, K_0 = 0,1\gamma$ . Направление сейсмического ускорения принято горизонтальным, т.е.  $\delta = 90^\circ$ . Полученные при  $\lambda = 1$  результаты расчета приведены на рис. 4.7а, можно обнаружить, что влияние сейсмической силы наименьшее в центральных частях и наибольшее в краевых частях трассы туннеля. Причем в краевой части туннеля, в сторону которой направлена сейсмическая нагрузка, величины напряжений увеличиваются, а в другой части величины напряжений уменьшены. Однако максимальные значения напряжений в обоих случаях нагружения почти одинаковы и равны  $35 \pm 0,5$  МПа.

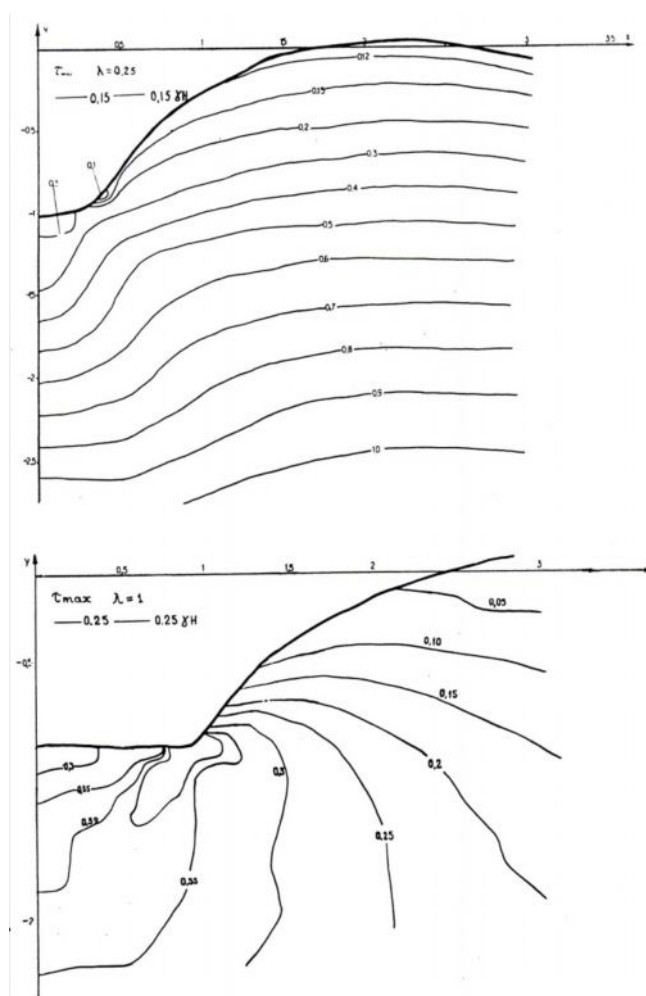


Рис.1.20. Распределение максимальных касательных напряжений в массиве пород карьера с узким и широким основанием





При действии горизонтальной тектонической силы (третий вариант нагружения) максимальные значения дополнительных напряжений в краевых частях, где величины несколько больше (на 5%) действующей на бесконечности сжимающей силы, в центральной же части они составляют 64% от ее величины. Горизонтальная тектоническая нагрузка приводит к незначительному изменению вертикальных компонентов напряжения— ее увеличению в правой части примерно на 60% и разгрузке в центральной части на 10%.

### **1.2.3. Расчет напряженного состояния массивов породнагорного карьера «Кумтор»**

С помощью созданной модели НДСМ пород нагорных карьеров [1-8] выполнен расчет полей напряжений для разреза карьера «Кумтор». Для расчетов принято: объемный вес равным  $\gamma = 2,85 \text{ тт/}^3$ ; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,25$ . Предел прочности на сжатие всячего бока 81 МПа, для руды 120 МПа. Расчет выполнен для двух вариантов нагружения массива: действие только силы гравитации и совместное действие гравитационной и тектонической сил. Результаты расчета полей напряжений, возникающих от действия силы гравитации, представлены на рисунках 1.21 и 1.22.

Из рис. 1.21 видно, что горизонтальная компонента нормальных напряжений распределена в левых и правых бортах карьера по различным законам. В левом борту карьера имеется зона растяжения, хотя величина наибольшего значения напряжений незначительна и равна 1,3 МПа. В правом борту имеется концентрация только сжимающих напряжений. Наибольшее сжатие равно 9,4 МПа. В зоне основания правого борта карьера в обширной зоне наблюдается концентрация сжимающих в горизонтальном направлении напряжений.

Вертикальная компонента сжимающих нормальных напряжений в обоих бортах карьера растет по глубине массива почти пропорционально, согласуясь с ростом высоты бортов карьера.

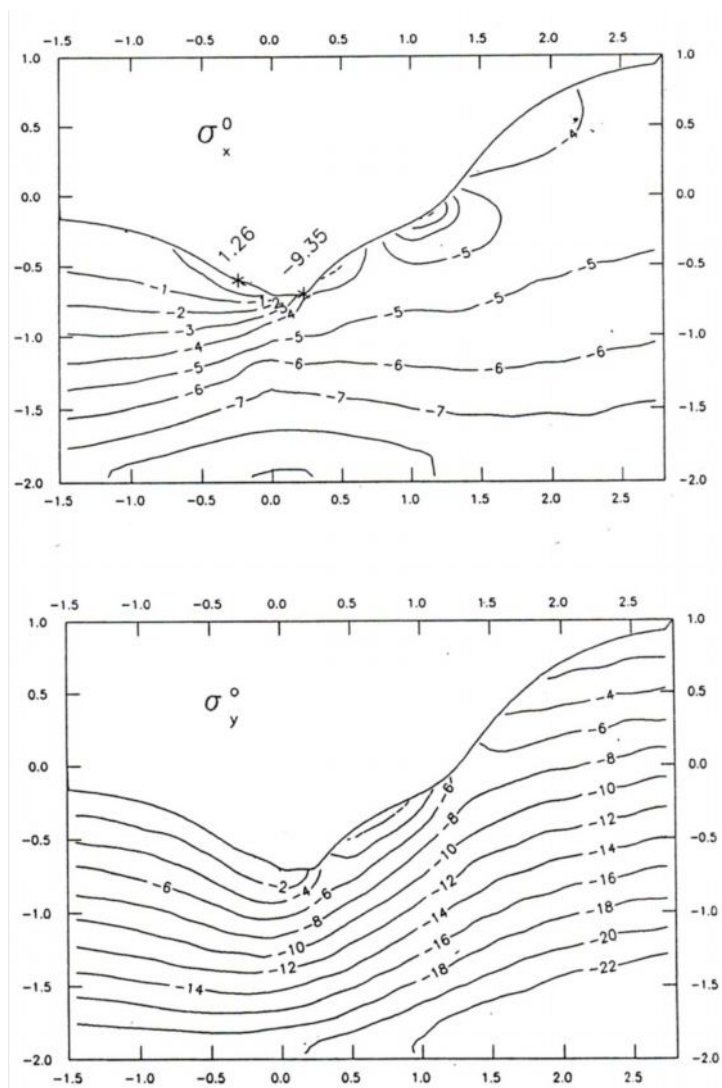


Рис.1.21. Распределение горизонтальных и вертикальных нормальных напряжений в массивах горных пород бортов карьера «Кумтор» при действии силы гравитации

Сдвигающие касательные напряжения (рис. 1.22) в правом борту карьера достигают наибольших значений, зоны их концентрации расположены в зоне опорного давления бортов карьера. Наибольшее значение имеет место в правом борту карьера, где имеется зона изгиба, равная 7 МПа. В целом на правом борту карьера значения касательных напряжений в 5 – 10 раза больше, чем в левом борту. Поэтому интенсивные сдвиговые деформации массивов пород могут развиваться в правом борту карьера.

Распределение напряжений в массивах пород, когда они испытывают совместное действие силы гравитации и тектонического сжатия в горизон-



тальном направлении с интенсивностью 5,8 МПа, показаны линиями номинальных напряжений на рис.1.23. В этом случае вся зона концентрации горизонтальных напряжений локализована в зоне основания карьера, где ее наибольшее значение равно 40,3 МПа. Вертикальная компонента напряжений в зоне сопряжения правого борта карьера с его основанием достигает наибольшего значения, равного 15,2 МПа. В целом, как видно из рис. 1.23, концентрация напряжений при тектоническом сжатии в 4 раза больше, чем при действии силы гравитации.

Для выполнения прогноза вероятных сдвиговых деформаций выполнен анализ распределения наибольших касательных напряжений при тектоническом сжатии в горизонтальном направлении различной интенсивностью:  $T_x = 0$ ; -5,8 МПа и при  $T_x = -11,6$ ; -23,3 МПа. Первый вариант – это случай отсутствия тектонического сжатия, а другие случаи для 0,5; 1; 2 веса столбов пород горы, которая прилегает к правому борту карьера. В последних трех случаях концентрация напряжений увеличилась в 3; 5,8; 11,5 раз по сравнению со случаем действия силы гравитации. Максимальные касательные напряжения принимают наибольшие значения в контурной части в зоне основания правого борта карьера и соответственно равны 22,5; 39,7; 74 МПа. Следовательно, во всех вариантах концентрация напряжений увеличилась до 3 раз по сравнению с величиной тектонического сжатия.

Таким образом, при наличии происходящих в регионе тектонических процессов, вероятность возникновения оползневых явлений увеличивается в 3 раза по сравнению с действием только силы гравитации.

Учитывая, что концентрация напряжений локализованы в зоне основания правого борта карьера, можно прогнозировать возможность потери устойчивости в первую очередь правого борта карьера, после отработки месторождения.

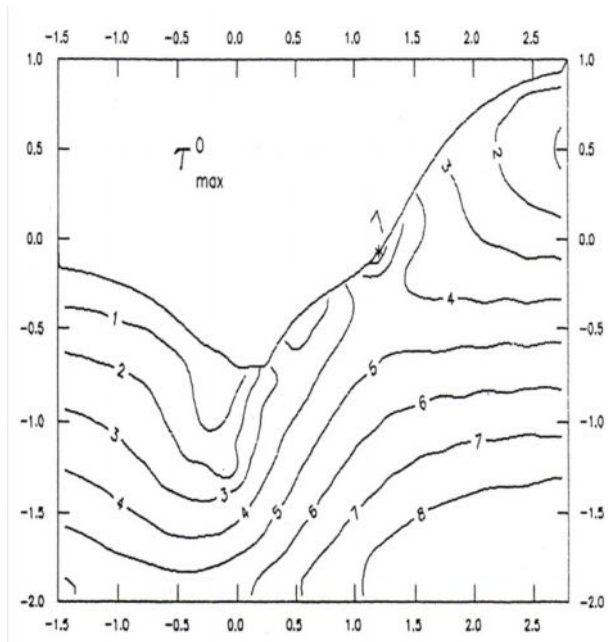


Рис.1.22. Распределение касательных напряжений в бортах карьера «Кумтор» при действии силы гравитации

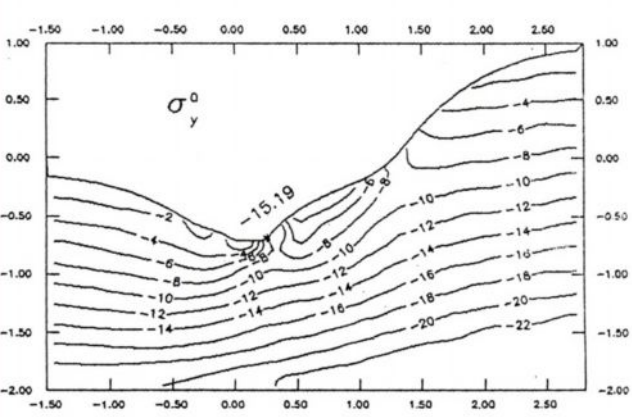
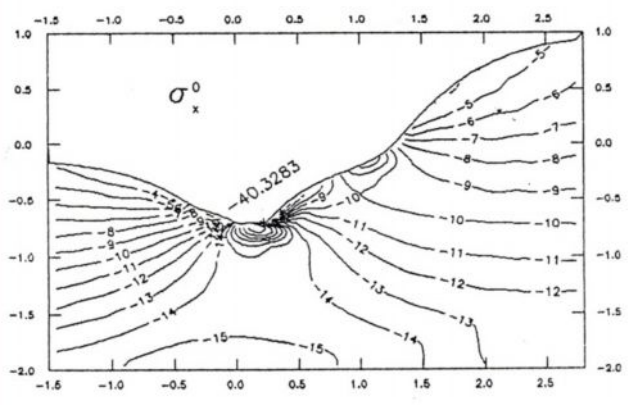


Рис.1.23. Распределение нормальных напряжений в бортах карьера «Кумтор» при действии силы гравитации и тектонического сжатия 5,8 МПа (0,5γh)

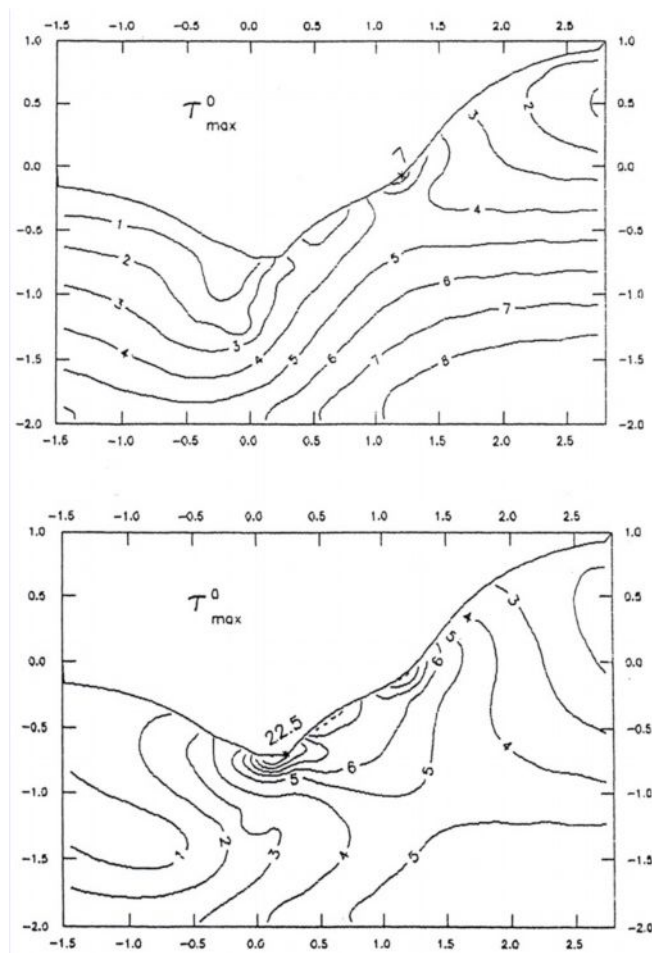
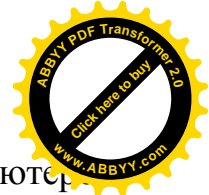


Рис.1.24. Распределение максимальных касательных напряжений в бортах карьера «Кумтор» при действии силы гравитации и совместном действии силы гравитации и тектонического сжатия 5,8 МПа ( $0,5\gamma h$ )

### ВЫВОДЫ по главе I.

Приводятся:

- компьютерное моделирование НДС гидросооружений с применением МКЭ;
- алгоритмы расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород склонов гор и бортов карьеров;
- методика и алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния массивов пород реальных геомеханических объектов;
- расчет напряженного состояния массивов породнагорного карьера «Кумтор»;
- разница между компьютерной моделью НДС с применением МКЭ и данными, полученными при полевых сборах составляет 25 – 45 процентов, что



позволяет с помощью математической модели, построенной на компьютере, давать реальную картину НДС участка или гидротехнического объекта;

- трехмерное изображение позволяет получить более наглядную картину изменения параметров и свойств объекта.



## **ГЛАВА 2. МЕТОДИКА, КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЗРУШЕНИЯ МАССИВОВ ПОРОД БОРТОВ КАРЬЕРА И СКЛОНОВ ГОР**

### **2.1. Критерии оценки разрушения бортов карьера и склонов гор**

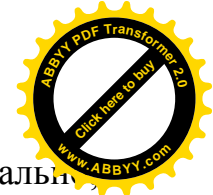
Причины, место возникновения и кинетика развития процессов разрушений массивов пород обусловлены многими естественными и техногенными факторами – составом, строением и рельефом массивов пород и их реологическими свойствами, сейсмоструктурной активностью горного региона, местом расположения, формой и размерами карьеров и т.д.. Процессы разрушения массивов пород протекают не только в пространстве, но и во времени.

При рассмотрении механизма разрушения горных пород выделяют две формы:

- а) отрыв, обусловленный деформацией, т.е. преимущественным действием нормальных растягивающих напряжений;
- б) срез или скалывание вследствие преобладающего развития деформаций сдвига, вызванных касательными напряжениями.

В настоящее время экспериментально обосновано, что любое твердое тело в зависимости от условий нагружения может разрушаться с проявлением обеих выделенных форм. В одних случаях разрушение наступает после стадии малых деформаций (хрупкое разрушение), в других материал до разрушения испытывает значительные остаточные деформации (вязкое или пластическое разрушение). На протяжении двух столетий создавались различные критерии прочности, которые подразделялись на две группы в соответствии с гипотетическим механизмом разрушения, положенным в их основу, и противопоставлялись друг другу.

Один из самых ранних критериев прочности – критерий наибольших нормальных напряжений – был выдвинут Г.Галилеем. Согласно этому критерию опасное состояние материала наступает при достижении наибольшим



нормальным напряжением некоторого, определяемого экспериментальным критического значения. Влияние других компонент тензора напряжений не учитывается. Вследствие этого данный критерий применим лишь в условиях одноосного растяжения. Это обстоятельство существенно ограничивает область применения данного критерия, как для пластичных, так и для хрупких материалов, в том числе и для горных пород. Условие прочности записывается в виде

$$\sigma_1 \leq [\sigma] \quad (2.1)$$

где  $\sigma_1$  – наибольшая из нормальных компонент тензора напряжений;  $[\sigma]$  – допускаемое напряжение для рассматриваемого материала. При этом под  $[\sigma]$  для хрупких материалов подразумевается значение предельного напряжения, вызывающего появление неупругих деформаций, т.е. предел упругости, а для пластичных – предел текучести.

По критерию наибольших деформаций (теория Мариотта) критическое состояние материала определяется его деформациями, т.е. наибольшим удлинением (или укорочением). В случае объемного напряженного состояния в пределах упругого деформирования условие прочности запишется в виде

$$\varepsilon_{\max} = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)] \leq \frac{[\sigma]}{E} \quad (2.2)$$

или

$$\{\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)\} \leq [\sigma] \quad (2.3)$$

Отличие данного критерия от предыдущего состоит в том, что с допускаемым напряжением сравнивают совокупность нормальных компонент тензора напряжений. Эксперименты показывают, что этот критерий хорошо описывает характер разрушения хрупких материалов, но для пластичных он не подтверждается.

Критерий наибольших касательных напряжений, сформулированный Кулоном, основан на механизме разрушения в форме среза, и проверка прочности осуществляется в соответствии с условием





$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \leq [\tau] = \frac{[\sigma]}{2} \quad (2.4)$$

или

$$(\sigma_1 - \sigma_3) \leq [\sigma] \quad (2.5)$$

где  $[\tau]$  – допускаемое касательное напряжение для материала.

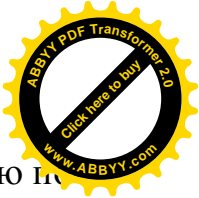
Критерий наибольших касательных напряжений подтверждается экспериментами для материалов, проявляющих пластические свойства и с близкими по значению пределами прочности на сжатие  $[\sigma_{\text{сж}}]$  и растяжение  $[\sigma_{\text{р}}]$ . Эта теория применима и для материалов, обладающих различными пределами прочности на сжатие и растяжение.

Для описания условий разрушения горных пород широко применяют критерий прочности, предложенный О.Мором. Условие прочности определяется соотношениями касательных и нормальных напряжений в каждой точке тела, находящегося в объемном напряженном состоянии, т.е.

$$\tau_n = f(\sigma_n) \quad (2.6)$$

На плоскости  $\tau_n, \sigma_n$  соотношение (2.6) представляют предельную кривую, огибающую семейство кругов напряжений, построенных для различных случаев предельного напряжения состояния. Огибающие предельных кругов напряжений называют паспортами прочности горных пород. Согласно данному критерию разрушение наступает при превышении касательными напряжениями критических значений  $[\tau]$ , определяемых ординатами огибающей, а также, если нормальные растягивающие напряжения превысят предел прочности на растяжение  $[\sigma_{\text{р}}]$ , при отсутствии касательных напряжений ( $\tau = 0$ ).

Существует ряд других критериев разрушения твердых тел, в основу которых положено совместное рассмотрение критериев прочности по деформациям и напряжениям, т.е. рассмотрение потенциальной энергии или численно ей равной удельной работы деформаций, затрачиваемой на разрушение



твердого тела. Хорошие результаты достигаются, если учитывают не всю потенциальную энергию, а только ту ее часть, которая идет на изменение формы элементарных объемов материала (критерий Губера-Мизеса). Условие прочности согласно этому критерию имеет вид

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 \leq 2[\sigma]^2 \quad (2.7)$$

Критерий Губера-Мизеса подтверждается для пластичных материалов.

При конкретных расчетах прочности отдельных областей массива горных пород необходим неременный учет вида напряженного состояния рассматриваемой области, а также характера ее деформирования. При этом в зависимости от способности объекта к практически хрупкому деформированию или к деформированию с проявлением пластических деформаций следует использовать соответствующие критерии прочности  $[\sigma_{сж}]$ ,  $[\sigma_p]$ , либо  $[\tau]$ .

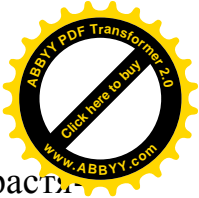
Критерий Давиденкова-Фридмана называется объединенным критерием прочности. Исходным для него является предположение о наличии у материала двух характеристик предельной прочности – сопротивления отрыву  $\sigma_{от}$  и сопротивления сдвигу (или срезу)  $\tau_{ср}$ .

Сопротивление отрыву  $\sigma_{от}$  для хрупких в обычных условиях материалов может быть определено как предел прочности при растяжении. Труднее определить эту характеристику для пластичного материала.

Сопротивление срезу  $\tau_{ср}$  можно определить, например, из опытов скручивания полых трубок.

Учет «жесткости» напряженного состояния осуществляется посредством введения коэффициента

$$\alpha = \frac{\tau_{\max}}{\sigma_{\text{прив}}} \quad (2.8)$$



где  $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение, а  $\sigma_{\text{прив}}$  - приведенное растягивающее напряжение, подсчитываемое по закону Гука для наибольшего положительного удлинения  $\epsilon_+$

$$\sigma_{\text{прив}} = E\epsilon_+.$$

Недостатком рассматриваемого критерия является использование далеко не универсального критерия наибольшего удлинения и условного параметра жесткости нагружения  $\alpha$ .

Проанализировав существующие критерии разрушения, предлагается следующая методика определения вероятных зон разрушения в склонах гор и бортах карьеров, основанная на изучении напряженно-деформированного состояния массивов пород в каждой конкретной геомеханической ситуации.

1. Вероятная зона разрушения массивов пород в зонах растягивающих на-

пряжений определяется по величине критерия  $K_1 = \frac{\sigma_{1,2}}{\sigma_p}$ , а в зонах сжатия – по

теории прочности О.Мора, по величине критерия  $K_2 = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\text{сд}}}$ . Здесь

$$\tau_{\text{сд}} = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + C \quad (2.9)$$

где  $\tau_{\text{сд}}$ ,  $\sigma_n$  – величины касательных и нормальных составляющих напряжений на площадке сечения массива, где предполагается расположение поверхности скольжения;  $C$  и  $\varphi$  – сцепление и угол внутреннего трения, определяемые для каждой породы экспериментальным путем. По этим критериям строятся изолинии со значениями  $K_1$  и  $K_2$ . Внутри области изолиний со значениями  $K_1=1$  или  $K_2=1$  массивы пород считаются разрушенными. Причем наиболее вероятной зоной разрушения массива пород является та, которая одновременно совпадает по обоим критериям  $K_1$  и  $K_2$ .

2. Вероятное направление поверхности скольжения слоев пород в каждой точке массива, расположенной внутри изолинии  $K_2=1$ , определяется углом  $\alpha$ . Оно вычисляется как корни уравнения

$$\frac{\partial}{\partial \alpha} [(\sigma_y^0 - \sigma_x^0) \cos \alpha \sin \alpha + \tau_{xy}^0 (\cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)] = 0 \quad (2.10)$$

Вероятная поверхность скольжения, согласно критериям (2.9) и (2.10), проходит через все точки массива, где выполняется условие прочности (2.9) и в направлении того сечения массива, где наибольшее касательное напряжение принимает максимальное значение.

Таким образом, с помощью критериев (2.9) и (2.10) можно определить вероятные поверхности скольжения, т.е. оползневого тела.

3. Для определения зон разрушений предлагаются еще следующие критерильные величины  $K_x, K_y, K_m$ , смысл которых определены ниже.

Зонами повышенных и пониженных напряжений принято называть (73,99) области, где выполняются условия:

$$(K_x, K_y, K_m) > 1 \text{ или } (K_x, K_y, K_m) < 1 \quad (2.11)$$

$$\text{где } K_x = \frac{\sigma'_x}{\sigma_x^0}, \quad K_y = \frac{\sigma'_y}{\sigma_y^0}, \quad K_m = \frac{\tau'_{\max}}{\tau_{\max}^0}$$

здесь компоненты с индексами «штрих» и «ноль» сверху обозначают напряжения без учета влияния горного рельефа массива пород. Величины напряжений без учета влияния рельефа определяются соотношениями (2.4) по гипотезе А.Н.Динника[22].

Результаты компьютерного моделирования распределения напряжений в массивах пород горы и каньона р.Нарын в районе строительства Камбаратинской ГЭС с учетом и без учета влияния рельефа представлены на рис.2.1

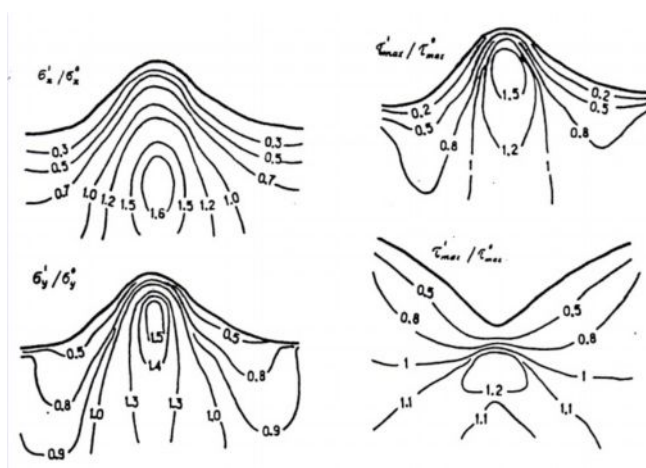


Рис.2.1. Зоны повышенных и пониженных напряжений



Зоны повышенных и пониженных напряжений на этом рисунке разделены изолиниями  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_m$ , имеющими значения равные единице. Анализ показывает, что зоны повышенных напряжений распространяются от поверхности вглубь массива на разные расстояния для различных напряжений и участков горы:

- а) линейные размеры зоны повышенных напряжений достигают: до  $1,5H$  по компоненте  $\sigma_x^0$  под подножием, до  $H$  – под вершиной горы; до  $2H$  – по компонентам  $\sigma_y^0$  и  $\tau_{\max}^0$  под подножием горы и  $0,2H$  – под вершиной горы;
- б) величины всех напряжений в пределах  $0,1H$  от дневной поверхности массива горы и каньона превышают от 2 до 10 раз величины напряжений, рассчитанных без учета рельефа;
- в) зоны пониженных напряжений по всем компонентам локализованы под вершиной горы и в зоне основания каньона на глубинах  $(0,2 \div -0,4)H$ .

При определении зон разрушений, исходя из теории Губера-Мизеса, использована величина накопленной упругой энергии  $\Pi_{11}$  деформации массива горных пород, которая состоит из двух характерных слагаемых – из энергии изменения объема  $\Pi_0$  и из энергии изменения формы  $\Pi_\phi$ :

$$\Pi_0 = \frac{3(1-2\mu)}{2E} \sigma_{\text{окт}}^2, \quad \Pi_\phi = \frac{3(1+\mu)}{2E} \tau_{\text{окт}}^2 \quad (2.12)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\mu$  - коэффициент Пуассона для горных пород, а

$$\sigma_{\text{окт}} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3, \quad \sigma_3 = \mu(\sigma_x^0 + \sigma_y^0),$$
$$\tau_{\text{окт}} = \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}.$$

По величине критерия  $K_2$  и энергии изменения формы  $\Pi_\phi$  прогнозируется, в какой степени и в каких зонах массива могут произойти интенсивные процессы деформации сдвига и скольжения пород.



Расчеты  $\Pi_1, \frac{\Pi_\phi}{\Pi_1}, \frac{\Pi_0}{\Pi_1}$  выполнены для массива пород горы и каньона

р.Нарын в районе строительства Камбаратинской ГЭС, а результаты приведены соответственно на рис.2.2а и 2.2б.

Для массива пород модуль упругости принят как в работе В.Я.Степанова[72]  $E = 5,4 \times 10^3$  МПа. Анализ показывает, что:

- а) величины полной энергии упругой деформации растут по глубине массива горы;
- б) имеются локальные зоны под склонами горы, где значения упругой энергии выше, чем в других зонах;
- в) энергия деформации массива увеличивается примерно в 2 раза, если в массиве кроме гравитационной действует еще горизонтальная сжимающая тектоническая сила;
- г) от совместного действия указанных сил в приконтурной зоне основания склона накапливается больше энергии ( до  $358 \times 10^3$  МПа), чем в других зонах;
- д) при действии гравитационных сил во всех частях массивов горы энергия объемизменения больше энергии формоизменения ;
- е) при совместном действии гравитационных и тектонических сил в приконтурных зонах массивов горы накопленная энергия формоизменения  $\Pi_\phi$  больше, чем энергия объемизменения  $\Pi_0$ . Накопленная упругая энергия деформации в различных частях массива горы и каньона распределена весьма неравномерно, наибольшее значение наблюдается в зоне оснований склонов гор, а также по мере увеличения глубины массива. Поэтому интенсивное проявление горного давления, которое после возведения подземных сооружений может возникнуть в указанных зонах.

Нарисунках 2.4 и 2.5 были приведены изолинии напряжений. Из рисунков видно, что имеются зоны растягивающих напряжений. Последние, если учесть слабую сопротивляемость горных пород на растяжение, указывают, в каких зонах массива пород карьера расположены зоны возможных раз-

рушений. Эти предположения подтверждаются представленным на рис.2.2. распределением потенциальных упругих энергий деформации массивов карьера, (полная энергия  $\Pi$ , энергия изменения объема  $\Pi_0$ , энергия изменения формы  $\Pi_\Phi$ ). при этом принято  $h = 600$  м,  $E = 4,2 \cdot 10^4$  МПа,  $\lambda = 0,4$ .

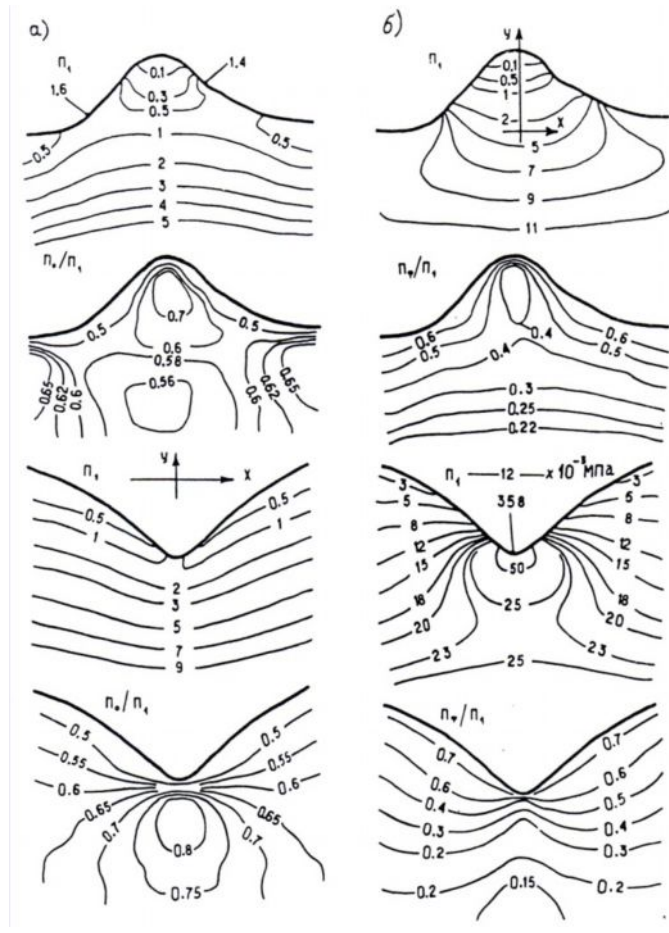
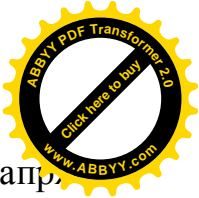


Рис.2.2. Распределение упругой энергии в массивах пород горы и каньона:  
 $\Pi_1$  – полная энергия деформации;  
 $\Pi_0$  – энергия изменения объема;  
 $\Pi_\Phi$  – энергия изменения формы.

## 2.2. Оценка устойчивости склонов гор и бортов,нагорных карьеров

В практике горного производства оценка устойчивости бортов карьера, даже когда не учитывается влияние прилегающих гор, является весьма актуальной проблемой. Одной из основных задач этой проблемы является определение напряженно-деформационного состояния массивов пород бортов карьера с учетом геометрических размеров, свойств и строения массива,



сейсмической и тектонической активности горного региона. Знание напряженно-деформированного состояния необходимо для определения места, форм и размеров вероятной поверхности разрушения (скольжения) массивов бортов карьера и для расчетов устойчивости бортов карьера по величине коэффициента запаса ( $K_3$ ) устойчивости, определяемого как отношение суммарных величин удерживающих и сдвигающих сил, имеющих место вдоль вероятной поверхности разрушения (скольжения).

Величины сдвигающих и нормальных составляющих напряжений в каждой точке массива на произвольно ориентированной площадке (в сечении массива пород) при заданном напряженном состоянии  $\sigma_x^0, \sigma_y^0, \tau_{xy}^0$ , вычисляются формулами

$$\left. \begin{aligned} \tau_n &= \frac{\sigma_y^0 - \sigma_x^0}{2} \sin 2\alpha + \tau_{xy}^0 \cos 2\alpha \\ \sigma_n &= \frac{\sigma_y^0 + \sigma_x^0}{2} + \frac{\sigma_y^0 - \sigma_x^0}{2} \cos 2\alpha + \tau_{xy}^0 \sin 2\alpha \end{aligned} \right\} (2.13)$$

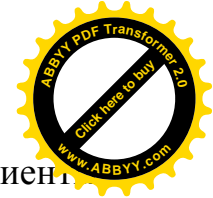
где  $n$  - нормаль к площадке сечения массива, составляющая с осью  $OX$  острый угол  $\alpha$ ;

$\sigma_n$  - нормальная составляющая напряжений к этому сечению массива пород.

Величина удерживающих касательных напряжений зависит только от прочности пород. Прочность пород, как критерий пластичности или критерий разрушения, для каждого вида горной породы устанавливается экспериментально (42,53,82) путем испытания пород при различных напряжений состояниях. В частности, теория прочности Мора, которая наиболее приемлема для горных пород, задается в виде огибающих кругов О.Мора аналитической зависимостью (2.9).

Если заданы конкретные значения компонент напряжений  $\sigma_{ij}^0$  в какой-либо точке массива горных пород, то (2.9) позволяет определить коэффициент запаса прочности в этой точке массива и условия наступления пластических деформаций или процесса разрушения.





Для оценки устойчивости бортов карьера рассчитаны коэффициент запаса устойчивости по условию прочности О.Мора.

$$K_3 = \frac{\sin\varphi_{\text{исп}}}{\sin\varphi_{\text{расч}}}$$

Здесь  $\sin\varphi_{\text{исп}}$  - данные экспериментов,  $\sin\varphi_{\text{расч}}$  - расчетные данные.

$$\sin\varphi_{\text{расч}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3 + 2C \cdot \text{ctg}\varphi}, \text{ где } \sigma_1 - \text{максимальные, } \sigma_3 -$$

минимальные значения напряжений;  $C$  - коэффициент сцепления;  $\varphi$  - угол внутреннего трения;

На рисунках 2.4.- 2.5 приведены результаты расчета коэффициент запаса устойчивости для разреза карьера «Кумтор».

В расчетах взяты 3 вида горных пород. Это крепкие песчаники (скальные породы), аргиллиты (полускальные) и пески глинистые мелкозернистые (рыхлые породы). Поскольку созданная нами математическая модель предназначена для однородной среды, в расчетах массив пород карьера рассматривается как однородный. В расчетах заложены следующие данные. Для крепких песчаников:  $\varphi=35^\circ$ ;

$C = 24$  МПа. Для аргиллитов :  $\varphi = 29^\circ$ ;  $C = 4$  МПа. Для песков глинистых мелкозернистых:  $\varphi=28^\circ$ ;  $C = 0,07$ . Соответственно объемные веса пород и коэффициенты Пуассона следующие :  $\mu = 0,25$  ;  $\gamma=2,6\text{г/см}^3$ ;  $\mu = 0,25$  ;  $\gamma=2,45\text{г/см}^3$ ;  $\mu = 0,25$  ;  $\gamma=1,8\text{г/см}^3$  .

На рис. 2.3 приведены изолинии равных коэффициентов запаса устойчивости для скальной породы (крепкие песчаники). Анализ результатов расчета показывает, что коэффициенты запаса устойчивости во всех точках массива больше единицы, т.е. массив, находится в устойчивом состоянии. Из рис.2.3 видно, что массив, который состоит из полускальных пород, находится в неустойчивом состоянии. Это наблюдается в зоне опорного давления правого борта. Участки ниже опорного давления правого борта и левый борт карьера находятся в устойчивом состоянии. На рис. 2.4 показаны коэффици-

енты запаса устойчивости для рыхлой породы. В данном случае борта карьера с прилегающей горой не может состоять из рыхлых пород. Мы допустили такой вариант расчета для того, чтобы проверить работоспособность созданной нами модели.

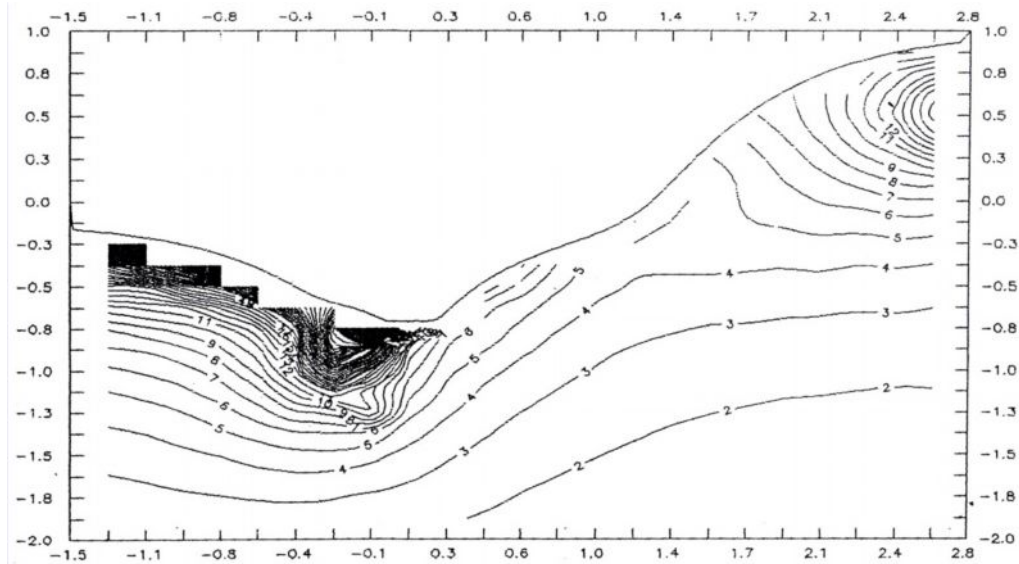


Рис.2.3. Изолинии коэффициентов запаса устойчивости крепких песчаников

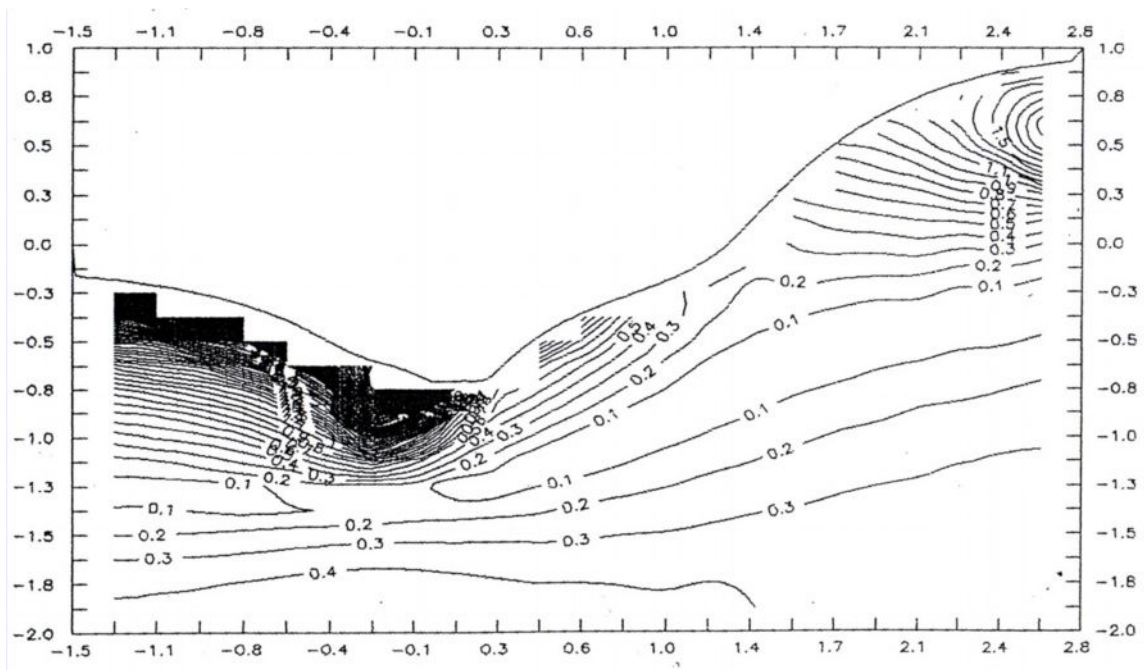


Рис.2.4. Изолинии коэффициентов запаса устойчивости аргиллитов

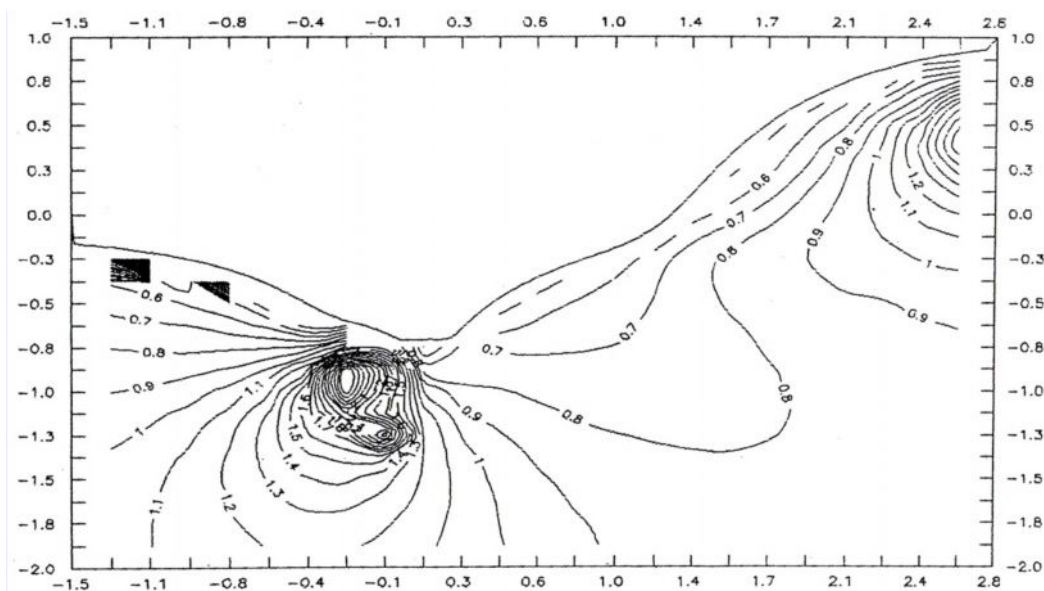


Рис.2.5. Изолинии коэффициентов запаса устойчивости глинистых мелкозернистых песчаников

## ВЫВОДЫ по главе II.

1. Накопленная упругая энергия деформации в различных частях массива горы и каньона распределена весьма неравномерно, наибольшее значение наблюдается в зоне оснований склонов гор, а также по мере увеличения глубины массива. Поэтому интенсивное проявление горного давления, которое возможно после возведения подземных сооружений, может возникнуть в указанных зонах.

2. Из представленных рисунков видно, что имеются зоны растягивающих напряжений. Последние, если учесть слабую сопротивляемость горных пород на растяжение, указывают, в каких зонах массива пород карьера расположены зоны возможных разрушений.

3. Изложенная процедура решения задач теории упругости МКЭ в *MathCad* позволяет избежать выполнения многих рутинных процедур: обращения матриц, решения СЛАУ, оптимизации исходных данных путем рациональной нумерации узлов. Весь аппарат для выполнения расчетов представлен в виде нескольких математических блоков.



4. Все расчеты выполняются с приемлемой для практического применения скоростью. Точность результатов определяется частотой разбиения расчетной области и качеством исходных данных.

5. Использование компьютера позволяет визуализировать расчеты данных в трехмерной области, что позволяет наиболее точно представить математическую модель распределения зон напряжений в исследуемой области.



## **ГЛАВА 3. УПРАВЛЕНИЕ НДС ПЛОТИН НА СКАЛЬНЫХ ОСНОВАНИЯХ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕШЕНИЯ И ПРИМЕНЕНИЕМ НОВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

### **3.1 Выбор программного обеспечения для реализации моделирования гидротехнических сооружений**

Проектирование и строительство крупных инженерных сооружений, в том числе гидротехнических (энергетического, транспортного, водохозяйственного и ирригационного назначения), особенно в горных районах с повышенной сейсмической активностью и сложным геологическим строением, требуют надежного инженерно-геологического обоснования проектных решений, базирующихся на расчетах прочности и устойчивости системы сооружение-основание. Для проведения расчетов или физического моделирования этих систем необходима инженерно-геологическая схема (модель) основания, содержащая информацию о структуре массива (геоструктурная модель) и физико-механических свойствах среды (модели свойств) с соответствующей для расчетов и экспериментов степенью упрощения (схематизации), но без нарушения принципиальных особенностей среды.

Геоструктурная модель основания отражает состав, структуру и состояние массива. По форме она представляет собой систему разрезов и карт, на которых выделены контуры квазиоднородных инженерно-геологических элементов. Геоструктурная модель составляется на основе результатов инженерно-геологических изысканий и исследований скальных массивов комплексом методов: геолого-съемочных, геофизических, горно-буровых, полевых, лабораторных исследований состава и свойств пород и геомеханических исследований (полевых и лабораторных). Представляется, что в программе инженерно-геологических изысканий предусматриваются целенаправленные геоструктурные исследования для участков основных сооружений, обеспечивающие составление с требуемой детальностью расчетных схем и моделей систем основание-сооружение.



Термины «схема» и «модель» имеют близкое смысловое значение (как итоговая форма обобщения материалов изысканий и исследований на разных этапах проектирования), но разные оттенки достоверности. На начальной стадии изучения массива (предпроектная документация: схема использования реки и технико-экономическое обоснование ТЭО) предпочтительно употребление термина «схема», а на стадиях «проекта (рабочего проекта)» и «рабочей документации» - термина «модель». При рассмотрении методических вопросов схематизации допустимо употребление терминов «схема» и «модель» как синонимов.

Геоструктурные модели качественно и количественно характеризуют особенности геологического строения и горную геометрию скального массива и обеспечивают возможность систематизировать результаты полевых и лабораторных исследований свойств пород, распространять нормативные (расчетные) значения показателей этих свойств на его объемные элементы, квазиоднородные по составу, строению и состоянию. Таким образом, геоструктурная модель служит основой для составления специализированных моделей характеристик свойств.

Исходя из вышеизложенного, в процессе проектирования все лабораторные и теоретические данные применимы только в одном отдельно взятом месте. Но если собрать данные нескольких проектов плотин и провести анализ, то можно построить характерную таблицу, демонстрирующую зависимость скальных пород и построения бетонного основания и других параметров расчета гидросооружений. Эти таблицы показывают взаимосвязь пород скального массива и расчетных характеристик плотин или гидростанций структурировать и разместить в информационной системе, то можно построить некую совокупность связанных между собой знаний, способных автоматизировать процесс разработки гидросооружений. Такую базу знаний можно применять при проектировании различных плотин. Данные периодически должны обновляться и накапливаться. Например, в компьютер вводятся ла-



бораторные и геологоразведочные данные, а компьютерная система указывает варианты возможного построения бетонных оснований плотин.

### 3.1.1 Компьютерное моделирование в расчете плотин

Проектирование гидротехнических сооружений является одним из самых трудоемких, сложных этапов строительства плотин. Одним из объектов исследований является строительство опорных конструкций. Спецификой их изучения является большая продолжительность исследований во времени, значительные размеры объектов в пространстве, недоступность непосредственного изучения традиционными методами и средствами. Для проведения исследований в натуральных условиях требуются значительные затраты, а иногда осуществить желаемый эксперимент или наблюдение технически очень сложно, опасно или принципиально невозможно.

В таких случаях используют методы математического или компьютерного моделирования. В настоящее время разработано большое количество математических моделей, полученных на основе строгих аналитических решений соответствующих задач теории упругости. Однако в ряде случаев (неоднородность опор, наличие трещин, сопряжения и пересечения стока, требующие постановки объемной задачи и др.) аналитические решения не охватывают решение задачи проектирования. В этих случаях целесообразно использование приближенных методов решения задач и численных моделей гидротехнических сооружений.

Одним из таких методов, получающим все большее распространение в моделировании и вычислительных программных комплексах, является метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод рассматривает ограниченную область (плоскую или объемную), которая разбивается на конечное число элементов, при этом стыковка элементов осуществляется только в вершинах. Таким образом, условия равновесия и совместности деформаций соблюдаются только в общих узлах элементов. Для определения неизвестных усилий в узлах и смещений узлов по заданным усилиям или перемещениям на границе



области составляются уравнения равновесия и совместности деформаций, число которых соответствует числу узлов расчетной схемы.

Для решения таких задач используются современные программно-вычислительные комплексы Cosmos/Design Star, MSC/Nastran (Nasa STRuctural ANalysis) for Windows, ANSYS, Structure Cad, «Лира-Windows», «Мираж», «Мономах» и др.

Анализ конструкций с использованием МКЭ является фактическим мировым стандартом для прочностных и других видов расчетов конструкций. Основой этого служит универсальность МКЭ, позволяющая единым способом рассчитывать различные конструкции с разными свойствами материалов и находить параметры напряженно-деформированного состояния плотины.

На базе совершенных компьютерных систем возможно построение единой системы знаний, способной объединять и систематизировать огромный потенциал научных исследований, проведенных в течение нескольких лет. Таким образом, используя информацию, систематизированную в таких системах, возможно построение моделей гидросистем, с помощью которых возможен более глубокий и расширенный анализ работы гидротехнического сооружения.

Построение компьютерной системы знаний выполняется в несколько этапов:

1. Сбор и обработка информации в виде конструированных знаний по гидросооружениям (книги, статьи, научные доклады);
2. Расчет и моделирование элементов гидротехнических сооружений;
3. Объединение расчетов и теоретических знаний в единый пользовательский интерфейс.

Для моделирования по своим характеристикам наиболее подходят математические пакеты: MAPLE, MATLAB, MATHCAD, которые позволяют создавать математические модели гидросооружений и проводить анализ технических характеристик [6].





Пакет MATLAB- это высокопроизводительный язык, предназначенный для матричных вычислений, и в настоящее время является одним из самых мощных универсальных вычислительных пакетов, применяемых для решения задач, возникающих в различных прикладных областях. В пакете реализованы классические численные алгоритмы решения задач линейной алгебры, нахождения значений определенных интегралов, аппроксимации, решения систем или отдельных дифференциальных уравнений[4]. Визуальная среда программирования включает команды высокого уровня для визуализации двух и трехмерных данных, а также интерактивную среду, с помощью которой возможно создание и оформление графиков, используемых в научной деятельности.

Преимущество системы многоцелевого назначения MATLAB перед другими языками программирования состоит в том, что в MATLAB можно программировать весь изучаемый комплекс, а не отдельно взятый блок или устройство, как это делается в программировании. Встроенный программный пакет Simulink позволяет с помощью графических объектов создавать сложные алгоритмы процессов гидродинамики. Средствами MATLAB могут быть успешно решены и довольно сложные инженерные задачи, такие, как моделирование и анализ функций гидротехнических сооружений.

Важной составной частью исследовательского процесса является выбор среды программирования. Современное развитие информационных и вычислительных технологий привело к возможности использования для научных исследований таких программных продуктов как системы компьютерной математики Mathematica, Maple, MATLAB. Располагая мощными библиотеками функций и прекрасными графическими возможностями, они освобождают разработчика от большого объема рутинной работы, ускоряют процесс подготовки программного кода и позволяют сделать упор на содержательной стороне исследования моделей.

В данной работе предпочтение отдано системе MATLAB, Simulink, прежде всего потому, что в ней возможно создание развитых интерфейсных



приложений, имеются удобные средства разработки анимации для визуализации динамических процессов, а графический вывод носит объектный характер и с ним можно взаимодействовать как на программном, так и на интерфейсном уровне, на любом этапе работы с программой. Исследуемые модели имеют удобный графический интерфейс с различными элементами управления, с помощью которых пользователь имеет возможность изменять параметры моделей, что позволяет анализировать ее поведение при различных условиях.

Основное назначение информационной системы является систематизация, накопление и предоставление сведений в удобной для восприятия форме[8]. Задача любой системы заключается в сокращении времени, занятого при разработке и проектировании любой строительной конструкции. Набор сведений должен содержать не только набор стандартов, норм и правил, соответствующих требованиям строительства, но и возможности моделирования новых строительных конструкций и делать численный расчет, в соответствии с запросами пользователя. При этом любая информационная система должна обладать уникальным свойством саморазвития и самосовершенствования в области строительных процессов и систем автоматизации проектирования. Использование специализированных автоматизированных информационных систем на базе вычислительных комплексов приводит к более рациональному способу получения инженерно-проектировочных расчетов и эффективной научно-исследовательской работе. Постоянно обновляющаяся и хранящаяся информация в базе данных информационной системы позволяет быстро создать или найти требуемую модель гидротехнической конструкции для ее дальнейшего применения. На основе современных вычислительных сетей Интернет и нейрокомпьютерных информационных технологии возможно создание мощных саморазвивающихся информационных систем, связанных с проектированием плотин, дамб и т.д.

Для создания информационных систем привлекаются многочисленные технологии, использующие трансляцию информации по Интернет[8]. Многие



из этих технологий стали языками серверного программирования, применяемые для построения динамических Web-сайтов, с помощью которых происходит управление информацией, хранящейся в многочисленных таблицах, составляющих основу информационной системы. К наиболее популярным технологиям построения серверной модели относятся CSS, XML, CGI-сценарии, ColdFusion, ASP, ASP.NET, IIS, серверы баз данных, а также PHP[7].

Серверные технологии выполняют программные задачи, в частности, вычисление значения выражений, проведение математических расчетов и построение графических изображений на сервере, т.к. браузеры способны обрабатывать только HTML код, пользовательский стиль – CSS и JavaScript. Результат передается на пользовательский браузер, что значительно сокращает трафик передачи данных по сети. Для создания серверных сценариев и отправки динамических данных широко используются другие серверы – серверы баз данных, которые способны накапливать и хранить большие объемы информации, такие как MySQL, MSSQL[7]. Решение определенного рода задач сопровождается выбором различного сочетания ключевых компонентов Apache/PHP/MySQL или IIS/ASP/MSSQL.

Одним из важных элементов проектирования гидротехнических сооружений является моделирование движения потока воды через сооружения. Вследствие того, что гидротехнические сооружения в большинстве своем являются уникальными по расположению, конструкции, расходам воды и пр., гидравлические явления на них также являются уникальными. В настоящее время широко используются два вида моделирования – физическое и математическое моделирование.

В физическом моделировании, основанном на экспериментальных исследованиях модели гидроузла, имеется основная проблема практической ценности и применимости получаемых результатов к натурному объекту. Основным преимуществом физического моделирования является наглядность.



Математическое моделирование гидравлических явлений реализуется, как правило, в виде численного моделирования. Оно позволяет получить экспресс оценку проектного решения, проводя расчеты с большим количеством вариантов, на ранних стадиях проектирования и, при необходимости, произвести его корректировку. Используемые в программном пакете MATLAB[6] численные методы трехмерного математического моделирования позволяют получить достоверные факты, как правило, с заранее неизвестными параметрами гидротехнических сооружений.

В качестве примера применения новых компьютерных технологий в моделировании гидротехнических сооружений можно привести примеры использования математических пакетов MATLAB для анализа расчета физико-механических характеристик различных модулей и блоков гидросооружений.

Условием расчета является то, что заранее известен тип грунта и его свойства. Вторым условием расчета является условие пропуска эксплуатационного расхода воды, т.е. плотина является фильтрующей. Математические модели, рассчитанные с использованием численных методов, заложенных в программные продукты MATLAB.

В процессе математического моделирования выбранная математическая модель подвергается всестороннему исследованию с целью ее уточнения и улучшения. Определяется, какими факторами можно пренебречь, а какие следует учесть. Кроме того, решаются вопросы выбора вычислительного алгоритма, оценки устойчивости процесса вычислений и его точности. Примером численного моделирования процессов и трехмерной, цветовой визуализации результатов может послужить использование программных пакетов MATLAB. Для решения такой задачи нужно смещать координату  $x$  – точки приложения нагрузки относительно начала моделируемого блока гидротехнического сооружения к его концу и вычислять значение в каждой точке, при этом можно получить полную картину изменения параметров гидротехнического сооружения.

### 3.2 Устойчивость плотин против сдвига и прочность их скальных оснований

Нарушение устойчивости плотины и ее смещение могут произойти вследствие: сдвига сооружения при нарушении контакта его с основанием или по принципам или ослабленным зонам основания; разрушения скального массива основания под действием развивающихся в нем напряжений.

Сдвиг плотины по скальному основанию может произойти в случае нарушения сдвиговой прочности контакта ее с основанием, которая описывается теорией Кулона-Мора:

$$\tau_{пр} = \sigma \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3.1)$$

Соответственно условие прочности запишется в виде или, переходя к условиям (рис. 3.1)



а – плоский горизонтальный

б – по наклонной поверхности

Рис. 3.1. Схемы к расчету устойчивости плотины на сдвиг

И учитывая коэффициенты предельного состояния:

$$k_n n_c \sum Q \leq (\sum P \operatorname{tg} \varphi + cF) m \quad (3.2)$$

где  $\sum P$  и  $\sum Q$  – расчетные равнодействующая сдвигающих сил и равнодействующая нормальных к плоскости сдвига сил;  $\operatorname{tg} \varphi$  и  $c$  – параметры сдвиговой прочности основания (для скальных оснований – соответственно коэффициент трения и удельное сцепление);  $F$  – площадь поверхности сдвига [1].



Расчетные значения параметров сдвиговой прочности скального основания  $\operatorname{tg}\varphi$  и  $c$  определяют, для оснований сооружений I и II классов по результатам полевых или лабораторных испытаний, проводимых методом сдвига бетонных штампов или скальных целиков. Для оснований сооружений III и IV классов, а также для сооружений всех классов на стадии технико-экономического обоснования строительства - нормами (СНиП 2.02.02-85), используются расчетные значения  $\operatorname{tg}\varphi$  и  $c$ .

На рис. 3.1. показан пример построения математической модели устойчивости плотины против сдвига.

Если плоскость сдвига наклонена под углом  $\alpha$  к горизонту (рис. 3.1), то формула устойчивости плотины имеет вид[2]:

$$k_n n_c (Q \cos \alpha - V \sin \alpha) \leq [(V \cos \alpha + Q \sin \alpha) \operatorname{tg}\varphi + cF]m \quad (3.3)$$

Приведенная выше формула составляет часть математической модели гидротехнических сооружений. Применение MATLAB позволяет построить модель устойчивости плотины, по которой можно анализировать стабильную работу плотины (рис. 3.2).

Как правило, моделирование объектов, помимо чисто научных целей, может иметь и прикладное значение. Для проектирования и анализа гидротехнических систем (например, устойчивость плотин) разработан аппарат SimulinkMATLAB. Для построения функциональной блок-схемы моделируемых устройств Simulink имеет обширную библиотеку блочных компонентов и удобный редактор блок-схем, что дает возможность легко построить требуемую математическую модель, в частности Math – раздел математических блоков. Simulink автоматизирует, наиболее трудоемкий этап моделирования: он составляет и решает сложные системы алгебраических и дифференциальных уравнений, описывающих заданную функциональную схему (модель), обеспечивая удобный и наглядный визуальный контроль над поведением созданного пользователем виртуального устройства гидросооружения.

Созданная имитационная модель на Simulink позволяет проверять устойчивость плотин в реальном режиме времени. При изменении условий сдвига плотины относительно основания (параметры  $V$ ,  $C$ ,  $\alpha$ ,  $F$ ,  $m$ ) и запуске математической модели равновесия плотины, в дисплеях 1 и 2 отражаются параметры, при которых возможна стабильная работа плотины.

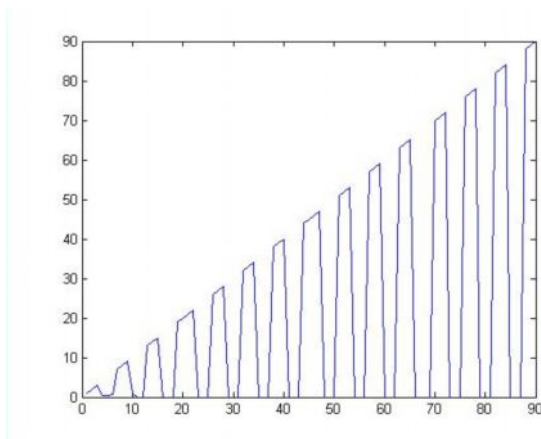


Рис. 3.2. Отношение наклона зубьев к сдвиговой прочности плотины.

Эту модель (рисунок 3.2) можно применять в случае устройства зубчатой поверхности основания с наклоном зубьев под углом  $\alpha$  к горизонту. Рисунок 3.3. отражает параметры работы плотины с зубчатой поверхностью при наклоне зубьев. При изменении начальных условий можно имитировать работу плотины с наклонной зубчатой поверхностью (рис 3.2.), а также сдвиг по наклонной и прямой поверхности.

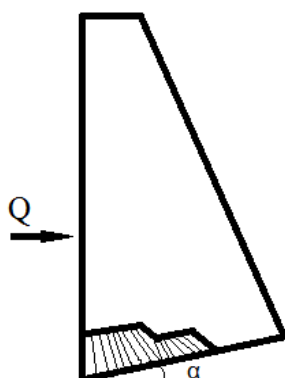
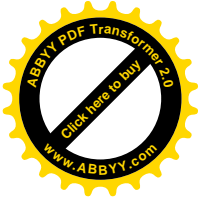


Рис. 3.3. Схема работы плотины с наклонной зубчатой поверхностью.

В скальных основаниях иногда могут иметь место глубинный сдвиг, аналогичный сдвигу в скальных основаниях.









### 3.3 Гашение энергии при режиме свободно отброшенной струи.

Режим свободно отброшенной струи применяется при глубинах нижнего бьефа, значительно меньших второй сопряженной глубины, и возведении водосбросов на прочных слабо размываемых основаниях. Дальность отброса струи от сооружения увязывается с возможностью обеспечения его безопасной эксплуатации при достижении проектных максимальных размеров ямы размыва.

Кинетическая энергия свободно отброшенной струи гасится за счет преодоления сопротивления воздушной среды при аэрации струи и в основном при растекании ее в водяной подушке после погружения под уровень воды в нижнем бьефе, а до стабилизации ямы разрыва энергия струи расходуется и на размыв грунта. Иногда для защиты дна его закрепляют бетоном или устанавливают стенку, чтобы повысить глубину воды в нижнем бьефе в месте падения струи (рис. 3.5). Рассеянию энергии падающей струи способствует распад ее в воздухе при аэрации, поэтому практикуется установка в конце водосброса расщепителей струи и рассеивающих трамплинов. При проектировании плотин часто используют режим отброшенной струи, который является простым способом проектирования, но образование водяной пыли отмечает его недостатки.

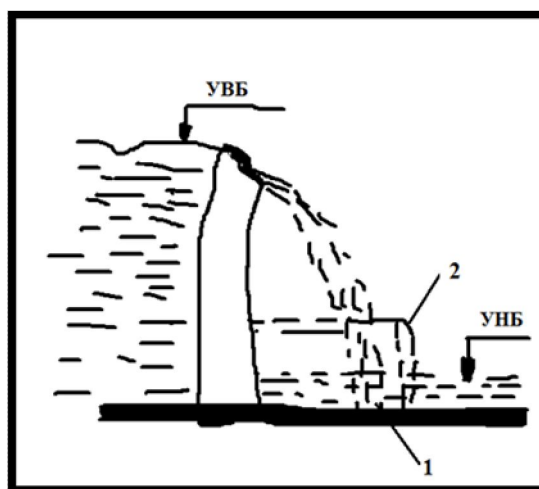


Рис. 3.5. Свободно падающая струя на арочной плотине.

Формула расчета длины отлета струи в зависимости от наклона носка и скорости водяного потока приведена ниже:

$$L = k_a \frac{v_1^2}{2g} \sin 2\alpha \cdot \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2h_{пг}}{v_1^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (3.4)$$

где  $k_a$  – коэффициент, учитывающий влияние аэрации на дальность отлета струи;  $\alpha$  – угол наклона носка;  $v_1$  – скорость схода воды [1].

Построение модели отлета струи в нижнем бьефе (рис. 3.5) и анализ результатов определяет возможность оптимального отклонения водной струи и размер ямы размыва. Результат изменения длины отлета от угла наклона носка представлен на рис. 3.6.

Модель отлета струи построена с помощью встроенного в MATLAB пакета Simulink. Таким образом, построена часть математической модели гидротехнического сооружения. С помощью графического программирования на Simulink возможно строить сложные действующие модели сооружений и давать комплексный подход к решению задач проектирования гидротехнических сооружений. При задании параметров расчета отлета струи и использовании модели расчета (рис. 3.6) возможно получить теоретическую зависимость длины отлета струи при различном угле отлета.

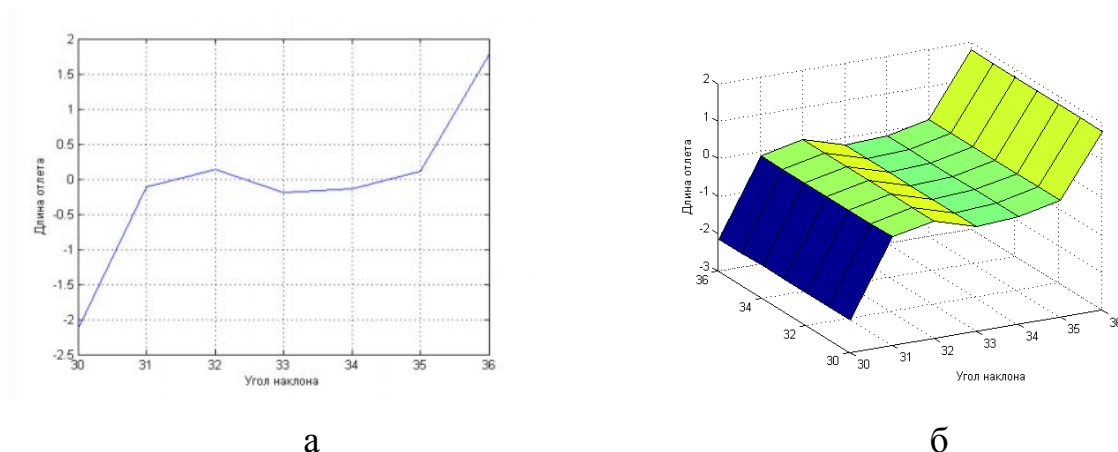


Рис. 3.6. Зависимость длины отлета струи от угла наклона носка.

Графики изменения длины отлета струи (рис. 3.6) позволяют более полно проанализировать изменение длины струи от наклона носка, т.к. дальность



отброса струи от сооружения увязывается с возможностью обеспечения ст безопасной эксплуатации, что наглядно показывают построенные графики.

Если представить информацию в трехмерной плоскости, то можно получить наиболее насыщенную картину результатов вычислений отлета струи по результатам просчета, соответственно анализ данных выражений становится проще и легче (рис. 3.6б).

### **3.4 Воздействие температуры на арочные плотины.**

Арочные плотины являются статически неопределенными системами с расчетной точки зрения, и, в связи с этим, наиболее подвержены температурному воздействию. Температурные напряжения в таких конструкциях могут достигать значительных величин. Для уменьшения температурных напряжений в строительный период арочные плотины возводятся в виде строительных секций или столбов, швы между которыми замоноличивают только после затухания температурно-усадочных явлений и снижения температуры бетона до температуры, близкой к средней годовой температуре воздуха для района строительства.

#### **3.4.1 Температурный режим арочных плотин**

В строительный период температурный режим арочной плотины, состоящей из отдельных незамоноличенных столбов, по существу мало отличается от режима массивных бетонных блоков. После завершения строительства и замоноличивания межсекционных швов температурный режим конструкции зависит от температуры окружающей среды. Изменения температуры во внутренних точках плотины происходит относительно средних (средне-многолетних) значений, которые определяются из рассмотрения стационарного процесса.



### 3.4.2 Стационарный процесс.

Приближенно температурную стационарную задачу для арочных плотин можно свести к температурному расчету отдельных арочных элементов, в которых температура изменяется лишь по толщине конструкции.

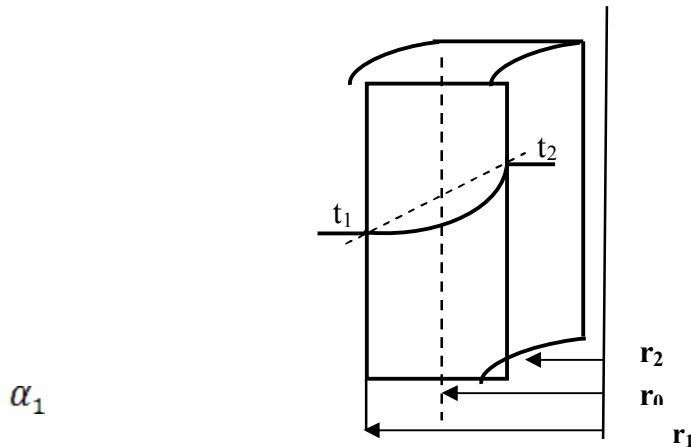


Рис. 3.7. Схема распределения температуры в стенке цилиндрических блоков.

В этом случае решение сводится к решению дифференциального уравнения Лапласа, записанного в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial t}{\partial r} = 0 \quad (3.5)$$

Решением данного уравнения является логарифмическая функция, которая при обозначениях, принятых на рисунке 3.7, имеет вид в зависимости от граничных условий:

- для граничных условий I рода:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln \frac{r_1}{r} \quad (3.6)$$

- для граничных условий III рода:

$$t = t_{\hat{a}} + \frac{t_1 - t_{\hat{a}}}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} \ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 r_2}} \left( \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_1}{r} \right) \quad (3.7)$$

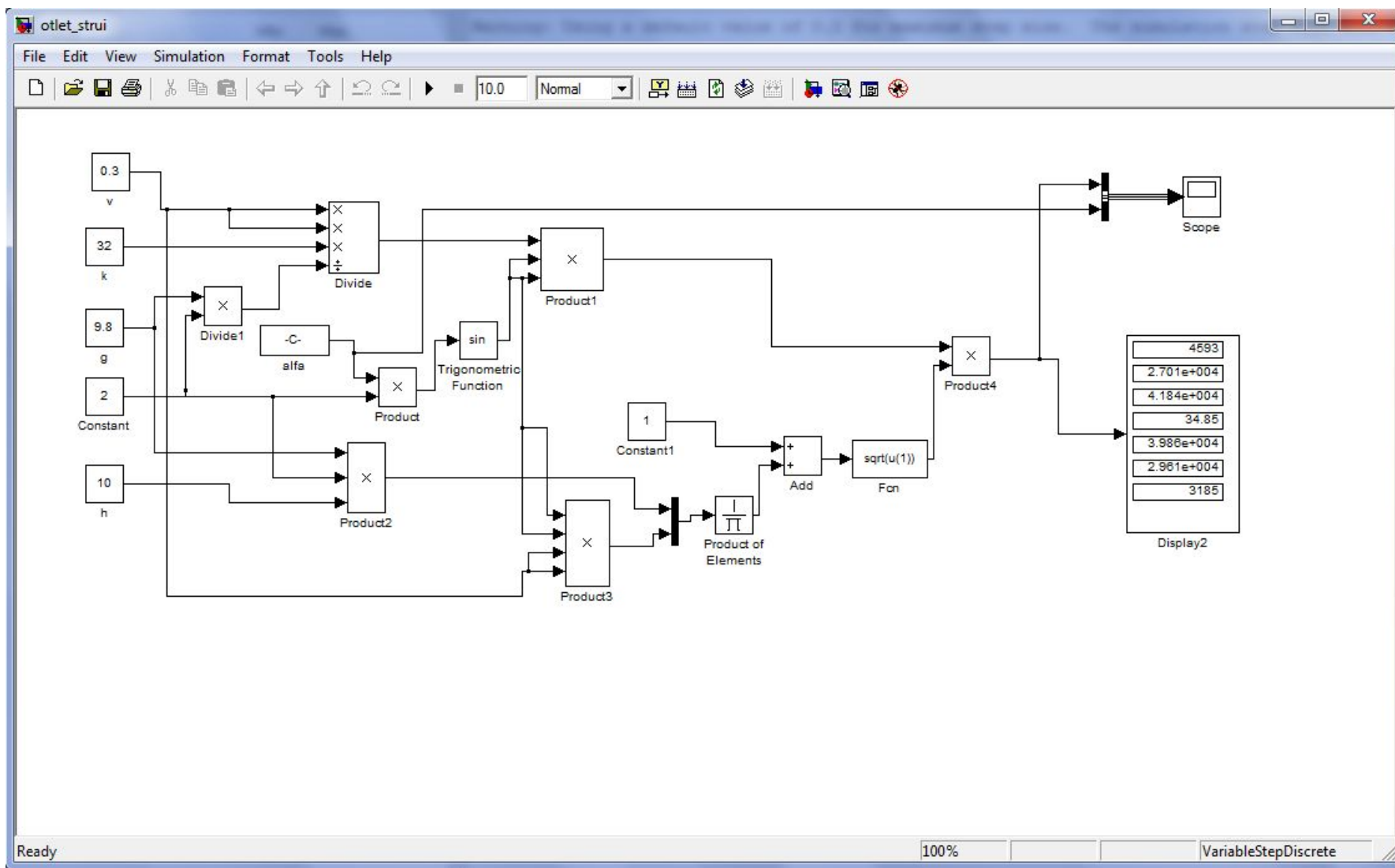
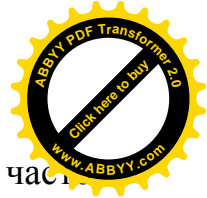


Рис. 3.8. Модель расчета длины отлета струи.



Логарифмическая зависимость (3.6) при практических расчетах частоты заменяется линейной функцией.

В этом случае по аналогии с плоской плитой будем иметь:

$$t = t_1 + \frac{t_2 - t_1}{2\xi} (\xi + \rho) \quad (3.8)$$

где  $\xi$  – относительная толщина цилиндрического элемента;

$\rho$  – относительная координата, изменяющаяся от  $+\xi$  до  $-\xi$ ; при этом

$$r = r_0(1 - \rho); \quad r_1 = r_0(1 - \xi); \quad r_2 = r_0(1 + \xi).$$

Ошибка при замене логарифмической зависимости на линейную по отношению к общему перепаду температур:  $\Delta = t_2 - t_1$  для тонких цилиндрических стенок (для которых  $\xi \leq 0,2$ ) не превышает 5% [1].

В отдельных случаях для построения математической модели арочной плотины в расчете температурной зависимости можно использовать математический пакет «MATLAB», с помощью которого возможно построение и анализ температурной зависимости, которая входит в общую схему построения информационной модели плотины.

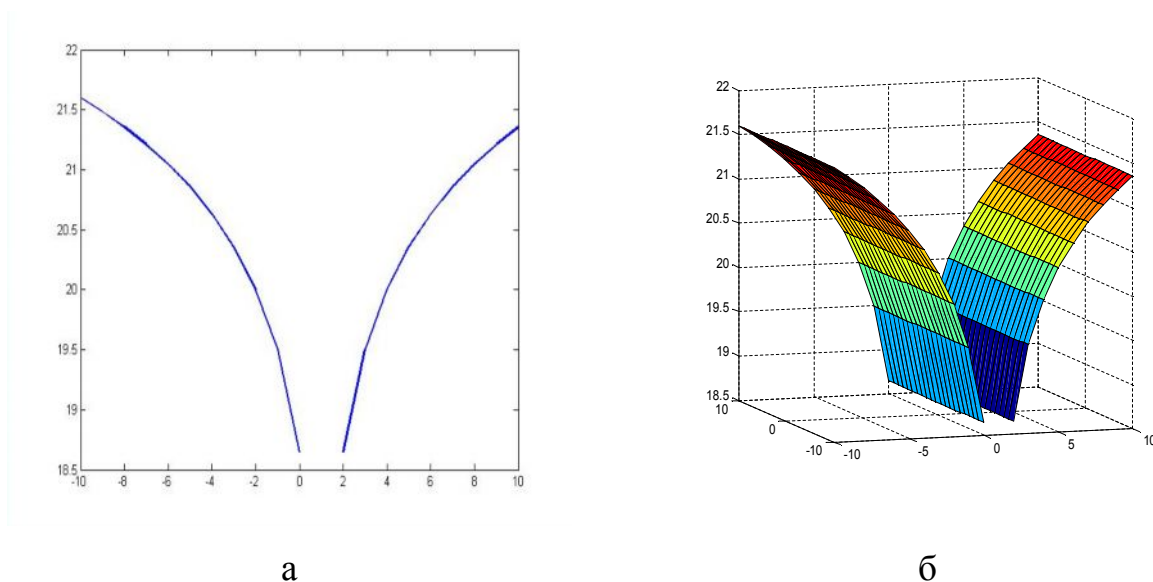


Рис. 3.9. Изменение температуры блока арочной плотины для граничных условий I рода.

В случае нестационарного процесса (при гармонических колебаниях температуры) решение сводится к решению дифференциального уравнения Фурье:



$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \quad (3.9)$$

Решение данного уравнения в комплексных величинах при двусторонних колебаниях температуры среды и граничных условиях III рода по аналогии с решением задачи для плоских конструкций можно записать в виде (3.10):

$$T = \beta_{HH} \beta_t t_0^H e^{i\omega n \tau} + \beta_{HE} \beta_{-t} \cdot t_0^H e^{i\omega n \tau} + \beta_{EE} \beta_{-t} t_0^E e^{i\omega n \tau} + \beta_{EH} \beta_t t_0^E e^{i\omega n \tau} \quad (3.10)$$

где  $t_0^H$  и  $t_0^E$  - амплитуды колебаний температур среды с наружной и внутренней стороны плиты;  $\beta_{HH}, \beta_t$  - коэффициенты затухания температурных колебаний на поверхностях плиты.

### 3.5 Метод центробежного моделирования

Этот метод позволяет получить на модели напряжения  $\sigma_m$  от объемных сил, равным натурным напряжениям  $\sigma_n$ , что достигается размещением модели в центрифуге и воздействием на нее результирующего ускорения. Масштабный коэффициент  $\alpha_m$  рассчитывается по формуле 3.11[2].

$$\alpha_m = \sqrt{g^2 + (\omega^2 R)^2} \quad (3.11)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения;  $R$  и  $\omega$  - соответственно радиус вращения и угловая скорость ее вращения, обеспечивающие действие центробежного ускорения  $\omega^2 R$ .

При действии объемных сил в натуре  $\sigma_n = \rho_n g l_n$ , а на модели  $\sigma_m = \rho_m \alpha_m l_m$ . Так как при центробежном моделировании проводят исследования с натурным материалом, то плотность материала  $\rho_n = \rho_m$ . При выполнении условий  $\sigma_n = \sigma_m$  следует:

$$\alpha_m = g \alpha_i \quad (3.12)$$

что позволяет из уравнения (3.12) получить формулу для определения угловой скорости  $\omega$ , при которой обеспечивается равенство напряжений в натуре и на модели:





$$\omega = 4 \sqrt{\frac{(\alpha_i^2 - 1)g^2}{R^2}} \approx \sqrt{\frac{\alpha_i g}{R}} \quad (3.13)$$

Если модель и сооружение в натуре выполнены из одного и того же материала, то значение  $\rho$ ,  $\sigma$  и  $E$  одинаковы на модели в натуре, и поэтому для механического подобия необходимо выполнить следующее условие:

$$\alpha l = const \quad (3.14)$$

Из которого можно определить масштабные коэффициенты для различных физических величин.

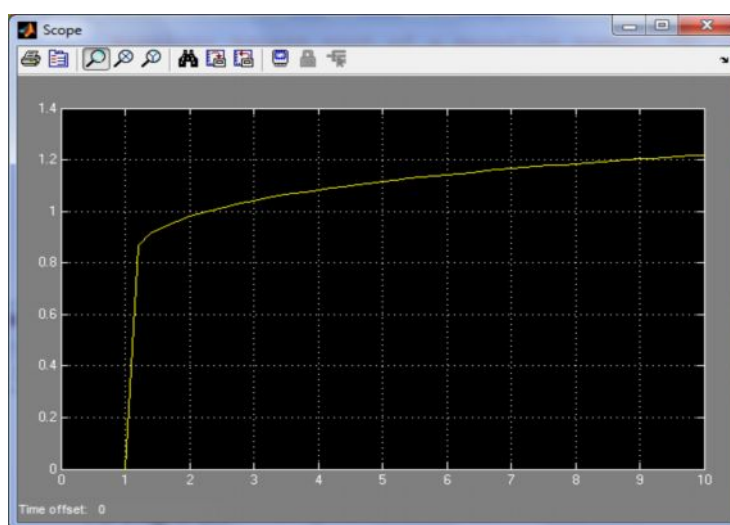
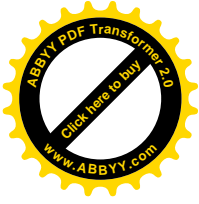


Рис. 3.10. Изменение угловой скорости модели.

На рис. 3.12. показана модель центробежной машины. Эту математическую модель можно использовать в моделировании вязких процессов.

Центробежное моделирование особенно ценно при изучении устойчивости плотины.

При систематизации всех расчетов и построения математических моделей расчета различных блоков гидротехнических сооружений возникает острая необходимость в автоматизации сбора, обработки и хранения подобного рода данных. Следовательно, возникает необходимость построения распределенной информационной системы, связанной с гидротехническими сооружениями.



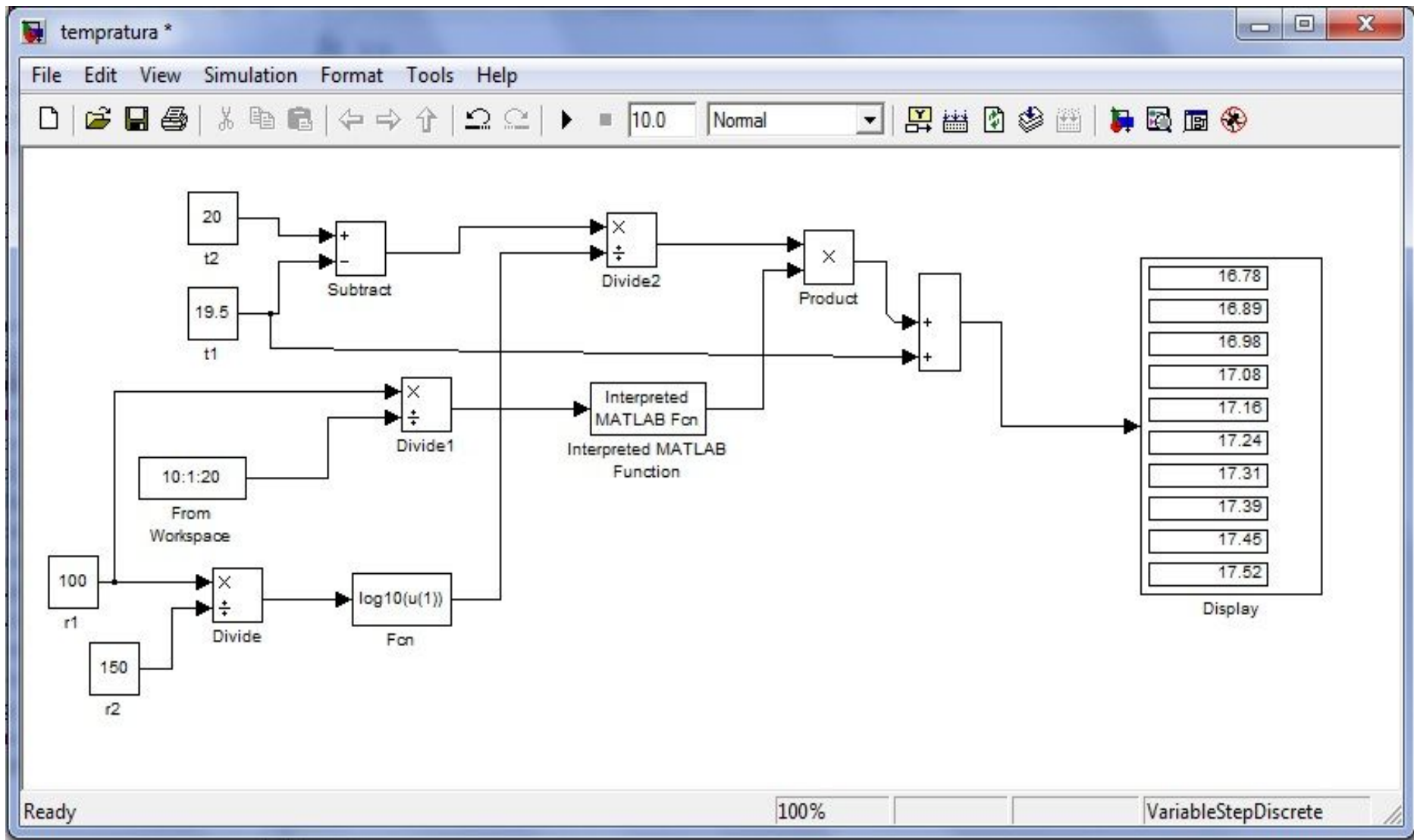


Рис. 3.11. Модель изменения температуры.

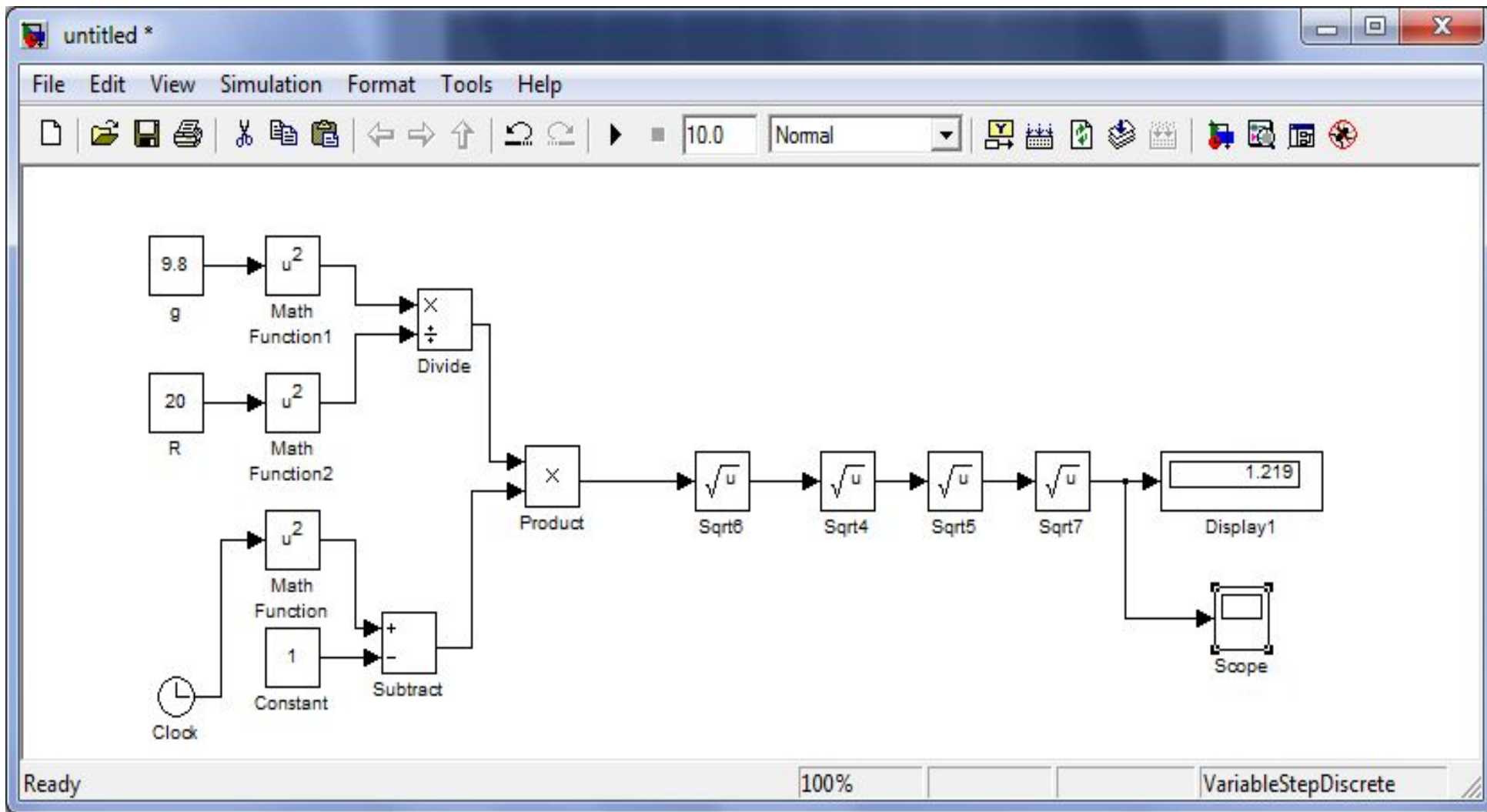


Рис. 3.12. Модель центробежной машины.



### **ВЫВОДЫ по главе III.**

1. Приводятся примеры численного расчета различных воздействий на плотину и трехмерной, цветовой визуализации результатов вычислений с использованием программного пакета MATLAB.

2. Графические трехмерные изображения, построенные по расчетам формул[], позволяют сделать заключение о характере изменения параметров температуры в зависимости от точки изменения температуры вдоль гидросооружения.

3. Анализ температуры проводится при визуальном сравнении графиков, что тоже приводит к легкости и скорости выбора решения. Использование программных пакетов MATLAB и Simulink для численного исследования приводит к получению более легкой математической модели.

4. Использование Simulink дает возможность более точного построения математической модели гидротехнического сооружения. Такой метод показывает, что сложные формулы описания процессов могут рассчитываться более точно с использованием пакета Simulink.

5. Анализируя работу обоих программных продуктов, можно сделать следующий вывод: Simulink лучше подходит к построению математической модели гидротехнической конструкции. Математический пакет Simulink содержит более мощный графический интерфейс и большую библиотеку численных методов, используемых для решения линейных и нелинейных задач проектирования гидротехнических сооружений.



## ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Исходя из концепций мирового уровня развития информационных технологий, следует более глубоко внедрять системы интеллектуального характера в элементы проектирования гидротехнических сооружений. Таким элементом являются базы знаний, позволяющие быстро и правильно найти решение в вопросе сооружений. База знаний предназначена для поиска ответа в работе гидротехнических сооружений. Так как база знаний используются для проектирования плотин различного рода, дамб и т.д., она рассматривает лишь небольшую часть возможных вариантов конструкций, но она позволяет расширять информационную систему, запрограммированную на специальном языке.

Наиболее частый язык для написания программ - язык WPF, он строится на основе Web-технологий. Так как программа построена на основе Web-технологий, она может быть доступной через сеть Интернет.

Современные базы знаний работают совместно с информационными системами поиска информации и имеют тщательно продуманную структуру и формат представления знаний.

База знаний - это информационная система, разработанная для оперирования знаниями. Полноценные базы знаний содержат в себе не только фактическую информацию, но и правила вывода, допускающие автоматические умозаключения о вновь вводимых фактах и, как следствие, осмысленную обработку информации. Следовательно, область знаний о гидротехнических сооружениях должна быть достаточно полная и продуманная. Для полноты получения данных информационная система должна содержать не только материал научных изысканий, но и возможности производить расчеты.

Иерархический способ представления в базе знаний набора понятий и их отношений между объектами и сведения о свойствах конкретных объектов необходимо строить на основе информационных систем. Такой способ



построения информации позволяет создать возможность поиска способов решения проблем из некоторой предметной области, например, гидротехнических сооружений, основываясь на записях базы данных описания ситуации.

Простые базы знаний могут использоваться для создания технической информации по гидротехническим сооружениям. Главная цель создания таких баз – быстрый поиск решения какой-либо проблемы, связанной с проектировкой плотин.

Для полноценной работы баз знаний являются следующие правила: достоверность конкретных и обобщённых сведений, имеющихся в базе данных, релевантность информации, получаемой с помощью правил вывода базы знаний.

Проектирование сложных моделей гидротехнических сооружений возможно только на основе всестороннего и многовариантного анализа хранящейся в системе информации. Анализ созданной базы знаний производят компьютерные программы, благодаря чему аналитическая база имеет удобный интерфейс. Правильная организация созданной базы знаний позволит производить выборки и исчисления при проектировании гидротехнических сооружений. В настоящее время для этих целей используются OLAP-технологии, но они обладают жесткой структурой и имеют строгую проблемную ориентацию, рассчитанную на неизменность видов анализа, а также неизменность показателей, по которым проводится анализ. В отличие от OLAP, база знаний обеспечивает создание хранилища информации с «универсальной» структурой, инвариантной относительно разных видов анализа, разных видов прикладных задач и предметных областей с возможностью гибкой и быстрой настройки системы на проведение любого вида анализа. На основе базы знаний возможно построение системы поддержки процесса принятия решения, используемого при анализе расчетов отдельных блоков гидротехнических сооружений.



Активная система обеспечивает управление сбором информации, самостоятельно (автоматически) решает, какая информация в текущий момент времени является наиболее важной, где она находится, какие процедуры должны быть осуществлены для ее получения и т. д. Система обеспечивает выполнение следующих функций:

- управление регулярным сбором информации по заранее определенной схеме с автоматическим формированием соответствующих запросов;
- контроль поступления информации и ее соответствия запросам;
- выявление и прогнозирование возможности возникновения экстраординарных ситуаций;
- нужную информацию и формирование к ним разовых запросов.

При построении баз знаний необходимо учитывать способы считывания данных из информационной системы во внутренние структуры (массивы вопросов, правил, атрибутов и гипотез) базы знаний. Если количество данных не соответствует ожидаемому, выдается сообщение об ошибке и переход на следующий этап не выполняется.

Далее принимаются и анализируются ответы на запросы, полученные из информационной системы. База знаний просматривает массив правил, проверяет условие срабатывания каждого правила, если в нём отсутствуют еще не определенные элементы. Если условие выполняется, производится выполнение действия, которое может включать в себя команды поиска данных в информационной системе, а также вывода дополнительного текста.

Затем программа проверяет условия подтверждения гипотез. Если хотя бы одно условие найдено, работа программы завершается, и список данных выводится на экран.

Если подтвердившихся данных нет, программа просматривает список вопросов, находит первый вопрос, ответ на который ей неизвестен (не задан пользователем или не определен правилом), и отображает его пользователю.





Если такого вопроса не найдено, программа выводит сообщение о неполноте базы знаний.

В конце работы программа выводит таблицу значений ответов на вопросы и атрибутов.

При приеме каждого нового ответа происходит новый запуск программы. Значения ответов сохраняются между запусками с использованием механизма сессий PHP. Данная база знаний работает по схеме обратного логического вывода: она старается получить ответы на вопросы от пользователя или путем применения правил логического вывода и просматривает список гипотез, пытаясь найти гипотезу, удовлетворяющую полученным данным. В отличие от информационной системы, база знаний с логическим выводом пытается подобрать знания на поставленный вопрос, чтобы путем применения информации из баз данных получить правильный ответ.

В некоторых базах знаний может применяться как прямой, так и обратный поиск. Выбор информации зависит от типа задачи. Диагностические задачи лучше всего решаются с помощью обратного поиска, в то время как задачи проектирования проще всего поддаются решению с помощью прямого логического вывода.

#### **4.1. Описание языка базы знаний**

Информационная система базы знаний хранится в базе данных, имя которой задано в программе базы знаний. Записи базы знаний текстового файла являются блоками базы знаний. Строка, описывающая блок базы знаний, состоит из типа блока и полей с параметрами. Значения полей параметров отделяются друг от друга символами табуляции. Несколько символов табуляции подряд заменяются на один, что может быть использовано для выравнивания полей для удобства чтения базы знаний. Первым параметром всегда является номер блока. Проверка вопросов, правил и гипотез происходит в порядке возрастания номеров.



Существует 4 типа блока: QUESTION, ATTRIB, RULE и HYP.

Блок QUESTION описывает вопрос, задаваемый пользователю. Он имеет следующие параметры:

1. номер вопроса;
2. тип значения. Возможные варианты: YESNO, NUMBER, STRING и LIST. YESNO задает вопрос типа «да/нет», причём ответ «да» рассматривается как значение 1, «нет» - как 0. NUMBER задает, что пользователь должен ввести число в диапазоне, задаваемом параметрами 5 и 6, STRING — строку символов, а LIST — выбрать вариант из списка. Для блока вопроса типа LIST параметр 5 задает строку со всеми вариантами выбора, а параметр 6 — символ, используемый для разделения отдельных вариантов. Значением ответа является выбранный номер в списке, начиная с 1;
3. текст вопроса;
4. название вопроса;
5. минимальное значение диапазона (NUMBER) или строка вариантов выбора (LIST);
6. максимальное значение диапазона (NUMBER) или символ-разделитель вариантов (LIST). Для вопросов других типов параметры 5 и 6 не должны присутствовать.

Блок ATTRIB описывает атрибут (вспомогательное значение, вычисляемое и используемое при проверке правил и гипотез). Этот блок имеет следующие параметры:

1. Номер атрибута.
2. Название атрибута.
3. Необязательное значение по умолчанию.

Блок RULE описывает правила вывода экспертной системы. Этот блок имеет следующие параметры:

1. Номер правила.
2. Условие срабатывания правила.



3. Выполняемые действия.

4. Название правила.

Блок НУР описывает гипотезы (альтернативные варианты принятия решений) экспертной системы. Он имеет те же параметры, что и блок RULE, за исключением выполняемого действия.

В состав команд проверки условий и действий могут входить операторы языка РНР со следующими отличиями:

1. Переменные (со знаком \$ в начале имени) не допускаются.
2. В команде проверки условия, допустим оператор = для проверки на равенство.
3. В команде выполняемого действия допустимо не ставить точку с запятой после последнего оператора.
4. В командах проверки условия и выполняемого действия используются имена Q и A с номером, задающие значения вопросов и атрибутов с этим номером.

Перечень вызываемых функций РНР не ограничивается, что позволяет нарушить логику работы программы или даже создать угрозу безопасности при неправильном построении программы баз знаний.

Преимуществом такого языка является широкий круг операторов (взятый «в наследство» от языка РНР), а недостатком — неудобство добавления нового вопроса между двумя вопросами с соседними номерами, которое требует переписывания вопросов, и отсутствие команды, изменяющей порядок проверки вопросов. Для решения этой проблемы можно предложить задание приоритетов вопросов и задание вопросов в порядке приоритета. Приоритет вопроса может меняться динамически в процессе вывода путём присвоения значения параметру приоритета.

В процессе вывода происходит вывод названий применяемых правил и подтверждённых гипотез на экран. Также в конце работы программы происходит вывод известных программе значений вопросов и атрибутов на экран в



виде таблицы. Это может использоваться для проверки конструкций гидротехнических сооружений.

В базе знаний применяются вопросы, для ответа на которые пользователю необходимо выбрать один вариант из списка ответов, либо из списка «да»/«нет», либо ввести число.

Для полноценного функционирования базы знаний необходимо спроектировать информационную систему, охватывающую полный спектр математических моделей и расчетов узлов гидротехнических сооружений. Поэтому целью работы является создание информационной системы.

Существует множество технологий и инструментальных средств, с помощью которых можно реализовать оптимальный проект информационной системы, начиная с этапа анализа и заканчивая созданием программного кода системы. В большинстве случаев эти технологии предъявляют весьма жесткие требования к процессу разработки и используемым ресурсам, а попытки трансформировать их под конкретные проекты оказываются безуспешными. Эти технологии представлены CASE-средствами верхнего уровня или CASE-средствами полного жизненного цикла (upper CASE tools или full life-cycle CASE tools). Они не позволяют оптимизировать деятельность на уровне отдельных элементов проекта, и, как следствие, многие разработчики перешли на так называемые CASE-средства нижнего уровня (lower CASE tools). Однако они столкнулись с новой проблемой — проблемой организации взаимодействия между различными командами, реализующими проект.

Унифицированный язык объектно-ориентированного моделирования Unified Modeling Language (UML) явился средством достижения компромисса между этими подходами.

В основе проектирования информационной системы лежит моделирование предметной области. Для того чтобы получить адекватный предметной области проект информационной системы в виде системы правильно работающих программ, необходимо иметь целостное, системное представление



модели, которое отражает все аспекты функционирования будущей информационной системы. При этом под моделью предметной области понимается некоторая система, имитирующая структуру или функционирование исследуемой предметной области и отвечающая основному требованию – быть адекватной этой области.

Предварительное моделирование предметной области позволяет сократить время и сроки проведения проекторочных работ и получить более эффективный и качественный проект. Без проведения моделирования предметной области велика вероятность допущения большого количества ошибок в решении стратегических вопросов, приводящих к неправильным расчетам гидротехнических сооружений и высоким затратам на последующее перепроектирование системы. Вследствие этого все современные технологии проектирования информационных систем основываются на использовании методологии моделирования предметной области.

Информационная система гидротехнических сооружений построена на основе математических моделей, которые позволяют в ходе исследования получать знания о свойствах изучаемых объектов или процессов.

Основная задача построения проекта информационной системы заключается в том, чтобы на момент запуска системы и в течение всего времени ее эксплуатации можно было обеспечить:

- требуемую функциональность системы и степень адаптации к изменяющимся условиям ее функционирования;
- требуемую пропускную способность системы;
- требуемое время реакции системы на запрос;
- безотказную работу системы в требуемом режиме, иными словами - готовность и доступность системы для обработки запросов пользователей;
- простоту эксплуатации и поддержки системы;
- необходимую безопасность.



Производительность является главным фактором, определяющим эффективность системы. Хорошее проектное решение служит основой высокопроизводительной системы.

Проектирование информационной системы гидротехнических сооружений охватывает три основные области:

- проектирование объектов математических моделей гидросооружений, которые будут реализованы в базе данных;
- проектирование программ, которые будут обеспечивать выполнение запросов к результатам расчетов гидротехнических сооружений и их блоков;
- учет конкретной технологии, а именно: топологии сети, конфигурации аппаратных средств, используемой архитектуры (файл-сервер или клиент-сервер), параллельной обработки, распределенной обработки данных и т.п.

Следующий этап проектирования информационной системы - это поиск способа, который удовлетворяет требованиям расчетных параметров с учетом заданных ограничений.

К любому проекту предъявляется ряд абсолютных требований, например, ограничения по выбору материала, изменение температурных напряжений арочных плотин и т.д. Одна из сложностей проектирования состоит в том, что реализация того или иного расчета требует максимального приближения к реальным условиям эксплуатации плотин.

С другой стороны, в реальных условиях проектирование - это поиск способа, который удовлетворяет требованиям функциональности системы средствами имеющихся технологий с учетом заданных ограничений.

При выборе подхода проектирования информационной системы, работающей исключительно по направлению расчета и моделирования гидротехнических сооружений, были рассмотрены несколько вариантов схем создания информационной системы: каскадная модель, поэтапная модель с промежуточным контролем и т.п. Наиболее оптимальный вариант – классиче-

ский подход к разработке информационной системы, один из которых - схема «водопада» (рис. 4.1):

На этапе проектирования формируется модель данных. В качестве исходной информации используются результаты анализов расчетных данных гидротехнических сооружений либо математические модели элементов гидросооружений. Конечным продуктом этапа проектирования являются:

- схема базы данных (на основании ER-модели, разработанной на этапе анализа);
- набор спецификаций модулей системы (они строятся на базе моделей).



• Рис. 4.1. Подход к проектированию «Водопад».

Для оптимальной работы информационной системы была выбрана распределенная модель, при работе которой информация распределяется по серверам баз данных с использованием системы контроля распределения данных. Используется серверная модель хранения данных расчета гидротехнических сооружений. На этапе «Анализа» были рассмотрены несколько моделей, построенных на современных компьютерных технологиях передачи данных по сети. Выбор производился с учетом всех возможных критериев.

Основную нагрузку при передаче информации выполняет клиент-серверная модель, отвечающая за формирование интерфейса пользователя,

логическую обработку данных и за манипулирование данными, хранящимися в базе данных.

Клиент-серверная модель характеризуется наличием двух взаимодействующих самостоятельных процессов - клиента и сервера, которые могут выполняться на разных серверах, обмениваясь данными по сети. Клиент посылает на сервер запросы, сформулированные на языке SQL[42].

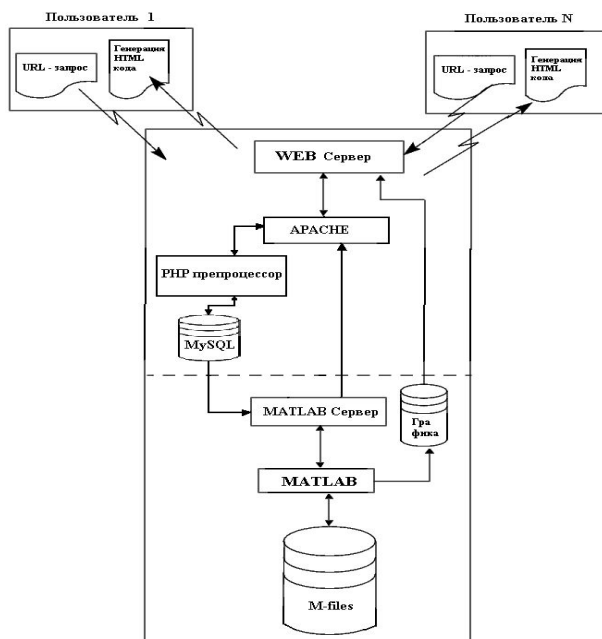


Рис. 4.2. Структурная связь Web и MATLAB серверов

Сервер обрабатывает эти запросы и переадресует их базе данных, где происходит процесс выбора необходимой программы, адрес которой передается на сервер MATLAB[80]. Результат вычислений в виде трехмерного изображения передается через Web-сервер клиенту. Процесс передачи данных показан на рисунке (рис. 4.2).

При выборе клиент-серверной модели основное внимание было уделено формированию интерфейса пользователя и передачи данных, а также простота и низкая стоимость при установке и программировании. С этой целью были рассмотрены несколько технологий построения клиент-серверной модели[13]:





– *ASP (Active Server Page)* – технология, разработанная корпорацией Microsoft. Используется для написания мощных клиент-серверных Интернет приложений. Она позволяет создавать динамические страницы HTML. Технология встроена в межсетевой информационный сервер IIS, поддерживаемый операционной системой Windows. Технология ASP использует все ресурсы Windows для подключения баз данных MS Access, FoxPro и др. к динамическим Web – страницам, управляющих потоком данных. При этом система защиты информации возлагается на операционную систему. Недостатком технологии является отсутствие переносимости Web- приложений на сервера, работающие под управлением других операционных систем, а также отсутствие возможности контроля ошибок, возникающих при передаче информации.

– *ColdFusion*– высокопроизводительная технология, предназначенная для быстрого построения крупномасштабных систем, а также мощное средство разработки интерактивных и динамических Web - страниц, путем обработки информации, полученной из баз данных. Разработка и детальная отладка кода Web - страницы и создаваемых Web-приложений происходит проще и быстрее за счет усовершенствованных тэгов, ускоряющих обработку и передачу данных. Работа с данными осуществляется через ODBC, OLE DB и собственные драйверы, обеспечивающие прямой доступ к Oracle, Sybase, Informix, DB2. Интеграция данных из источников осуществляется с помощью запросов к данным в памяти с использованием стандартного языка SQL. Кроме этого, технология осуществляет безопасность и контроль управления потоками. Обеспечение защиты обеспечивается интегрированной системой аутентификации, которая позволяет использовать существующие службы безопасности каталогов LDAP или доменов Windows NT. Поддержка SSL-соединений, сертификатов X.509, шифрование страниц приложений, а также двухуровневый защитный барьер для исполняемых приложений на уровне операционной системы и на уровне сервера обеспечивают высочайшую сте-



пень безопасности в условиях окружающей сетевой среды. ColdFusion Server может работать с любыми Web-серверами Microsoft Personal Web Server, Microsoft IIS, Netscape Enterprise Server и Apache. Отличительной особенностью ColdFusion является построение интеллектуальных поисковых приложений. С помощью полнотекстового и индексного поиска Verity K2 осуществляется эффективный поиск неструктурированных текстовых данных, расположенных в реляционных базах данных, а также в текстовых или других офисных документах. Недостатком является низкая переносимость, высокая оплата и малая распространенность.

– *PHP* - технология с открытым исходным кодом для построения динамических Web – страниц, а также легко сочетается с другими свободно распространяемыми продуктами, такими, как Web – сервер Apache и система управления базами данных MySQL. PHP легко переносимый код, т.е. он может работать под управлением любой операционной системы. Кроме этого, PHP обладает рядом положительных сторон: совместимость с серверами Windows, UNIX, OS/2 и др., поддержка различных технологий, развитая функциональность для работы с сетевыми соединениями, поддержка более 20 баз данных и мощная функциональная система для работы с ними, возможность создания объектно-ориентированных приложений, простой синтаксис, открытость кода.

Анализ характеристик приведенных описаний технологий и поставленной задачи показывает, что сочетание технологий Apache/PHP/MySQL представляет собой наиболее удобное решение для создания информационной системы расчета многослойных конструкций. Для выбора серверной модели послужили следующие факты: возможность использования MATLAB на рабочих станциях, не позволяющих, в силу ограниченных возможностей, установку этого программного пакета, а также системы накопления данных, необходимых для быстрого поиска и запуска нужной программы расчетов. Web-сервер Apache обладает возможностью под-



ключать серверные приложения на выполнение, в частности MATLAB-Server, использование мощного сервера баз данных – MySQL, в настоящее время наиболее широко распространенного в Интернете, простой синтаксис и переносимость языка программирования PHP, бесплатное распространение вышеперечисленных программных продуктов.

#### **4.2. Использование сервера MATLAB**

Современные технологии вычислительной сети позволяют пользование общими программными продуктами пользователям, не имеющим на своих компьютерах такого программного обеспечения. Это во много раз упрощает процесс решения задач, связанных с отсутствием дискового пространства для установки требуемого программного обеспечения. При инсталляции большинства программных продуктов на компьютере клиента устанавливается только ядро программы, а основные библиотеки и графические возможности – на другом, более мощном компьютере. Такой подход подразумевает подключение только по локальной сети. При использовании компьютерных Интернет-технологий, когда процесс вычисления и обработки информации графическим интерфейсом происходит на сервере, а на клиентский компьютер пересылается только готовый результат вычисления, снижается объем текста программ исполняющих модулей, значительно повышается скорость обмена данными и количество пользователей информационной системой.

MATLAB имеет встроенный пакет взаимодействия с Web-сервером, позволяющий разрабатывать приложения для работы в Интернете, используя стандартные компоненты[8]. Во время работы сервера взаимодействие приложения с клиентом происходит через программу Internet Explorer или другой браузер, поэтому клиенту необходима только скоростная линия связи с сервером. При этом пакет может быть установлен на отдельном компьютере. Для использования программы, сервер Apache был настроен на работу с



MATLAB-server. Для этого в файл конфигурации – `httpd.conf` были добавлены строки, разрешающие использовать приложение как CGI-скрипты:

```
ScriptAlias /cgi-bin/ "D:/www/cgi-bin/"  
AddType application/x-httpd-m phtml m  
Action application/x-httpd-m "/cgi-bin/matweb.exe"
```

Первая строка из приведенного выше фрагмента описывает директорию хранения CGI-скриптов, используемых для работы сервера, вторая строка сообщает Web-серверу Apache, что все файлы с расширением `.m` должны передаваться на обработку серверу MATLAB, третья строка указывает имя файла для запуска, предназначенного для обработки `m`-файлов. В файле конфигурации MATLAB-Server также были добавлены новые строки, описывающие наименование сервера, имя и путь доступа к исполняемому файлу:

```
[Mp]  
mserver=localhost  
mldir=d:/Internet/home/nagruzka
```

Следующий фрагмент кода страницы ввода расчетных параметров показывает ввод данных и запуск программы "nagruzka.m" на выполнение:

```
<form action="nagruzka.m" method="post">  
<input type="hidden" name="mlmfile" value="nagruzka" />  
<div align="left">Ввод параметра нагрузки</div>  
<div align="left">  
<input type="text" size="2" maxlength="3" name="line" />  
</div>  
<input name="submit" type="submit" value="Расчет" />  
</div>  
</form>
```

При правильной конфигурации серверов после выбора клиентом нужного метода расчета и ввода расчетных данных на MATLAB-Server передается имя файла, записанного в переменную `name="mlmfile"`, который содержит



соответствующую исполняемую программу, результат выполнения программного модуля отображается на экране компьютера клиента в виде трехмерного изображения (Рис. 4.3.).

Полный текст кодов страниц информационного Web – сайта приведен в приложении (П.1).

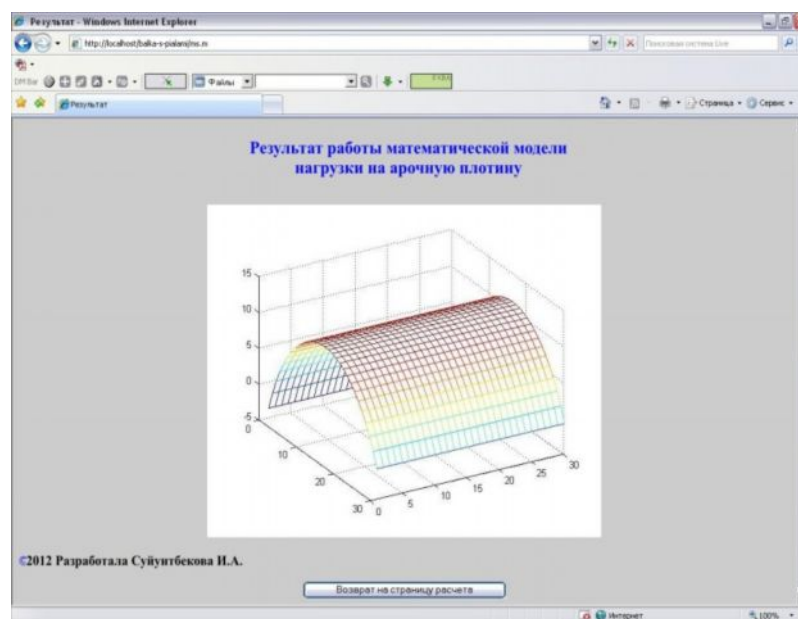


Рис. 4.3. Вывод результатов расчета.

#### 4.3. Структура базы данных

В соответствии с выбранной стратегией проектирования информационных систем, следующий этап проектирования информационной системы – построение базы данных. База данных информационной системы была создана с использованием сервера MySQL, предназначенного для управления базами данных через Интернет. Она содержит три таблицы, связанные между собой по принципу «один ко многим», т.е. один вид многослойной конструкции может быть закреплен различными способами и рассчитан несколькими методами. На рисунке (рис. 4.4) представлена структура базы данных с названием полей.

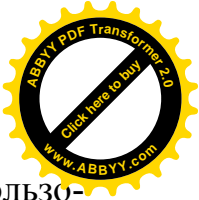


Рис. 4.4. Структура базы данных

В таблице «список гидросооружений» содержится список наименований типов гидротехнических сооружений, которые информационная система может предложить клиенту для расчета, вторая таблица базы данных «Список используемых методов» содержит перечень способов закрепления многослойных конструкций, а третья – «Список запускаемых модулей» включает перечень адресов файлов, содержащих программы MATLAB, предназначенных для расчета механических свойств слоистых конструкций. Запуск соответствующего модуля производится в случае, если поля *IDm* и *IDn* соответствуют значениям полей с аналогичным названием из таблиц «Список конструкций» и «Список используемых методов», т.е. исполняемый модуль соответствует выбранной плотине и методу расчета. Для управления базой данных информационной системы используется страница администрирования, которая позволяет изменять, добавлять или удалять записи. Вход на эту страницу защищен паролем.

#### 4.4. Описание Web-сайта информационной системы

Web-сайт информационной системы содержит шесть Web-страниц: главная, выбор гидротехнического сооружения, ввод параметров расчета, вывод результата, страница администрирования сайта, а также файл стилей, используемых браузером для формирования дизайна. Код написан на языке серверного программирования *PHP* и языке гипертекстовой разметки *HTML*.



При создании Web-сайта был сделан анализ способов получения пользователем конечного результата расчета многослойных конструкций:

1. формирование ответа на запрос с подбором графика из списка готовых графических изображений, сгруппированных по методу расчета многослойной балки и введенных начальных параметров. Т.е. изначально формируется альбом результатов вычислений с различными начальными параметрами, в котором пользователь выбирает график, соответствующий его требованиям;

2. формирование ответа на запрос, отсылаемого клиентом на сервер, с выбором соответствующей запросу программы MATLAB и запуском ее на выполнение с последующей пересылкой результата расчета в виде трехмерного изображения на компьютер пользователя.

При первом способе используется большой объем дискового пространства и увеличивается время поиска нужного графика, что невыгодно самому пользователю. С другой стороны, пользователь не всегда сможет выбрать график с требуемыми параметрами расчета.

Второй способ организации обработки данных существенно увеличивает используемое дисковое пространство сервера. Это достигается наличием в программе кодов, определяющих время существования изображения, по истечении которого это изображение автоматически удаляется. Следующий фрагмент кода исполняемой программы устанавливает время существования файла изображения и передает результат расчета на сервер в виде файла с изображением графика:

```
cd(h.mldir);  
wscleanup('ml*m.jpeg', 10);  
set(gcf, 'Position', pos, 'PaperPosition', [.90 .90 15 12]);  
view(-40, 15);  
drawnow;  
s.GraphFileName = sprintf('./icons/%sm.jpeg', mlid);
```



```
wsprintjpeg(f, s.GraphFileName);  
s.GraphFileName = sprintf('./icons/%sm.jpeg', mlid);  
templatefile = which('./m2.html');
```

где функция `wscleanup('ml*m.jpeg', 10)` устанавливает время существования изображения, равное 10 минутам.

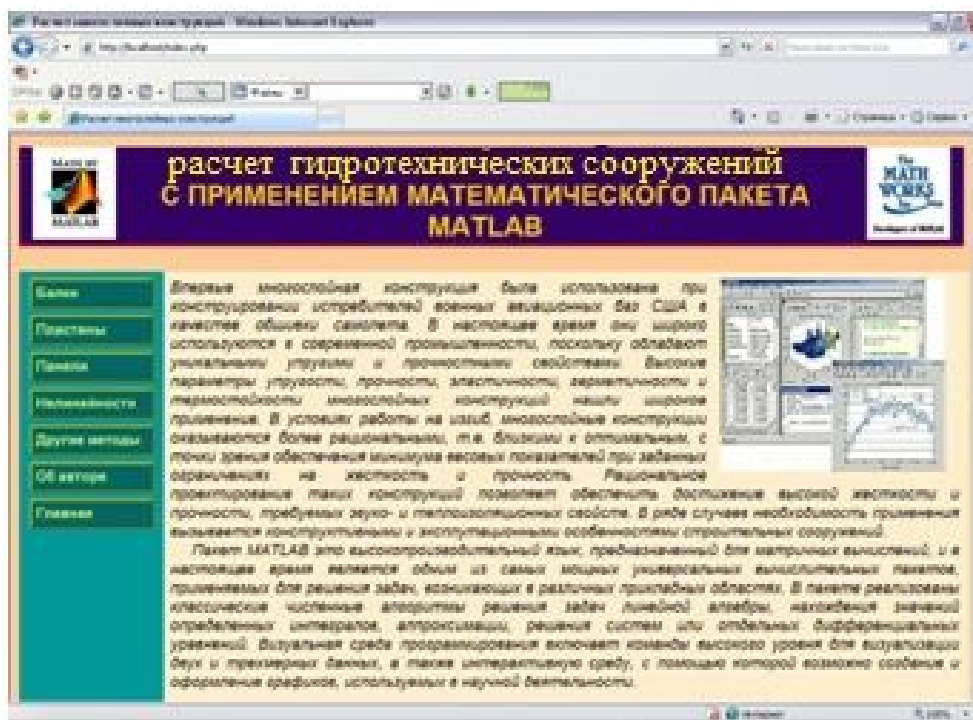


Рис. 4.5. Главная страница Web-сайта информационной системы.

Для более удобного восприятия информации, размещенной на Web-сайте, дизайн главной и страницы «выбора способов расчета» выполнены в классическом, выдержанном стиле. На главной странице (Рис. 4.5) представлено краткое описание многослойных конструкций и используемых программ.

При выборе гидротехнического сооружения из меню, расположенного с левого края Web-станции открывается «выбор способов расчета» (Рис. 4.6) с перечнем способов и методов расчета, используемых для выбранной конструкции. Написанный код на PHP позволяет использовать базу данных для выбора метода расчета плотин.



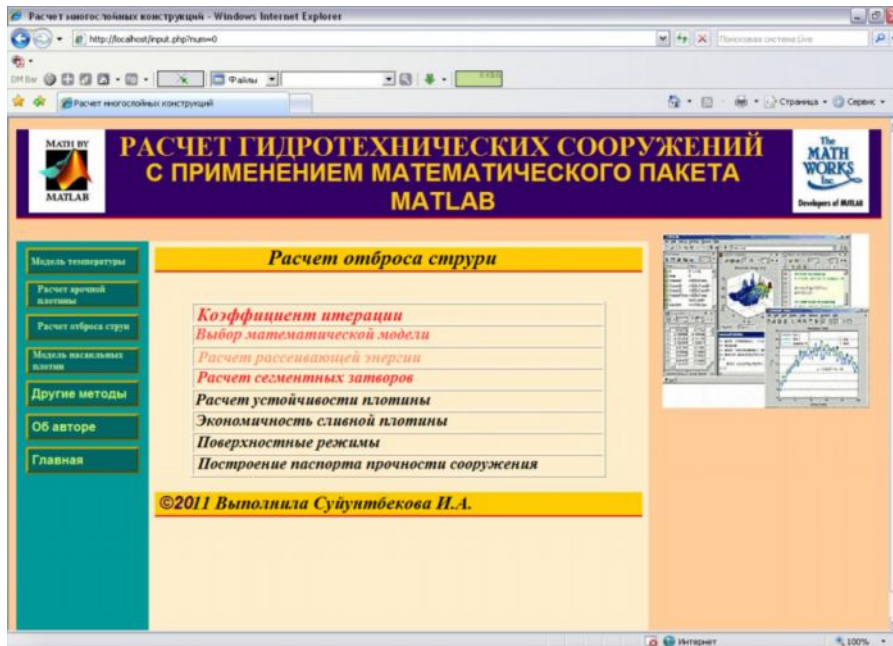


Рис. 4.6. Страница выбора расчета.

Страница ввода параметров предназначена для ввода расчетных данных и запуска соответствующей программы MATLAB на выполнение (Рис. 4.7). Дизайн выполнен в виде таблицы. В каждой ячейке указаны требуемые значения расчета гидротехнических сооружений. Для расчета выбирается нужная ячейка, затем в поле ввода вносится требуемый угол падения воды и нажимается кнопка «Расчет». Результат выводится на отдельной странице (Рис. 4.8.).

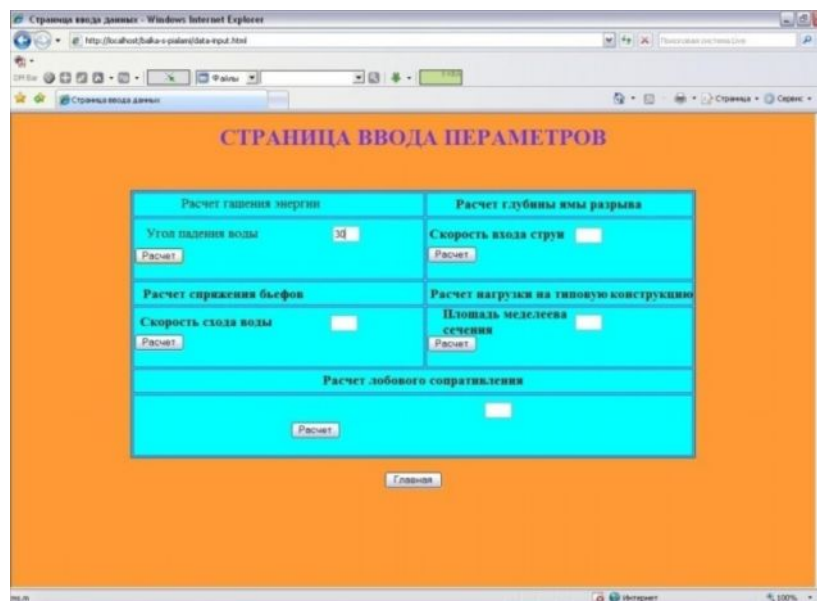


Рис. 4.7. Страница ввода параметров.



## **ВЫВОДЫ по главе IV.**

1. Анализ характеристик Интернет - технологий показывает, что сочетание Apache/PHP/MySQL представляет собой наиболее удобное решение для создания информационной системы расчета многослойных конструкций.

2. Информационная система дает возможность использования MATLAB на рабочих станциях, не позволяющих, в силу ограниченных возможностей, установку этого программного пакета.

3. Создание системы накопления и быстрого поиска данных, полученных при запросе от пользователя, при использовании сервера MySQL.

4. Переносимость программного продукта на различные операционные системы.

5. Созданная база данных предназначена для использования научными работниками, инженерами – проектировщиками, которые разрабатывают гидротехнические сооружения, используемые в строительстве плотин, а также студентами строительных факультетов, работающими над курсовыми и дипломными проектами. Использование базы данных позволяет оперативно изменять или добавлять новые элементы меню и содержимого таблиц выбора расчетов, что облегчает процесс администрирования информационной системы. С целью расширения области научных знаний информационной системы, связанных с использованием новых численных методов расчета, на Web – сайте возможно размещение дополнительных страниц опроса пользователей в виде форума или гостевой книги.

6. Информационная система предназначена для использования в научно – инженерных исследованиях конструкций плотин и дамб.

7. Требования к программному обеспечению для работы с ресурсом: стандартные средства связи с Интернет.



## ВЫВОДЫ

Создана методика оценки геомеханического состояния массивов пород нагорного карьера и склонов гор, разработана информационная система на языке серверных приложений «РНР» применительно интернет- технологий.

1. Установлены закономерности распределения напряжений в бортах карьера в зависимости от ширины основания и крутизны бортов в условиях действия гравитационных, тектонических, а также квазистатических сейсмических сил.

2. Выявлены преимущества привлечения методов аналитического программирования для получения расчетных формул с учетом характеристик пород оснований плотин.

3. Построены модели различных блоков гидротехнических сооружений и проведены расчеты с применением метода конечных элементов, а также при изменении температурных характеристик этих блоков.

4. Выполнен расчет напряженного состояния массива пород нагорного карьера «Кумтор» с использованием МКЭ.

5. Предложена методика оценки устойчивости бортов карьера и склонов гор по критериальным признакам: места и очаги возможных разрушений определяются по величине концентрации напряжений; процессы уплотнения и разрыхления пород прогнозируются по величине энергии деформации объема; возможные сдвиговые виды деформаций оцениваются по величине энергии деформации изменения формы, зоны разрушения определяются по величине коэффициента запаса устойчивости пород.



## ГЛАВА 5. РАСЧЕТ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕМОГО ПРОЕКТА

Экономическая эффективность от внедрения средств автоматизации заключается в улучшении экономических показателей работы проектных институтов, в первую очередь за счет повышения оперативности проектирования и снижения трудозатрат на реализацию процесса разработки проекта, то есть сокращения расходов на управление. Для большинства проектных институтов экономический эффект выступает в виде экономии трудовых и финансовых ресурсов, получаемой от:

- снижения трудоемкости расчетов;
- снижения трудозатрат на поиск и подготовку документов;
- экономии на расходных материалах (бумага, дискеты, картриджи);
- сокращения служащих предприятия.

Экономический эффект от внедрения средств автоматизации может быть лишь косвенным, так как внедренные мной средства автоматизации не являются прямым источником дохода, а являются либо вспомогательным средством организации получения денежных средств, либо помогают минимизировать затраты на время проектирования.

Снижение же трудозатрат в организации возможно за счет автоматизации работы с документами, снижения затрат на поиск информации.

Критерием эффективности создания и внедрения новых средств автоматизации является ожидаемый экономический эффект. Он определяется по формуле:

$$\mathcal{E} = P_{\text{общ}} - E_n K_{\text{п}} \quad (5.1)$$

где  $E_n$  - нормативный коэффициент ( $E_n=0,15$ );

$K_{\text{п}}$  - капитальные затраты на проектирование и внедрение

В качестве годовой экономии от внедрения будет время, сэкономленное сотрудниками и переведенное в сомовый показатель.



## 5.1. Состав эксплуатационных расходов

В эксплуатационные расходы входят:

- содержание информационных расходов;
- содержание персонала по обслуживанию комплекса технических средств;
- расходы на функционирование программы;
- расходы на содержание здания;
- прочие расходы.

## 5.2. Расходы на содержание персонала

Расходы по различным видам работающих определяются по формуле:

$$Z = n_i z_i \left(1 + \frac{A_c}{100}\right) \left(1 + \frac{A_p}{100}\right) \quad (5.2)$$

где  $n_i$  - численность персонала, выполнение работ которого будет автоматизировано;

$z_i$  - средняя заработная плата персонала;

$A_c$  - процент отчислений на социальное страхование;

$A_p$  - средний процент премий за год.

## 5.3. Расходы на функционирование программы

Расходы на функционирование программы складываются из затрат на машинное время и затрат на эксплуатацию различных принадлежностей (бумаги, краски для принтера и т.д.).

Из формулы (5.3) произведем расчет расходов на функционирование программы:

$$M = t_d C_d + t_p C_p \quad (5.3)$$

где  $C_p$  и  $C_d$  - соответственно стоимости одного часа процессорного и дисплейного времени;



$t_d$  и  $t_n$  - соответственно процессорное и дисплейное время, необходимое для проектирования (час).

Расходы на эксплуатационные принадлежности определяются простым подсчетом затрат на их приобретение по оптовым (или свободным) ценам.

Так как программа разработана на современных быстродействующих компьютерах, то в дополнительном процессорном времени необходимости нет, т.е. принимаются как  $C_n=0$  так и  $t_n=0$ .

При этом можно оценить аналогичные расходы до внедрения программы и сравнить полученные значения. При внедрении программы уменьшается время работы с одной и той же задачей, за счет этого уже появляется экономия.

#### 5.4. Расчеты на накладные расходы

Расходы на эксплуатационные принадлежности определяются простым подсчетом затрат на их приобретение по оптовым (или свободным) ценам.

#### 5.5. Прочие расходы

Прочие расходы составляют от 1 до 3% от суммы всех эксплуатационных расходов.

- до внедрения программы

$$P_{пр1} = 0,03(Z + M_1 + H) \quad (5.4)$$

- после внедрения программы

$$P_{пр2} = 0,03(Z + M_2 + H) \quad (5.5)$$

Таким образом, эксплуатационные расходы составляют:

- до внедрения программы

$$P_1 = Z + M_1 + H + P_{пр1} \quad (5.6)$$

- после внедрения программы

$$P_2 = Z + M_2 + H + P_{пр2} \quad (5.7)$$



## 5.6. Расчет экономии за счет увеличения производительности труда инженера-проектировщика

Если пользователь при экономии  $i$  – вида с применением программы экономит  $\Delta T_i$ , часов, то повышение производительности труда  $P_i$  (в %) определяется по формуле:

$$P_i = \left( \frac{\Delta T_i}{F_j - \Delta T_i} \right) \quad (5.8)$$

где  $F_j$  - время, которое планировалось пользователем для выполнения работы  $j$ -вида до внедрения программы (час.).

**Таблица 1: Таблица работ пользователей**

№ п/п	Вид работ	Среднее время на операцию в месяц на одного сотрудника, минут		Экономия времени в месяц, минут $\Delta T$
		До автоматизации $F_j$	После автоматизации	
1.	Выбор расчетной модели и ввод информации	240	120	120
2.	Проведение расчетов	150	60	90
3.	Подготовка и печать отчетов	400	240	120
4.	Анализ и выборка данных	1 500	750	750
5.	Заполнение сложных документов по основной деятельности	1 500	750	750
6.	Работа с электронными документами по основной деятельности	4 000	2 400	1 600
7.	<b>Итого</b>	<b>7 790</b>	<b>4 320</b>	<b>3 470</b>

Экономия, связанную с повышением производительности труда инженера-проектировщика  $P$ , определим по формуле:

$$\Delta P = Z_{пх} \sum_i \frac{P_i}{100} \quad (5.9)$$

где  $Z_{пх}$  - среднегодовая заработная плата инженера-проектировщика.

При расчете сделаны следующие допущения:

1. На 6 типов операций из таблицы (табл. 1) каждый пользователь тратит 80% рабочего времени.



2. Фонд рабочего времени в месяц составляет 9 600 минут.
3. Доля каждой операции в месяц одинакова
4. Все отделы проводят одинаковое время при работе с операциями.
5. Срок полезного использования программы – 7 лет (далее в программе должен быть сделан апгрейд), норма амортизации – 15% в год.

### 5.7. Расчет экономического эффекта

Данные, принимаемые для расчета:

1. Средняя заработная плата сотрудника: 12 000 сом.
2. Стоимость разработки информационной системы составляет 60800 сом.
3. Стоимость услуг сторонней организации по ее внедрению составляют 16 000 сом.

В итоге капитальные затраты на внедрение составят:

$$K = 60800 + 16\ 000 = \mathbf{76\ 800\text{сом.}}$$

Расходы на содержание персонала, исходя из условия, что оклад сотрудника составляет **12000 сом**:

$$Z_{\text{мес}} = 1 * 12000 * (1 + 25 / 100) = \mathbf{15\ 000\text{сом.}}$$

Расчет экономии за счет увеличения производительности труда сотрудника. До внедрения информационной системы предполагается, что проектирование блоков гидросооружений велось на компьютере, но вручную, с использованием различных специализированных программ, позволяющих хранить данные в отдельных файлах. В качестве исходных данных будем использовать данные, приведенные в Таблице 1.

Экономия, связанная с повышением производительности труда пользователя:

$$P = 15\ 000 * 9 = \mathbf{135\ 000\text{сом.}}$$

В итоге получаем следующую ожидаемую экономическую эффективность:





$$\mathcal{E} = 135\,000 - 76\,800 * 0,15 = 123\,480 \text{ сом.}$$

### **ВЫВОДЫ по главе V.**

За счет увеличения производительности труда сотрудника экономическая эффективность от внедрения программного средства получилась **123 480 сом.** Соответственно, потратив 76 800 сомов, мы получаем экономию за год в **123 480 сом.**

По результатам расчета экономической эффективности проектирования и внедрения средства автоматизации можно оценить выгоду внедрения информационной системы. Хотя выгода и косвенная, но, как правило, заметная в средне и долгосрочной перспективе. Внедрение средств автоматизации в процесс исследования и проектирования может привести к уменьшению времени разработки и проектирования блоков гидротехнических сооружений за счет использования информационной системы, так как задачи выполняются быстрее. Следовательно, чем больше средств и времени потрачено на автоматизацию, тем выше экономический эффект от внедрения.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано новое решение актуальной научной задачи -разработка метода управления напряженно – деформированного состояния склонов гор в зонах влияния инженерных сооружений:

1. Разработан аналитический метод расчета напряженно – деформированного состояния массивов пород склонов гор и нагорных карьеров. Метод отличается от существующих новым способом отображения полуплоскости с выступом и вырезом и построенного решения граничной задачи теории упругости для отображенной области,когда она испытывает действие гравитационных,тектонических и квазистатических сейсмических сил.

2. Разработана методика прогноза напряженного состояния массивов пород впадины, карьера и горы, позволяющая проводить исследования и прилегающей горы.

3. Аналитически описано влияние водохранилища на перераспределение напряжений в основании горных склонов и впадин. Оно характеризуется увеличением сжимающих напряжений в горизонтальных сечениях массива и возникновением растягивающих напряжений в вертикальных сечениях.

4. Обоснована и применена геологическая модель Кельвина для прогноза смещений и деформаций массивов пород в зоне влияния карьера и прилегающей горы в процессе затухающей ползучести пород.

5. Установлены закономерности перераспределения напряжений в основании и бортах карьера от действия гравитационных, тектонических и квазистатических сейсмических сил. Установлено, что:

– концентрация напряжений при действии тектонических сил возрастает по сравнению с действием силы гравитации от 2 до 8 раз;вертикальные компоненты напряжений - до 2 раз,горизонтальные - до 8 раз,а касательные компоненты - до 12 раз;



– действие в горизонтальном направлении сейсмической инерционной силы характеризуется увеличением (в 1,7 раза) концентрации напряжений в зоне примыкания одного из бортов карьера с его основанием и уменьшением концентрации напряжений (до 70%) в противоположной стороне;

– концентрация напряжений в основании карьера наибольшая, если ширина его основания меньше в четыре и более раз, чем его глубина;

– в результате слияния зон опорного давления обоих бортов карьера этот эффект исчезает, если ширина основания больше, чем половина его глубины;

6. Дана оценка напряженного состояния массивов пород Камбаритинской ГЭС;

7. Предположена методика оценки устойчивости бортов карьера и склонов гор по критериальным признакам: места и очаги возможных разрушений определяются по величине концентрации напряжений; процессы уплотнения и разрыхления пород прогнозируются по величине энергии деформации объема;

8. Возможные сдвиговые виды деформаций оцениваются по величине энергии деформации изменения формы;

9. Зоны разрушения определяются по величине коэффициента запаса прочности пород.



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Абдылдаев Э.К.** Напряженно-деформированное состояние массива горных пород вблизи выработок.[Текст] / Э.К. Абдылдаев.-Фрунзе:Илим,1990.-164с.
2. **Айтматов И.Т.** Геомеханика рудных месторождений Средней Азии.[Текст] / И.Т. Айтматов.-Фрунзе:Илим,1987.-246 с.
3. **Айтматов И.Т.**Прогноз проявлений горного давления при разработке месторождений комбинированным способом[Текст] / И.Т.Айтматов, Б. Жумабаев, Г. С. Исаева.//Проблемы горного давления на больших глубинах при ведении подземных и открытых работ.-Кривой Рог: НИГРИ,1990.-42 с.
4. **Айтматов И.Т.**Методика расчета на сейсмичность устойчивости массивов пород бортов карьера и склонов прилегающих гор[Текст] /И. Т. Айтматов, Б. Жумабаев, Г. С. Исаева.//Матер.международной конференции «Проблемы механики и технологии».-Бишкек:БПИ,1994.-С.171.
5. **Айтматов И.Т.** Оценка напряженно-деформационного состояния массивов пород (НДСМ) нагорных карьеров[Текст] /И.Т.Айтматов,Б.Жумабаев,И.К.Чунуев и др.//Вопросы геомеханики и разработки месторождений полезных ископаемых.-Бишкек:Илим,1997.-С.4-8.
6. **Айтматов И.Т.** Исследование распределения напряжений в горных склонах методом фотоупругости[Текст] /И.Т.Айтматов,Н.К. Карагулов.//Напряженно-деформированное состояние горных пород при добыче полезных ископаемых и гидротехническом строительстве.-Фрунзе,1973-С.34-55.
7. **Айтматов И.Т.** Напряженное состояние и прочность элементов систем разработок крутопадающих месторождений Средней Азии[Текст] / И.Т.Айтматов,К.Ч. Кожогулов.-Фрунзе:Илим,1988–124с.
8. **Аманалиев В. А.**Опыт прогнозирования возникновения оползневых явлений[Текст] / В.А.Аманалиев,Б.Ж.Жумабаев,Г.С.Исаева и



др.//Инф.лист. №67(7174).Сер.52.01.07.-Бишкек:Нац.информ.центр КР,1995–  
4с.

9. **Ануфриев И. Е.**МАТЛАВ 7[Текст] / И.Е.Ануфриев, А.Б.Смирнов, Е.Н. Смирнова.СПб: БХВ – Петербург, 2005. – 1104 с.

10. **Ахпателов Д.М.**Исследование напряженного состояния массивов горных пород в поле гравитации[Текст]:автореф.дис. ... канд.техн. наук: - М.,1972.-23 с.

11. **Ахпателов Д.М.**О напряженном состоянии полубесконечных областей[Текст] / Д.М.Ахпателов,З.Г. Тер-Мартirosян //Изв. АН Армянской ССР.Стр.Механика.-1971. Т.24.-№3.-С.33-40.

12. **Балянов А.П.**Затворы водозаборных сооружений на горных реках Кыргызстана и способы защиты от обледенения[Текст] / А.П.Балянов, О.А.Клепачева, В.А. Трофименцева // -Бишкек, Вестник КРСУ, 2008г., том 8 №9, -С.78-87.

13. **БардзеллДжефери.** Macromedia Dreamweaver MX 2004 с ASP, ColdFusion иPHP. Из первых рук.[Текст] / БардзеллДжефери// пер. с англ. – М.: «ЭКОМ», 2006. – 560 с.

14. **Батугин С.А.**Напряженно-деформированное состояние нетронутого массива горных пород и его влияние на ведение горных работ[Текст]: автореф.дис. ... докт.техн. наук:/С.А. Батугин.-Новосибирск,1974.– 41с.

15. **Бекенов М.Э.** Исследование и развитие компьютерных технологий и телекоммуникационных средств для специальных информационных систем[Текст] / М.Э.Бекенов Информационные системы в АПК Кыргызской Республике. Отчет о НИР/КАА №7, 1997. – 214 с.

16. **Влох Н.П.**Управление горным давлением на железных рудниках[Текст] / Н.П.Влох,А.Д. Сашурин -М.:Недра,1974.-194с.

17. **Газиев Э.Г.**Устойчивость скальных массивов и методы их закрепления[Текст] / Э.Г.Газиев.-М.:Стройиздат.-160с.



18. **Галустьян Э.Л.** Управление геомеханическими процессами в карьерах[Текст] /Э.Л.Галустьян -М.:Недра.-1980.-237с.

19. Головин А.Я. Равновесие тяжелой упругой полуплоскости с непрямолинейной границей[Текст] / А.Я. Головин //Науч.-технич. инф.бюлл.-Л.-1957.-№8.-С.57-69.

20. **Голушкевич С.С.** Плоская задача теории предельного равновесия сыпучей среды[Текст] /С.С.Голушкевич -М.:Гостехиздат.-1948.-148с.

21. **Гольдин А.Л.**Использование метода конечных элементов для расчета напряженно-деформированного состояния треугольного каньона[Текст] / А.Л.Гольдин,А.П.Троицкий //Изв.ВНИИГ.-1971.-Т.95.-С.98-121.

22. **Голдштейн Р.В.**Опыт применения аналитического метода оценки напряженного состояния массива горных пород в бортах и основании глубоких речных долин[Текст] / Р.В.Голдштейн,Э.В. Калинин.//Вестник МГУ,Сер.Геология.-1969.-№5.-С.54-65.

23. **Джефферс Г.** Земля, ее происхождение, история и строение[Текст] / Г. Джефферс– М.: ИЛ, 1960. – 486 с.

24. **Демин А.М.** Закономерности проявлений деформаций откосов в карьерах[Текст] / А.М. Демин. – М.: Недра, 1981. – 144 с.

25. **Демин А.М.** Устойчивость бортов глубоких карьеров, уступов и отвалов[Текст] / А.М. Демин // Итоги науки и техники ВИНТИ. Сер. Разработка месторождений твердых полезных ископаемых. – 1990. – С.56-91.

26. **Динник А.Н.** О давлении горных пород и расчет крепи круглой шахты[Текст] /А.Н. Динник // Инженерный работник. – 1925. - №7. – С.1-12.

27. **Егоров П.В.** Исследование природы, прогноз и предотвращение горных ударов при разработке мощных крутых пластов в Кузбассе. [Текст]: автореф. дис.... докт. техн. наук./П.В. Егоров.– Новосибирск, 1974. – 34 с.

28. **Ержанов Ж.С.** Об оценке напряженного состояния нетронутого горного массива[Текст] / Ж.С. Ержанов //Математические методы в горном деле. – Новосибирск, 1963. – Ч.П. – С. 15-23.



29. **Ержанов Ж.С.** Теория ползучести горных пород и ее приложения[Текст] / Ж.С. Ержанов. – Алма-Ата: Наука, 1964. – 175 с.

30. **Жумабаев Б.** Распределение напряжений в массивах пород с гористым рельефом[Текст] / Б. Жумабаев. – Фрунзе: Илим, 1988. 190 с.

31. **Жумабаев Б.** Аналитическая модель оценки напряженно-деформированного состояния массивов пород с горным рельефом и инженерными сооружениями[Текст]: автореф. дис....докт. техн. наук./Б.Жумабаев–Бишкек, 1993.–35с.

32. **Жумабаев Б.** Напряженное состояние массивов речных каньонов и межгорных впадин в условиях влияния плотин и водохранилищ[Текст] / Б.Жумабаев, Г.С. Исаева.//Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья. – Фрунзе: ФПИ, 1990. – Ч.1. — 39с.

33. **Жумабаев Б.** О напряженном состоянии нетронутого массива пород в условиях гористого рельефа и тектонического сжатия[Текст] / Б.Жумабаев, Г.С. Исаева //Напряженное состояние массивов горных пород и управление горным давлением. – Фрунзе: Илим, 1990. – С. 464 – 470.

34. **Жумабаев Б.** Расчет устойчивости склонов гор и бортов карьера в условиях действия гравитационных и тектонических сил[Текст] / Б.Жумабаев, Г.С. Исаева // Проблемы разработки полезных ископаемых в условиях высокогорья. – Бишкек: БПИ, 1991. – Ч.1. – С.40-41.

35. **Жумабаев Б.** К вопросу устойчивости бортов карьера и склонов гор в условиях тектонического сжатия[Текст] /Б.Жумабаев, Г.С. Исаева – Бишкек: Илим, 1992. – С.47-62.

36. **Жумабаев Б.Ж.** Способ оценки напряженного состояния массивов пород бортов карьеров, расположенных в горной местности[Текст] /Б.Жумабаев, Г.С. Исаева// Инф. Лист. №56 (7163). – Сер. 52.13.25. – Бишкек: Нац. Информ. Центр КР, 1995. – 4 с.



37. **Закамалдин А.И.** Некоторые новые способы конформных отображений и решение прикладных задач[Текст]: автореф. дис.... канд. физ. – мат. наук. /Закамалдин А.И. – Алма – Ата, 1979. – 17 с.

38. **Замарин В.А.** Проектирование гидротехнических сооружений[Текст] /В.А. Замарин М.: изд-во «Сельхозгиз», 1961г, 228с.

39. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике[Текст] /О. Зенкевич– М.: Мир, 1975. – 541 с.

40. **Исаева Г.С.** О распределении напряжений в некоторых полубесконечных областях, испытывающих различные силовые воздействия[Текст] / Г.С. Исаева //Напряженно-деформированное состояние массива пород в горных районах. – Фрунзе: Илим, 1985. – С.37-44.

41. **Исаева Г.С.** Расчет напряжений в массивах двух сближенных гор [Текст] /Г.С. Исаева/ Матер. 8-ой меж. респ. науч. конф. молодых ученых. – Фрунзе: Илим, 1986. – С.153-154.

42. **Исаева Г.С.** Изменение напряженного состояния массива протяженной горы (каньона) при заполнении водохранилища[Текст] / Г.С. Исаева //Разработка и обогащение рудных и нерудных месторождений при их комплексном освоении/Материалы I Всесоюзной школы – семинара молодых ученых по проблемам разработки и обогащения твердых полезных ископаемых. – М., 1988. – С.76-79.

43. **Исаева Г.С.** Об изменении начального напряженного состояния массивов пород речных каньонов при возведении в них плотин[Текст] /Г.С.Исаева, Б. Жумабаев //Напряженное состояние и разрушение горных пород. – Бишкек: Илим, 1991. – С.90-97.

44. **Казакбаева Г.О.** Опыт применения методов оптического и математического моделирования для оценки влияния тектонической трещины на характер разрушения массивов пород склонов гор[Текст] / Г.О.Казакбаева, А.А. Аманалиев, Б.Ж.Жумабаев и др.// Инф. Лист. №68 (7175). Сер. 52.01.77. – Бишкек.: Нац. Информ. Центр КР, 1995. – 4 с.





45. **Казикаев Д.М.** Геомеханические процессы при совместной и повторной разработке руд[Текст] / Д.М. Казикаев– М.: Недра, 1981. – 288 с.
46. **Калинин Э.В.** Распределение напряжений в породах основания и склонов глубоких речных долин[Текст]: автореф. дис... канд. техн./Э.В. Калинин Наук. – М, 1969. – 14 с.
47. Каталог механических свойств и деформируемости горных пород/ Под ред. А.Н. Ставрогина. – М.: Наука, 1972. – 31 с.
48. **Кириенко И.И.** Гидротехнические сооружения. Проектирование и расчет[Текст] / И.И.Кириенко, Ю.А. Химерик. Киев, изд-во: Вища школа, 1987г. – 253с.
49. **Куксин В.С.** Напряженное состояние упругого массива расслабленного вырезами[Текст] / В.С. Куксин // Вопросы горного давления. – Новосибирск: Изд. – во СО АН СССР, 1964. – Вып. 21, - С. 23-29.
50. **Куксин В.С.** Решение первой задачи теории упругости для плоскости с вырезом, ее приложения к вопросам горного давления[Текст] /В.С. Куксин//ФТПРПИ, - 1970. - №5 – С. 14-19.
51. **Курдин Н.С.** К построению конформных отображений[Текст] /Н.С. Курдин //Вопросы механики горных пород. – М.: Недра, 1971. – С. 35-59.
52. **Курдин Н.С.** Распределение напряжений в элементах конструкций с криволинейными границами[Текст]: автореф. дис....докт. техн. наук 01.02.04./Н.С. Курдин. –М., 1972. – 16 с.
53. **Курдин Н.С.** О напряжениях в некоторых весомах полубесконечных областях с криволинейными границами[Текст] / Н.С. Курдин.// Механика деформируемых сред. – Саратов: Изд. Саратовского ун-та. 1978. – Вып. 5. – С. 50-58.
54. **Курленя М.В.** Техника экспериментального определения напряжений в осадочных породах[Текст] / М.В. Курленя и др. – Новосибирск: Наука, 1975. – 147 с.



55. **Курленя М.В.** Теоретические основы определения напряжений в горных породах[Текст] / М.В.Курленя, С.Н. Попов. – Новосибирск: Наука, 1983. – 97 с.
56. **Лаврентьев М.А.** Методы теории функций комплексного переменного[Текст] / М.А.Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 736 с.
57. **Мамабетов Ш.А.** Прогнозирование и контроль напряженно-деформированного состояния массива пород в высокогорных районах[Текст] / Ш.А. Мамабетов. – Фрунзе: Илим, 1988. – 188 с .
58. **Манвелян Р.Г.** Напряженное состояние грунтов с криволинейной границей при действии поверхностных и объемных сил[Текст]: автореф. дисс.... канд.техн.наук. / Р.Г. Манвелян.-М.: 1976.- 18 с.
59. **Мансуров В.А.** Прогнозирование разрушения горных пород[Текст] / В.А. Мансуров. – Фрунзе: Илим, 1990. – 240 с.
60. **Марков Г.А.** Тектонические напряжения и горное давления в рудниках Хибинского массива [Текст] / Г.А. Марков.– Л.: Наука, 1977. – 213 с.
61. **Марков Г.А.** Напряженное состояние пород и горное давление в структурах гористого рельефа[Текст] / Г.А. Марков. – Л.: Наука, 1984. – 140 с .
62. **Маслов Н.Н.** Механика грунтов в практике строительства[Текст] / Н.Н. Маслов – М.: Стройиздат, 1977. – 320 с.
63. **Мусхелишвили Н.И.** Некоторые основные задачи математической теории упругости[Текст] / Н.И. Мусхелишвили – М.: Наука, 1966. – 707 с.
64. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел[Текст] / А. Надаи – М.: Мир, 1969. – Т.2. – 854 с.
65. Напряженное состояние земной коры (по измерениям в массивах горных пород). – М.: Наука, 1973. – 186 с.



66. **Немировский Ю.В.** Овлиянии периодического рельефа земной поверхности на распределение напряжений в массиве горных пород[Текст] /Ю.В.Немировский, А.А. Тырымов //Изв. АН СССР. Физика земли. – 1979. – N 8. – С. 29-36.

67. **Немировский Ю.В.** Напряженное состояние в нетронутых массивах горных пород[Текст] / Ю.В.Немировский, А.А. Тырымов //Аналитические и численные исследования в механике горных пород. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1986. – С.223-231.

68. **Никитин С.Н.** Распределение напряжений в бортах карьеров[Текст] / С.Н. Никитин /Науч. Докл. Высш. Школы. Горное дело. – М.: Высшая школа, 1959.- N 2. С. 75-79.

69. **Никитин С.Н.** Построение ожидаемой поверхности скольжения по напряжениям в бортах карьеров[Текст] /С.Н. Никитин//Уголь.- 1962. –N 1. – С. 36-38.

70. **Никитин С.Н.** Напряженное состояние в прибортовом массиве карьеров при различной крутизне откоса[Текст] / С.Н. Никитин, В.А.Смольникова, Н.Б. Темникова //Изв.Вузов. Горный журнал. – 1970.- N1. - С. 41-43.

71. **Норри Д.** Введение в метод конечных элементов: Пер. с англ.[Текст] /Д.Норри, Ж. де Фриз- Москва: Мир, 1981.- 304с.

72. Исследование закономерностей формирования напряженно-деформированного состояния массивов горных склонов под влиянием природных и техногенных факторов при гидротехническом и дорожном строительстве в горных условиях: Отчет о НИР/Фонды Ин-та физики и мех. Горных пород (ИФиМГП) АН Кигр.ССР.[Текст] / – N ГР 0186.01221970, 1986-1988 гг., план АН СССР по проблеме 3.1.13). – Рег. N 86-16.-Фрунзе, 1986.- С.8-58.; Рег. N87-10.-Фрунзе, 1987. – С.6-49. (Соавторы: Степанов В.Я., Жумабаев Б.).



73. Определение напряженного состояния массивов горных пород на участках строительства туннелей к ТЭО строительства комплекса сооружений на реке Сары-Джаз (выполнено по заказу института Средаз Гидропроектим. С.Я.Жука): Отчет о НИР/Фонды ин-та физ. и мех. горных пород (ИФиМГП) АН Кирг. ССР. Фрунзе, 1987. – С. 14-25. (Соавторы: Степанов В.Я., Жумабаев Б.).

74. Исследование напряженного состояния массива горных пород и его изменение во времени на участках строительства Камбаратинской ГЭС (выполнено по заказу Института СредазГидропроекта им. С.Я. Жука): Отчет о НИР по теме: 01.03.01. Н2.1/Фонды Ин-та физ. и мех. горных пород (ИФиМГП) АН Кирг. ССР. – Фрунзе, 1988. – С. 40-64 (Соавторы Степанов В.Я., Жумабаев Б.)

75. Совершенствование методов контроля, управление горным давлением и создание унифицированных методов расчета конструктивных параметров систем разработок рудных месторождений на больших глубинах в горноскладчатых областях. Раздел 1. Определение напряженного состояния конструктивных элементов систем разработок и развитие численных методов расчета прочности целиков и потолочин, камер пологопадающих рудных месторождений Средней Азии: Отчет о НИР/Фонды Ин-та физ. и мех. горных пород (ИФиМГП) АН Кирг. ССР. – Фрунзе, 1989. – С. 37-45, 1990. – С.65-70.

76. Исследование геомеханического состояния породных массивов при разработке рудных месторождений в горноскладчатых областях. Раздел 3. Создание численно-аналитических методов расчета напряженного состояния массивов пород в горноскладчатых областях: Отчет о НИР/Фонды Ин-та физ. и мех. горных пород (ИФиМГП) АН Кирг. ССР. – Фрунзе, 1991. – С. 26-56.

77. Исследование геомеханических процессов породных массивов при освоении рудных месторождений в горноскладчатых областях. Раздел: Создание численно-аналитических методов расчета НСМ пород в горных рай-



онах и прогноз проявлений горного давления: Отчет о НИР/Фонды Ин-та физ. и мех. горных пород (ИФимГП) АН Кирг. Респ. – № ГР 0000356. - Бишкек, 1994. – С. 95-200.

78. Оценка, прогноз и профилактика природно-техногенных катастроф при освоении горных территорий республики. Раздел: Прогноз развития оползневых процессов методами математического моделирования: Отчет о НИР/Фонды Ин-та физ. и мех. горных пород (ИФимГП) АН Кыргызской Республики. – № ГР 0000356. - Бишкек, 1995. – С. 67-88; 1996. – С.56-72.

79. **Работнов Ю.Н.** Элементы наследственной механики твердых тел[Текст] / Ю.Н. Работнов – М.: Наука, 1977. – 384 с.

80. **Рассказов Л.Н.** Гидротехнические сооружения.[Текст] / Л.Н.Рассказов, В.Г. Орехов, Н.А.Анискин. Часть I, Москва. Издательство: АСВ, 2008г.-528 с.

81. **Ривкин И.Д.** Напряженное состояние массива в зоне влияния очистной выемки на шахтах Криворожского железно-рудного бассейна[Текст] / И.Д.Ривкин, Н.Я. Халайдовский //Проблемы механики горных пород. – Новосибирск: Наука, 1971. – С. 172-177.

82. **Савченко С.Н.** Исследование напряженного состояния упругих полубесконечных областей (применительно к механике горных пород): автореф. дис....канд. физ.-мат. наук./С.Н. Савченко – Новосибирск: 1976. – 16 с.

83. Современная тектоническая активность земли и сейсмичность. – М.: Наука, 1987. – 223 с.

84. СНиП-7-81. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования: Строительство в сейсмических районах. – М.: Стройиздат, 1982. – 49 с.

85. **Соколовский В.В.** Статика сыпучей среды[Текст] / В.В. Соколовский – М.: Физматгиз, 1960. – 224 с.

86. **Степанов В.Я.** Напряженно-деформированное состояние горных склонов и его изменение при крупномасштабном гидротехническом строи-



тельстве[Текст]: автореф. дисс....докт.техн.наук./В.Я. Степанов – Новосибирск, 1990 – 38 с.

87. **Степанов В.Я.** Механика горных склонов[Текст] / В.Я. Степанов – Бишкек: Илим, 1992. – 191 с.

88. **Степанов В.Я.** Исследование напряженного состояния массива горных пород неоднородного строения методом конечных элементов[Текст] / В.Я.Степанов, С.А. Балалаева //ФТПРПИ. – Новосибирск, 1975. - №3. – С.26-31.

89. **Тажибаев К.Т.** Условия динамического разрушения горных пород и причины горных ударов[Текст] /К.Т. Тажибаев – Фрунзе: Илим, 1989. – 180 с.

90. **Тер-Мартиросян З.Г.** Напряженное состояние горных массивов в поле гравитации[Текст] /З.Г.Тер-Мартиросян, Д.М.Ахпателов//ДАН СССР, 1976. – Т.220. - №2. – С.311-314.

91. **Тер-Мартиросян З.Г.** Напряженное состояние горных массивов в поле гравитации и сейсмических воздействий[Текст] /З.Г.Тер-Мартиросян, Д.М.Ахпателов, Р.Г. Манвелян //Обеспечение общей устойчивости откосов земляного полотна автомобильных дорог / Тр. Союздор НИИ. – 1974. – Вып.74.- С. 46-52.

92. **Терцаги К.** Теория механики грунтов[Текст] / К.Терцаги – М.: Госстройиздат, 1961.

93. **Тимошенко С.П.** Теория упругости[Текст] / С.П.Тимошенко, Дж.Гудьер – М.: Наука, 1979. – 560 с.

94. **Тырымов А.А.** О напряженном состоянии полубесконечной области с периодической границей в поле гравитационных и сейсмических сил[Текст] / А.А. Тырымов //Всесоюз. конф. по мех. сплошной среды: Тез. докл. – Ташкент: ФАН, 1979. – С. 59.



95. **Угодчиков А.Г.** Построение конформно-отображающих функции при помощи электро моделирования и интегральных полиномов Лагранжа[Текст] / А.Г. Угодчиков– Киев: Наукова Думка, 1966. – 77 с.
96. **Фадеев А.Б.** Метод конечных элементов в геомеханике[Текст] / А.Б. Фадеев. – М.:Недра, 1987. – 221 с.
97. **Федоров И.В.** Методы расчета устойчивости склонов и откосов[Текст] / И.В. Федоров– М.: Госстройиздат, 1962.
98. **Фильчаков П.Ф.** Приближенные методы конформных отображений[Текст] / П.Ф. Фильчаков. – Киев: Наукова Думка, 1964. – 531 с.
99. **Фисенко Г.Л.** Устойчивость бортов карьеров и отвалов[Текст] / Г.Л. Фисенко– М.: Недра, 1965. – 378 с.
100. **Хаст Н.**Измерение напряжений в скальных породах и их значение для строительства плотин[Текст] /Н.Хаст, Т. Нильсон //Проблемы инженерной геологии. – М., 1967. – Вып.4. – С. 13-21.
101. **Цветков В.К.** Расчет устойчивости откосов и склонов[Текст] / В.К. Цветков – Волгоград: Нижне-Волжское изд-во, 1978. – 238 с.
102. **Цветков В.К.** Разработка теоретических основ расчета устойчивости и напряженного состояния откосов и склонов[Текст]: Автореф. дисс....докт. техн. наук./В.К. Цветков– Новосибирск, 1983. – 39 с.
103. **Цытович Н.А.**Основы прикладной геомеханики в строительстве[Текст] /Н.А.Цытович, З.Г.Тер-Мартirosян. – М.: Высшая школа, 1981. – 317 с.
104. **Шалимов Г.Е.** Распределение напряжений и деформаций в грунтовых массивах при учете особенностей граничной поверхности[Текст]: Автореф. дис..... канд.техн. наук. / Г.Е. Шалимов. – М. 1977. – 20 с.
105. **Чугаев Р.Р.** Расчет устойчивости земляных откосов и бетонных плотин на нескальном основании по методу круглоцилиндрической поверхности обрушения[Текст] /Р.Р. Чугаев.М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.



106. **Ялымов Н.Г.** Определение размеров камер и целиков при разработке месторождений в горных районах [Текст] / Н.Г. Ялымов, О.В. Рогожников. – Фрунзе: Илим, 1980 – 166 с.

107. **Hast N.** The state of stresses in the upper part of the Earth's crust [Текст] / N. Hast – Tectonophysics 1969. – v.8. - №3. – P. 109 – 211.

108. **Heim A.** Untersuchungen über den Mechanismus der Gebirgsbildung [Текст] / A. Heim 1-2 Berlin, 1878.

109. **Kunert K.** Die parabelformig geklebte Scheibe mit einem konzentrierten Moment im Inneren der Scheibe. Jngf [Текст] / K. Kunert – Arch., 1964, - 33, № 5, – P. 301-307.

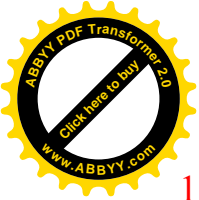
110. **Lindblom U.E.** General Report Developments in design methods for large rock caverns. Large rock caverns [Текст] / U.E. Lindblom Proceedings of the International Symposium. Helsinki. Pergamon Press. 1986. – v.3. – P. 1835 – 1867.

111. **Neuber H.** Parabelkerbe und Halbscheibe mit Inneren Kraft und Verzerrungs – Singularitäten [Текст] / H. Neuber Z. angew. Math. Und Mech, 1965, 45, N 6, – P. 383-387.

112. **Szelagowski F.** Disc of semi-plane form With semi-circular boundary cutout uni formly loaded [Текст] / F. Szelagowski Bull. Nolon. Sci. Ser. Sd. Techn., 1963, 11, N 6, – P. 283-286.

113. **Verruijt A.** Stress due to gravity in a notched elastic half-plane. Eng [Текст] / A. Verruijt – Arch. 1969, 38, N 2, – P. 107-108.





1.



## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

П 1.1 таблица сведений об элементах

№ узла	№ узла	№ узла	Е (МПа)	$\nu$	$\gamma$ Т/М <sup>2</sup>
6	31	21	1000	0.3	0
2	30	17	1000	0.3	0
3	34	19	1000	0.3	0
6	36	41	1000	0.3	0
13	30	32	1000	0.3	0
13	31	44	1000	0.3	0
14	36	39	1000	0.3	0
14	35	37	1000	0.3	0
12	29	27	1000	0.3	0
8	42	23	1000	0.3	0
10	28	25	1000	0.3	0
15	43	40	1000	0.3	0
7	29	32	1000	0.3	0
15	42	44	1000	0.3	0
11	28	39	1000	0.3	0
9	43	37	1000	0.3	0
13	34	31	1000	0.3	0
13	33	30	1000	0.3	0
14	38	35	1000	0.3	0
14	45	36	1000	0.3	0
2	22	30	1000	0.3	0
6	41	31	1000	0.3	0
6	26	36	1000	0.3	0
3	24	35	1000	0.3	0
7	16	29	1000	0.3	0
15	40	42	1000	0.3	0
11	20	28	1000	0.3	0
9	18	43	1000	0.3	0
12	34	29	1000	0.3	0
8	33	42	1000	0.3	0
10	38	28	1000	0.3	0
15	45	43	1000	0.3	0
12	21	34	1000	0.3	0
8	17	33	1000	0.3	0

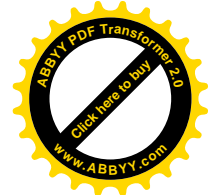


10	19	38	1000	0.3	0
15	41	45	1000	0.3	0
7	32	22	1000	0.3	0
15	44	41	1000	0.3	0
11	39	26	1000	0.3	0
9	37	24	1000	0.3	0
1	27	16	1000	0.3	0
5	23	40	1000	0.3	0
4	25	20	1000	0.3	0
5	40	18	1000	0.3	0
13	32	34	1000	0.3	0
13	44	33	1000	0.3	0
14	39	38	1000	0.3	0
14	37	45	1000	0.3	0
34	21	31	1000	0.3	0
33	17	30	1000	0.3	0
38	19	35	1000	0.3	0
45	41	36	1000	0.3	0
22	32	30	1000	0.3	0
41	44	31	1000	0.3	0
26	39	36	1000	0.3	0
24	37	35	1000	0.3	0
18	27	29	1000	0.3	0
40	23	42	1000	0.3	0
20	25	28	1000	0.3	0
18	40	43	1000	0.3	0
34	32	29	1000	0.3	0
33	44	42	1000	0.3	0
38	39	28	1000	0.3	0
45	37	43	1000	0.3	0

*$E$  – модуль упругости.*

*$\nu$  – коэффициент Пуассона.*

*$\gamma$  – плотность.*



П 1.2 таблица сведений об узлах

X	Y	F1	F2	P <sub>x</sub>	знач. P <sub>x</sub>	знач. P <sub>y</sub>	P <sub>y</sub>
1.113	4.892	0	0	1	0	0	1
4.320	4.892	0	0	1	0	0	1
3.320	0.495	0	0	1	0	0	1
1.113	0.495	0	-1053	1	1.02	3.02	1
4.320	2.694	-317.5	-1053	1	1.02	3.02	1
1.113	2.694	0	0	1	0	0	1
2.716	4.892	0	0	1	0	0	1
4.320	3.793	0	0	1	0	0	1
4.320	1.595	0	0	1	1.52	4.5	1
2.716	0.495	0	0	1	1.81	4.5	1
1.113	1.595	0	0	1	0	0	1
1.113	3.793	0	0	1	0	0	1
2.716	3.793	0	0	1	0	0	1
2.716	1.594	0	0	1	0	0	1
2.716	2.694	0	0	0	0	0	1
1.914	4.892	0	0	0	0	0	1
4.320	4.342	0	0	0	0	0	1
4.320	2.144	0	0	0	0	0	1
3.518	0.495	0	0	0	0	0	1
1.113	1.045	0	0	0	0	0	1
1.113	3.243	0	0	0	0	0	1
3.518	4.892	0	0	0	0	0	1
4.320	3.243	0	0	0	0	0	1
4.320	1.045	0	0	0	0	0	1
1.914	0.495	0	0	0	0	0	1
1.113	2.144	0	0	0	0	0	1
1.113	4.342	0	0	0	0	0	0
1.914	1.045	0	0	0	0	0	0
1.914	4.342	0	0	1	0	0	0
3.518	4.342	0	0	1	0	0	0
1.914	3.243	0	0	1	0	0	0
2.716	4.342	0	0	1	0	0	0
3.518	3.793	0	0	1	0	0	0
1.914	3.793	0	0	1	0	0	0
3.518	1.045	0	0	1	0	4.5	1
1.914	2.144	0	0	0	0	10.0	1



<b>3.518</b>	1.595	0	0	0	0	8.0	1
<b>2.716</b>	1.045	0	0	0	0	2.40	1
<b>1.914</b>	1.595	0	0	0	0	0	0
<b>3.518</b>	2.694	0	0	0	0	0	0
<b>1.914</b>	2.694	0	0	0	0	0	0
<b>3.518</b>	3.243	0	0	0	0	0	0
<b>3.518</b>	2.144	0	0	0	0	0	0
<b>2.716</b>	3.243	0	0	0	0	0	0
<b>2.716</b>	2.144	0	0	1	0.25	3.01	1

*X, Y – осевые компоненты узловых сил.*

*F1 и F2 – узловыe силы.*

*P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub> – признаки узловых перемещений.*

*Знач P<sub>x</sub> и P<sub>y</sub> – заданные осевые перемещения узлов.*