

ЕСТЕСТВЕННОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГОРНОГО МАССИВА ВБЛИЗИ СОЧЛЕНЕНИЯ КРИВИЧСКОГО И ЛИСТОПАДОВИЧСКОГО ТЕКТОНИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ

¹Журавков М.А., ¹Коновалов О.Л., ¹Круподеров А.В., ¹Хвесеня С.С., ²Богдан С.И.

¹Белорусский государственный университет, Минск
²ОАО «Белгорхимпром», Минск

В данной статье приведены результаты построения трехмерной геомеханической модели зоны сочленения Кривичского и Листопадовичского разломов на Старобинском месторождении калийных солей.

Основной целью исследований являлась оценка естественного напряженно-деформированного состояния массива горных пород на исследуемом участке.

При этом основными используемыми методами при проведении расчетов являлись методы механики сплошных сред, в частности, методы механики деформируемого твердого тела, а также метод конечных элементов для численного решения системы разрешающих уравнений.

Исходными данными для построения модели являлись геологические карты и информация по сейсмическим профилям, которая была соответствующим образом обработана для дальнейшего использования. В итоге были построены реальные поверхности разломов и горизонтов. Для более высокой скорости расчета исходные поверхности были аппроксимированы плоскостями.

Полученные поверхности были подвергнуты дальнейшей обработке для корректного построения конечноэлементной сетки. Были выполнены “обрезания” частей поверхностей, выходящих за границы модели, и в соответствующих местах пересечений, найдены точные точки и линии пересечения, был создан входной файл для построения сетки.

Затем была построена конечноэлементная модель, учитывающая различные виды контакта на разломах. Были проведены тестовые расчеты, выполнена их последующая обработка и анализ.

Исходными данными для построения трехмерной конечноэлементной геомеханической модели сопряжения Кривичского и Листопадовичского разломов является построенная в рамках выполнения [1] трехмерная геологическая модель Кривичского и Листопадовичского разломов, приведенная на рис. 1,2.

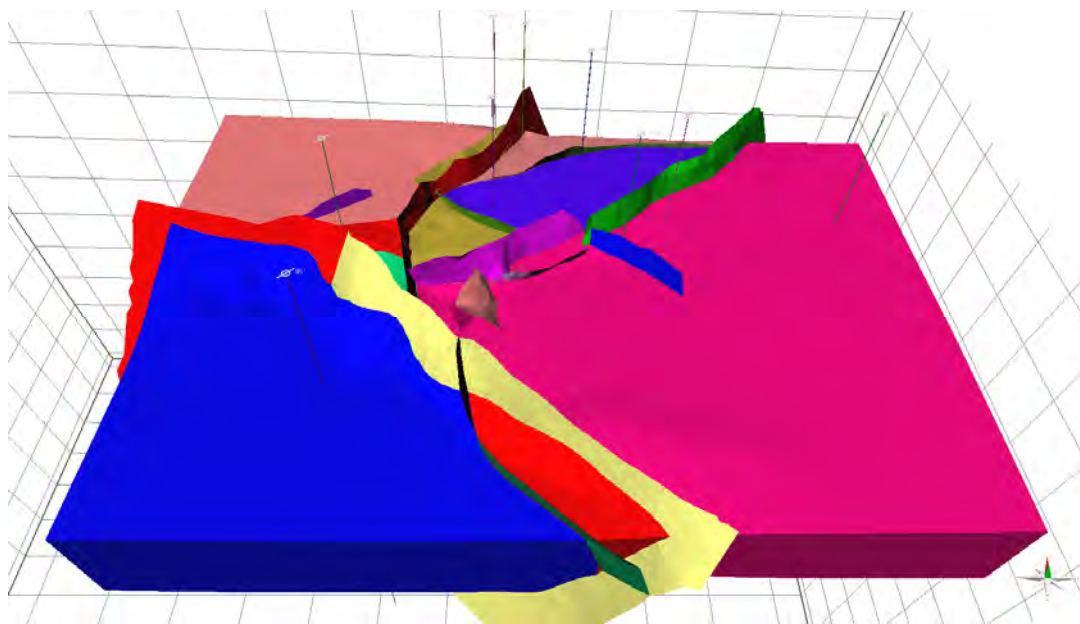


Рисунок 1 – Трехмерная геологическая модель структурных поверхностей и разломной тектоники

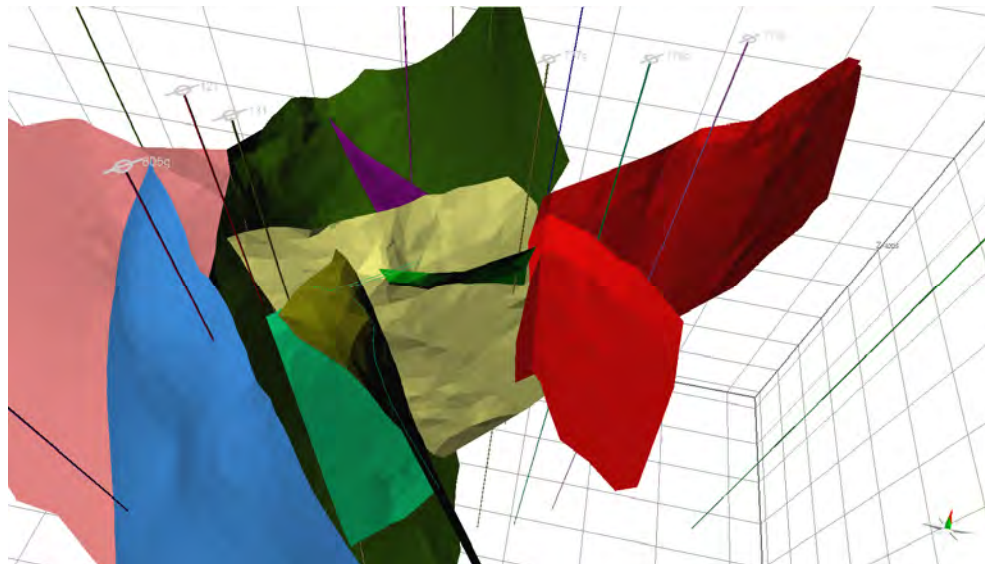


Рисунок 2 – Рассветовский, Листопадовичский, Южно-Косыничский и Кривичский разломы и их оперение

Для моделирования геомеханического поведения массива на исследуемом участке было решено взять для исследования 6 основных разломов: Листопадовичский, Рассветовский, Южно-Косыничский, Кривичский, Кривичский-1 и Кривичский-3.

Следует сказать, что при моделировании и выполнении вычислений для повышения скорости и точности расчетов лучше использовать плоские поверхности разломов. То же самое касается и горизонтов, между которыми располагается разлом. Поэтому была проведена аппроксимация на основании метода наименьших квадратов, т.е. аппроксимирующая плоскость $z = ax + by + c$ подбиралась таким образом, чтобы минимизировалось среднее квадратичное отклонение всех точек поверхностной сетки от данной плоскости, т.е. минимизировалась величина $\sum_i (ax_i + by_i + c - z_i)^2$.

Дальнейший алгоритм построения модели таков:

- отсечение «хвостов», т.е. отсечение тех частей поверхности разлома, которые выходят за горизонты, а также отсечение частей на пересечении разломов;
- создание исходного файла для генерации трехмерной сетки;
- раздваивание поверхностей разлома.

Отсечение «хвостов» происходит по линиям пересечения соответствующих поверхностей. На рисунке 3 показаны уже отсеченные поверхности всех разломов, а также горизонтов I, Шк, Па, V (согласно классификации сейсморазведочных работ).

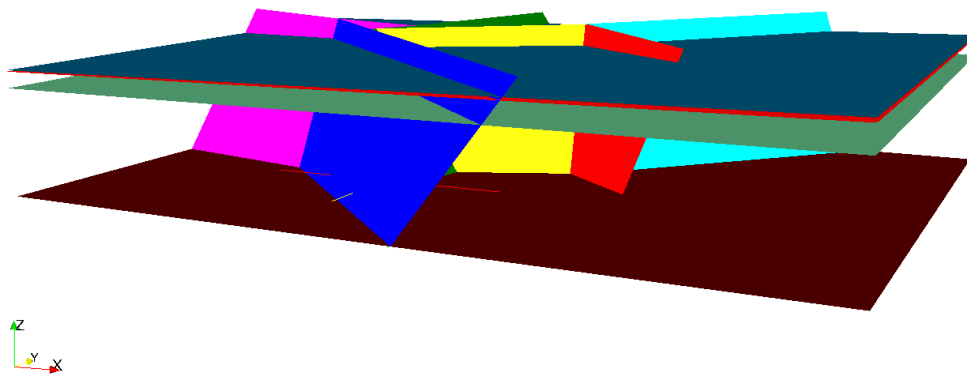


Рисунок 3 – Поверхности разломов и горизонтов пригодные для использования в модели

После выполнения аппроксимации поверхностей разломов и горизонтов строится трехмерная конечноэлементная сетка в пакете **tetgen.exe** [2]. Для правильного ее построения требуется корректное создание poly-файла - файла, содержащего в себе информацию о входных точках и входных по-

верхностях, представляющих собой многоугольники в трехмерном пространстве. При этом не должно быть пересечений этих поверхностей за исключением общих ребер. Для этого требуется аккуратное нахождение всех линий и точек пересечения поверхностей между собой. А затем определение многоугольников, которыми будут являться поверхности горизонтов между разломами, а также поверхности разломов между соответствующими горизонтами. На рисунке 4 изображена визуализация poly-файла для исходной модели.

После того, как poly-файл был корректно создан, можно переходить к построению конечноэлементной сетки в виде четырехугольных пирамид.

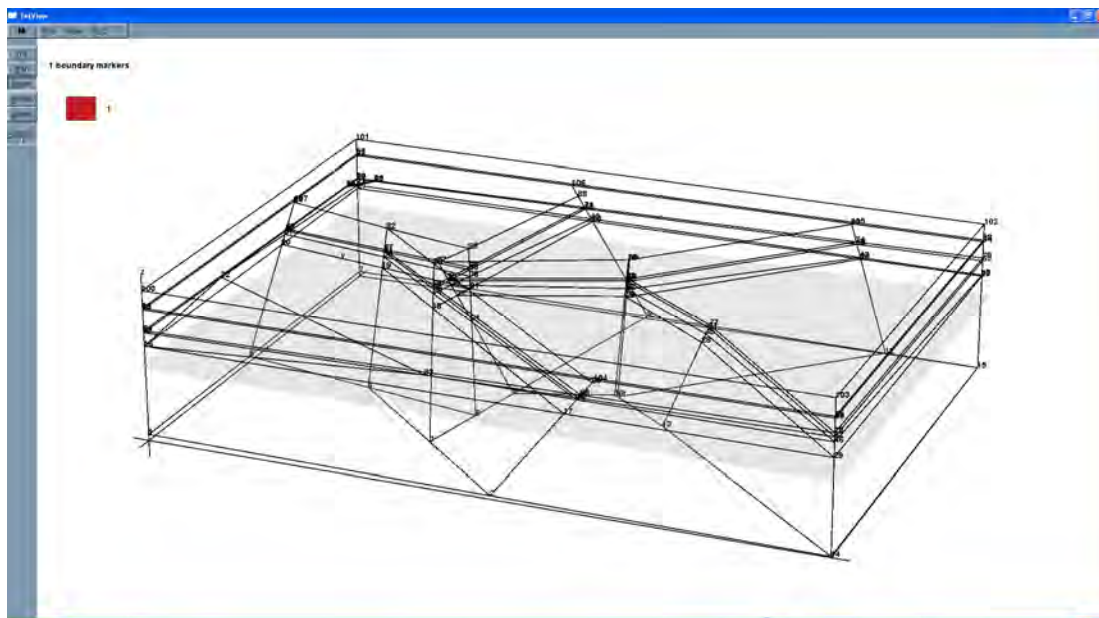


Рисунок 4 – Визуализация poly-файла с отображением всех ребер и вершин

Следует отметить, что для ускорения работы программы и построения конечноэлементной сетки пригодной для расчета, исходный poly-файл должен содержать поверхности, разделенные на довольно малые части, сравнимые с размерами желаемых объемных элементов. Для этого была произведена триангуляция входных поверхностей.

При триангуляции поверхностей невозможность пересечения треугольников достигается тем, что разбиение каждого ребра исходной поверхности является одинаковым для всех поверхностей содержащих это ребро. Триангуляция поверхностей производится с помощью программы **triangle.exe** [3].

Вид poly-файла с триангулированными поверхностями представлен на рис. 5.

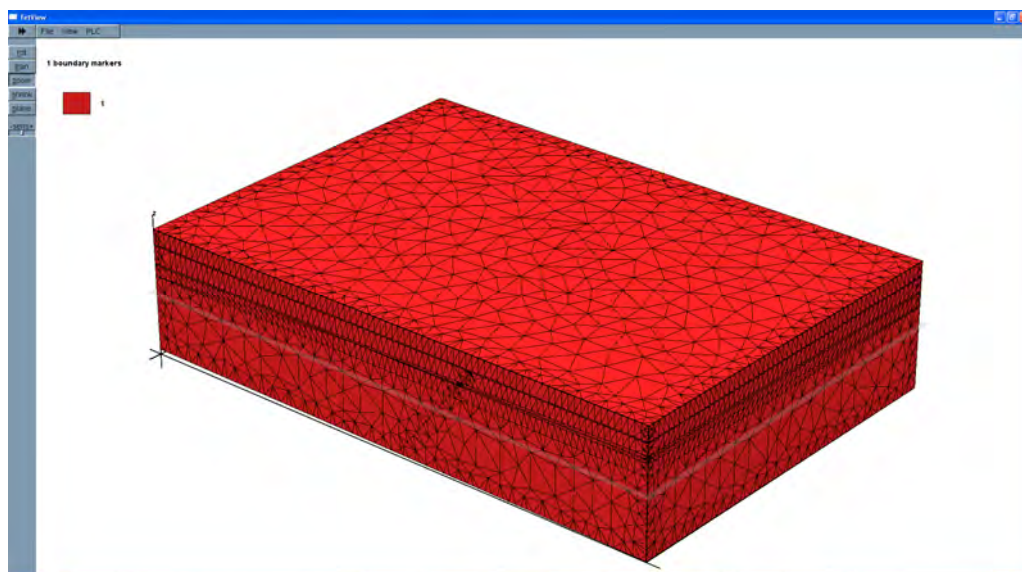


Рисунок 5 – Визуализация poly-файла с триангулированными поверхностями

В итоге построенная конечноэлементная сетка представляет собой сплошной объем. Она хоть и содержит точные поверхности разломов внутри, но две действительные поверхности, моделирующие разломы, объединены в одну. Для того, чтобы завести в модель реальные разломы, требуется произвести разбиение сетки по ним. Это достигается путем создания «двойников» каждого узла, т.е. создание узлов, имеющих то же местоположение в пространстве, что и текущий узел, или узлов сдвинутых вдоль нормали к поверхности разломов.

После этого производится переиндексация соответствующих ссылок на узлы у пирамид. Отметим также, что из-за большой размерности сетки раздваивание поверхностей разломов «вручную» является процедурой практически невозможной. В связи с этим, для этих целей разработан специализированный модуль, который автоматически, по информации об исходной сетке, создает новые узлы, моделирующие вторую поверхность разлома.

Алгоритм «раздваивания» состоит в следующем. Сначала для какого-то одного разлома все пирамиды делятся на два непересекающихся множества. Например, признак может быть сформулирован следующим образом: все узлы пирамиды находятся между поверхностями разлома 1 и разлома 2. Так как написание общего алгоритма достаточно трудоемко, то на данном этапе выбор признака проводился для каждого разлома с учетом анализа уже раздвоенных поверхностей и корректности построенной в дальнейшем сетки.

После того, как пирамиды разделены, производится поиск узлов, принадлежащих текущему разлому. Далее производится создание двойников для каждого узла. При этом пирамиды одного множества получают ссылки на новые узлы, а пирамиды второго множества остаются со ссылками на старые узлы. Процедура производится для каждого разлома последовательно. Таким образом, проблема разбиения узлов на пересечениях разломов решается автоматически, так как узлы на пересечениях сначала раздваиваются для одного разлома, а затем уже раздвоенные узлы дублируются для пересекающегося разлома. На рисунке 6 представлена конечноэлементная сетка модели с разломами.

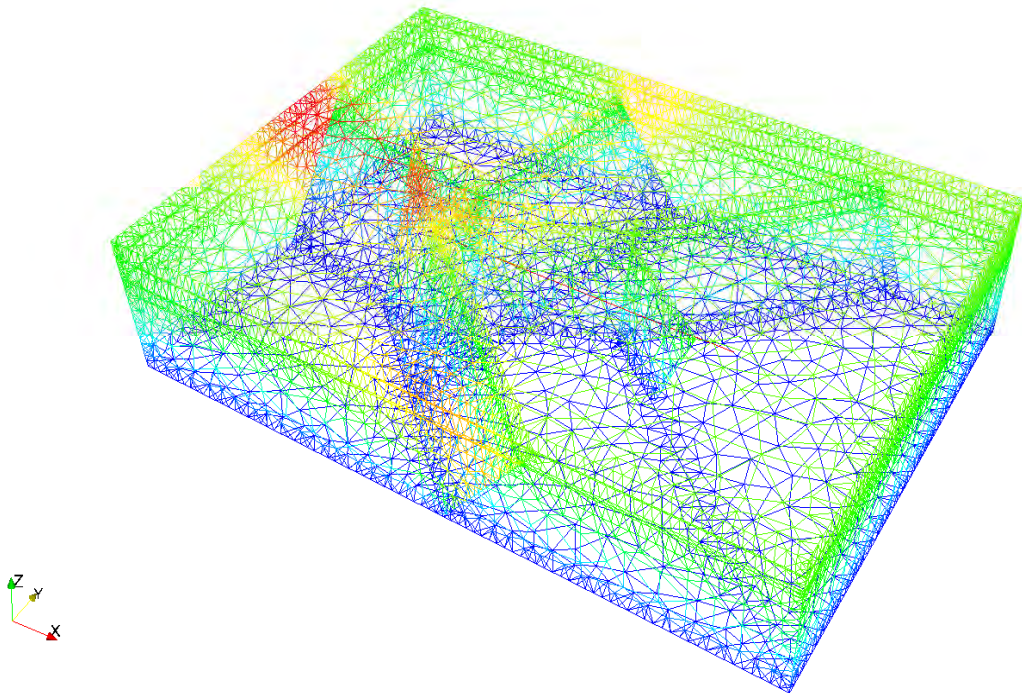


Рисунок 6 – Конечноэлементная сетка модели

Так как в нашем случае, требовалось найти только естественное напряженное состояние массива с разломами, то математическая постановка задачи имеет следующий вид:

1) уравнения равновесия в напряжениях

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{x_j} - \rho g \delta_{i3} = 0, i = 1..3,$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений;

ρ – плотность массива;

g – ускорение свободного падения;

δ_{ij} – символ Кронеккера;

2) граничные условия:

а) на левом и правом краях, т.е. при $y = Y_l, y = Y_r$:

$$\sigma_{yz} = \sigma_{yx} = 0, u_y = 0,$$

б) на заднем и переднем краю, т.е. при $x = X_l, x = X_r$:

$$\sigma_{xz} = \sigma_{xy} = 0, u_x = 0,$$

где u_i – компоненты вектора перемещений;

X_l – граница модели в западном направлении;

X_r – граница модели в восточном направлении;

Y_l – граница модели в южном направлении;

Y_r – граница модели в северном направлении;

в) на нижней границе условие жесткого закрепления: $u_x = u_y = u_z = 0$,

г) на верхней границе условие свободной поверхности $\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zz} = 0$,

3) физический закон связи между напряжениями и деформациями для трансверсально-изотропной среды и модели Кельвина-Фойгта [4,5]

4) соотношения Коши между напряжениями и деформациями:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right),$$

где ε_{ij} – компоненты тензора деформаций;

5) уравнения совместности деформаций:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_j^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{jj}}{\partial x_i^2} = 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_{ij}}{\partial x_i \partial x_j},$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial \varepsilon_{ki}}{\partial x_j} + \frac{\partial \varepsilon_{ij}}{\partial x_k} - \frac{\partial \varepsilon_{kj}}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial^2 \varepsilon_{ii}}{\partial x_k \partial x_j}, i, j, k = 1..3.$$

Границы модели при этом были выбраны следующими:

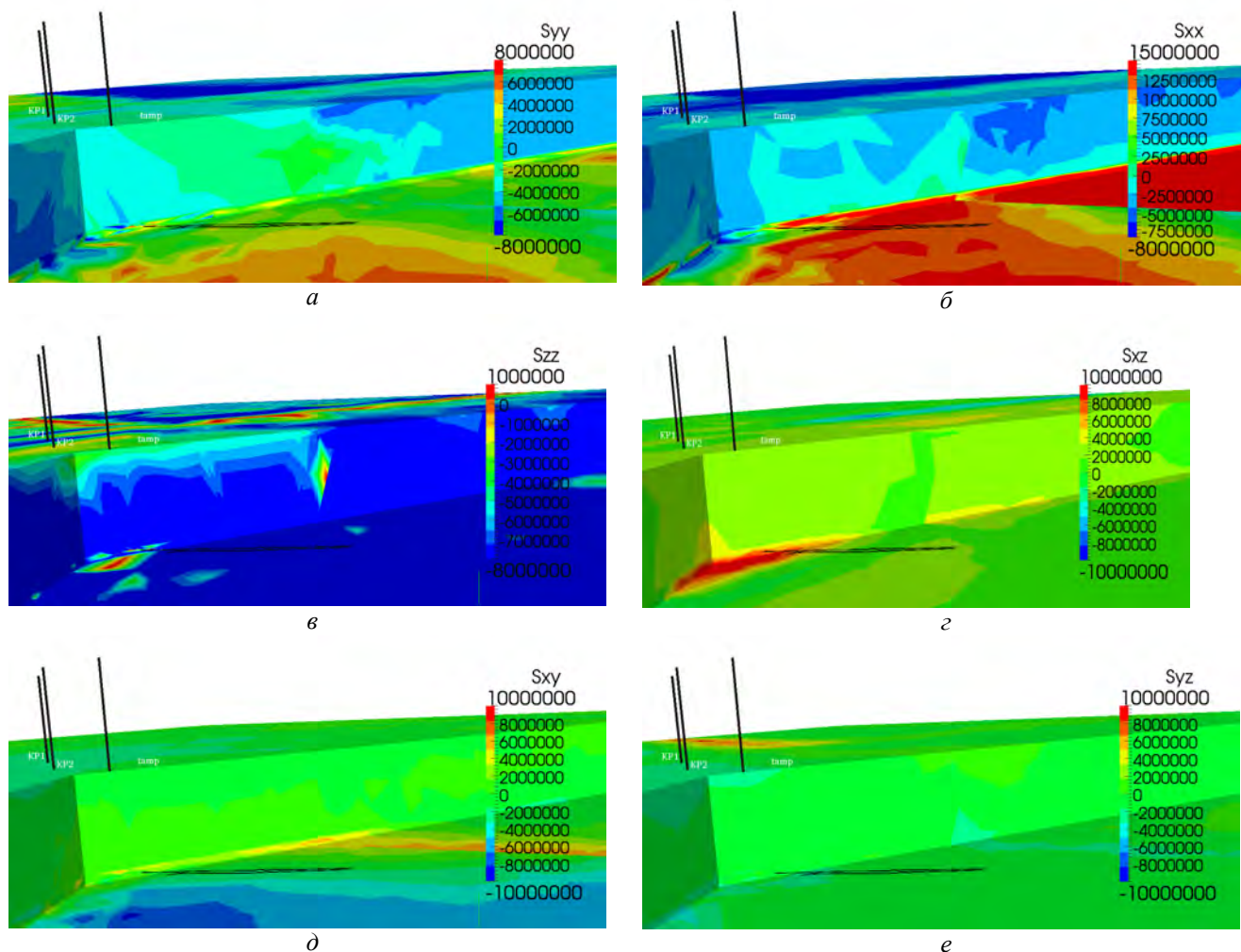
$$X_l = 10005 \text{ м}, X_r = 18000 \text{ м}, Y_l = 13000 \text{ м}, Y_r = 18520 \text{ м}$$

На основании проведения серии численных экспериментов было установлено, что для рассматриваемого класса задач достаточным является выделение трех основных пачек слоев с различными физико-механическими параметрами и дополнительно мощного «основания». Условно выделенные три основные пачки можно назвать, как осадочный слой, глинисто-мергелистая толща, соляной слой. Породная толща, находящаяся ниже соляной пачки принимается как усредненная приведенная пачка слоев. Физико-механические свойства для пачек приведены таблице 1.

Таблица 1 – Значения физико-механических расчетных параметров

Пачка	E_1 (ГПа)	E_2 (ГПа)	ν_1	ν_2	G_2 (ГПа)
Осадочная	0,3	1	0,3	0,3	0,0577
Глинисто-мергелистая толща	5	5	0,3	0,3	0,288
Соляная	14	14	0,3	0,3	0,8

Решение задачи было проведено на базе конечноэлементного пакета TOCHNOG. На рис. 7 представлено пространственное распределение компонент напряженного состояния в массиве



a – напряжения σ_{yy} (Па); *б* – напряжения σ_{xx} (Па); *в* – напряжения σ_{zz} (Па);
г – напряжения σ_{xz} (Па); *д* – напряжения σ_{xy} (Па); *е* – напряжения σ_{yz} (Па);
 Рисунок 7 – Напряженное состояние в массиве горных пород

По результатам выполненных расчетов согласно геомеханической модели можно сделать следующие выводы:

- вследствие сложного геологического строения исследуемого участка, в массиве горных пород формируется сложная картина распределения напряжений;
- имеются зоны с растягивающими напряжениями (в основном горизонтальными), которые по значениям могут превосходить вертикальные напряжения в ненарушенном массиве почти в 10 раз и являться зонами разуплотнения массива;
- вертикальные напряжения, за исключением мест непосредственно возле разломов, остаются сжимающими;
- формируются градиенты среднего горного давления вдоль горизонтальных плоскостей, что может вызывать изменение давления поровой жидкости при ее наличии;
- формируются зоны сдвиговых напряжений в вертикальном направлении, что может говорить о возможном наличии сдвиговых трещин, что косвенно подтверждается значениями параметра поврежденности массива, который имеет довольно большие значения, распределенные по довольно большой площади;
- анализ контактных усилий на разломах позволил выявить участки, где последние являются растягивающими; в частности, это касается перегиба разлома Кривичского-1, находящегося в непосредственной близости от места расслопроявления, что может говорить о наличии зон разуплотне-

ния в разломе, а при наличии контактов с обводненными местами массива, о наличии подземных вод в этих местах.

Таким образом, результаты выполненных исследований по изучению напряженно-деформированного состояния зоны сопряжения Кривичского и Листопадовичского разломов согласно построенной геомеханической модели позволяют сделать вывод о том, что на стадии формирования структуры горного массива на исследуемом участке могли сложиться геомеханические условия, способствующие образованию зон растягивающих напряжений вдоль разломов и скоплению в них рассолов.

Резюме

В данной статье описан процесс построения геомеханической модели участка пересечения Кривичского и Листопадовичского разломов. Посчитано напряженно-деформированное состояние горного массива, вызванное собственным весом. Выяснено, что напряженное состояние массива с разломами имеет существенные отличия по сравнению с напряженным состоянием в ненарушенном массиве.

Литература

1. Разработка трехмерной геологической модели на участке сопряжения Кривичского и Листопадовичского разломов в районе юго-западного направления горизонта – 445 м рудника 2 РУ по теме «Выполнить исследования, обосновать и построить трехмерные геологическую и геомеханическую модели зоны сопряжения Кривичского и Листопадовичского разломов для выполнения компьютерного моделирования»: отчет о НИР (промежут.) / БГУ; рук. темы М.А. Журавков, Краснопрошин В.В. – Минск, 2012. – 47 с. – № ГР 20122727.
2. www.tetgen.org [Электронный ресурс]. Дата доступа: 10.09.2012.
3. http://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/c_src/triangle/triangle.html [Электронный ресурс]. Дата доступа: 10.09.2012.
4. Bland D. R. The theory of linear viscoelasticity / D.R. Bland. – PERGAMON PRESS, 1960. - 125 с.
5. Мэйз Дж. Теория и задачи механики сплошных сред / Дж.Мэйз. – М.: URSS, 2007. – 318 с.

Summary

The process geomechanical model creation in the region of Listopadovichi's and Krivichi's tectonic breaches intersection is described in this paper. The stress-strain state of rock massif caused by gravity was calculated and analyzed. It was stated that stress-strain state of massif with faults has essential differences as compared with stress-strain state of massif without faults.

Поступила в редакцию 16.11.2012