

УДК 622:004.38
ББК 33.3

3D МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД СТАРОБИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАМЕННЫХ И КАЛИЙНЫХ СОЛЕЙ

А.Ф. Смалюк¹, В.В. Баркалин², Я.И. Шукевич³, Т.И. Малахов⁴
asmaliuk@gmail.com, barkaline@bntu.by, slshukevitch@gmail.com, timplusit@gmail.com

¹ Кандидат физико-математических наук, доцент

Институт бизнеса и менеджмента технологий БГУ, Минск

²Заведующий научно-исследовательской лабораторией

Белорусский национальный технический университет, Минск

³Инженер, Белорусский национальный технический университет, Минск

⁴Инженер, Белорусский национальный технический университет

Аннотация

В данной работе рассматривается моделирование напряженного состояния массива горных пород Старобинского месторождения каменных и калийных солей. Для решения данной задачи было создано программное обеспечение для построения трехмерных моделей на основе скважинных данных. Были выделены основные слои породы месторождения и их механические характеристики. Полученные модели использовались в расчетах методом конечных элементов с использованием программных комплексов Comsol и Code aster. В результате получены поля напряжений и смещений, возникающих в горных породах месторождения под действием силы тяжести, и величины проседания дневной поверхности массива, в том числе над местами выработок. Была сделана оценка влияния обрушения выработки на рельеф поверхности.

Ключевые слова: метод конечных элементов, геомеханика, месторождение, калийные соли

3D STRESS FIELD MODELLING OF THE STAROBIN ROCK AND POTASSIUM SALT DEPOSIT

A.F.Smaliuk¹, V.V.Barkaline², Y.I.Shukevitch³, T.I. Malahov⁴
asmaliuk@gmail.com, barkaline@bntu.by, slshukevitch@gmail.com, timplusit@gmail.com

¹Candidate of physical and mathematical sciences, associate professor
School of Business and Management of Technology of BSU, Minsk

²Head of research laboratory

Belorussian national technical university, Minsk

³Engineer, Belorussian national technical university, Minsk

⁴Engineer, Belorussian national technical university, Minsk

Abstract

This paper describes the modeling of the stressed state of the Starobin Potassium salt deposit. Computer program for three dimensional model building from a geological survey data was developed. Main layers of rock formation and mechanical characteristics was determined. Achieved models was used in the finite element stress analysis using Comsol and Code Aster software. As a result stress and displacements fields developed by gravity forces was achieved, including surface displacements. Estimation of a surface displacements due to a mine collapse was achieved.

Keywords: finite element analysis, potassium salt deposit, rock formation.

ВВЕДЕНИЕ

Данная работа выполнялась в рамках научно-технической программы Союзного государства «Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства» («СКИФ-НЕДРА»).

Первым этапом решения является создание модели, описывающей происходящие в Старобинском месторождении процессы с точки зрения геомеханики.

Основные положения математического моделирования геомеханических процессов на основе методов и подходов механики деформируемого твердого тела применительно к месторождениям соляных пород блочно-слоистого строения с явно выраженными реологическими свойствами разработаны белорусской школой М.А. Журавкова [1] и составляют теоретическую основу решения прямых задач геомеханики в отношении к Старобинскому месторождению каменных и калийных солей - крупнейшему месторождению соляных пород, расположенному в Республике Беларусь.

В зависимости от механических свойств массива пород и характера протекающих в нем процессов используются различные модели, которые в совокупности охватывают многообразие массивов и исследуемых явлений. Наиболее широко применяются следующие модели массива пород: упругая, вязкоупругая, упруго- и жесткопластическая (в том числе и неоднородная), вязкоупругопластическая, текучая (вязкая), отдельно-блочная и другие.

В настоящее время упругая модель применяется в расчетах горных выработок наиболее часто. Упругая модель массива пород впервые была использована для изучения напряжений в массиве пород вокруг выработок советскими учеными Динником А.Н. [2,3], Савиным Г.Н. [4] и другими. Указанные ученые известны своими многочисленными трудами по применению теории упругости к вопросам горного давления. Ряд решений, полученных ими, находят и сейчас непосредственное применение в механике горных пород и механике подземных сооружений.

Упругая модель массива пород представляет собой линейно-деформируемую среду, т.е. среду, в которой напряжения и деформации связаны линейными зависимостями. В основу упругой модели положено свойство упругости горных пород, которое заключается в существовании зависимости между напряжениями и деформациями, близкой к линейной, в способности восстанавливать форму и размеры (в известных пределах) при разгрузке и способности распространять упругие волны. В упругой модели все эти качества реальных массивов пород идеализированы.

Независимо от уровня напряжений некоторая часть деформаций горных пород всегда упруга, при разгрузке эта часть деформаций обратима. После образования выработок именно запасенная упругая деформация пород приводит к перемещениям поверхностей обнажений пород, к появлению зон пластического деформирования и разрушениям. Линейно-упругие деформации в изотропных породах (при отсутствии регулярных систем нарушений) определяются модулем упругости и коэффициентом поперечной деформации. В процессе разрушения пород их упругие характеристики обычно изменяются. Об изменении модуля упругости при разрушении свидетельствует меняющийся наклон графиков при разгрузке на запредельном участке деформирования.

Использованное программное обеспечение

Comsol Multiphysics – универсальное ПО для конечноэлементного моделирования. Позволяет рассчитывать множество физических процессов – от осаждения гальванических покрытий до механики и аэродинамики. В данном случае использовался один из базовых модулей программы – Solid Mechanics. Модель позволяет решать широкий спектр задач

механики деформируемого твёрдого тела, как линейных (физически и геометрически), так и нелинейных. Использовалось расширение этого модуля – Geomechanics, в которой присутствуют различные критерии пластичности для грунтов – Мора-Кулона, Друкера-Прагера, Мацуока – Накаи и т.д.

Code Aster — пакет для выполнения расчетов методом конечных элементов. Он разрабатывается французской компанией EDF — крупнейшей энергогенерирующей компанией Франции. Данный пакет предназначался для расчетов узлов и сооружений электростанций (включая атомные).

Пакет обладает широчайшим спектром возможностей.

В первую очередь это различные задачи механики. Преимущественно это статические расчеты на прочность, но с его помощью возможно решать и динамические задачи, включая задачи с большими деформациями.

Code Aster включает в себя возможности для моделирования систем состоящих из нескольких твердых тел и позволяет моделировать контактные задачи.

Т.к. его используют не только для машиностроительных расчетов, но также и для расчетов зданий и сооружений, в пакете присутствует широкий выбор моделей для геоматериалов.

Кроме решения простых задач, с помощью Code Aster возможно выполнять оценку ресурса механических систем, решать задачи на разрушение.

Code Aster может быть использован совместно с пакетами для гидродинамических расчетов, например Code Saturne, что позволяет решать задачи взаимодействия жидкостей и твердых тел.

Т.к. данный пакет активно используется для расчетов ответственных узлов и конструкций атомных электростанций, его расчеты многократно проверялись, путем сравнения с аналитическими решениями и экспериментальными результатами, а также результатами других программ. В комплект пакета входит около двух тысяч тестовых задач.

Code Aster официально выпускается для операционных систем Linux и FreeBSD, но также существует неофициальный порт для Windows.

Пакет доступен бесплатно, и его исходные тексты выпускаются под лицензией GNU General Public License.

Первая открытая версия была выпущена в октябре 2001 года.

Создание геометрической модели месторождения.

Рассматриваемое месторождение, как и практически любой геологический объект, представляет собой очень сложную систему, состоящую из множества слоев сложной формы. Получить полные данные о составе такой системы не представляется возможным. Поэтому по результатам геологической разведки было выделено несколько основных слоев, составляющих месторождение. Комбинация этих слоев и будет составлять геометрию рассматриваемой системы.

Механические и прочие характеристики породы в каждом из этих слоев усредняются. Были выделены следующие основные слои:

1. Наносные отложения четвертичного и третичного периода;
2. Меловые отложения;
3. Юрские отложения;
4. Надсолевая глинисто-мергелитовая толща;
5. Соленосная толща с четырьмя калийными горизонтами;
6. Толща песчаников и туфов на кристаллическом фундаменте.

При компьютерном моделировании методом конечных элементов сначала необходимо получить геометрическую твердотельную модель объекта, для которого будет выполняться расчет, чтобы на ее основе создать конечно-элементную сетку.

Изначально такой модели не существовало, мы имели только скважинные данные геологической разведки месторождения, которые представляют собой фактически набор точек, по которым и следовало построить объёмные геометрические модели слоёв месторождения. Для этого была разработана специальная программа.

На этом этапе нашей задачей было разработать и реализовать программный продукт, предназначенный для расшифровки данных геологической разведки с последующим построением трёхмерной модели слоёв разведанного участка.

Исходные данные:

Файл формата *.xlsx в котором в определённом формате содержатся данные об уровнях залегания слоёв в различных точках участка.

В качестве языка программирования был выбран язык Java, так как особенности работы среды java позволяют сделать программу кроссплатформенной. Также неоспоримым плюсом можно назвать наличие свободной среды разработки.

Данные, полученные из исходного файла представляют собой набор точек с координатами в трёхмерном пространстве. Для каждого подмножества точек известно отношение этого подмножества к границе того или иного слоя.

Разработанная программа разделяет данные по отдельным коллекциям в момент чтения файла, т.е. по завершении чтения файла в программе хранятся подмножества точек, образующих границы между физическими слоями грунта.

Создание 3D модели сводится к созданию границ между слоями, достраивание слоёв до минимальной выпуклой оболочки, образованной самым обширным слоем, и созданию боковых стенок, замыкающих границы слоёв. Образованные таким образом объёмы будут являться трёхмерной интерпретацией реальных слоёв массива.

Для создания границ слоёв из отдельных точек, очевидно, необходимо произвести триангуляцию. В разработанной программе используется триангуляция Делоне. Триангуляция Делоне — триангуляция для заданного множества точек S на плоскости, при которой для любого треугольника все точки из S , за исключением точек, являющихся его вершинами, лежат вне окружности, описанной вокруг треугольника. После проведения триангуляции третья координата каждой вершины корректируется в соответствии с шахтными данными.

В результате работы программы на данном этапе создаётся новая структура данных, хранящая в себе свойства треугольников, образующих искомые границы слоёв. В окне программы можно выбрать интересующий нас слой и изучить, как прошла триангуляция для данного слоя (рис. 1).

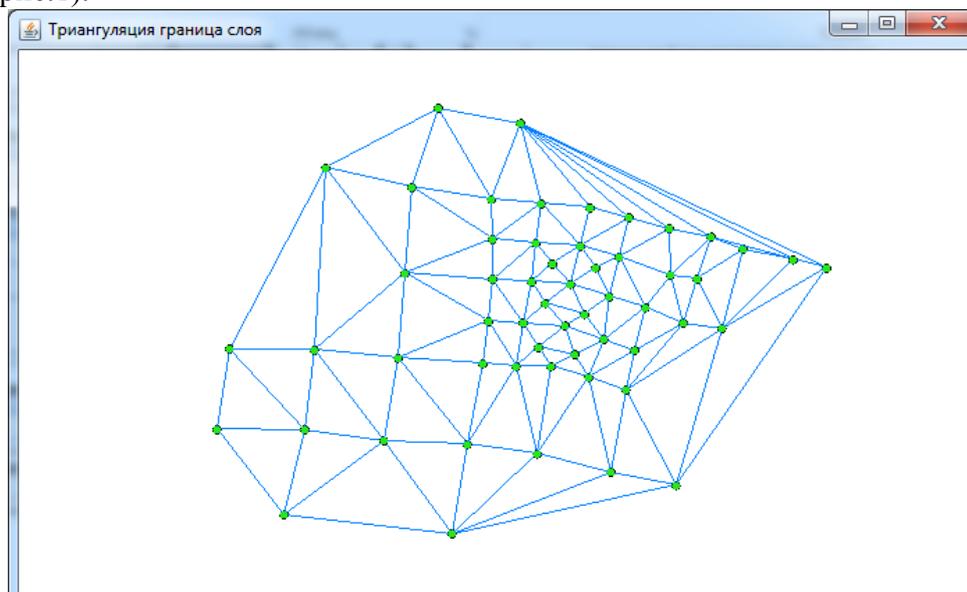


Рисунок 1 - Триангулированная граница верхнего слоя.

Также, для удобства проведения последующих расчётов, на основании создаваемой модели, принято решение о достраивании границ слоёв, данные по которым менее подробны, до минимальной выпуклой оболочки.

Усредненные параметры материалов

Механические модели идеализируют массив пород, в них отражаются только главные существенные его свойства и отбрасываются все остальные факторы, которые, с точки зрения исследуемых явлений несущественны. К числу свойств массива пород, которые подвергаются схематизации в модели, помимо прочностных и деформационных, относятся сплошность, изотропность и однородность. Применение механических моделей и расчетных схем при выполнении расчетов любых подземных конструкций является необходимым, так как анализ с полным учетом всех свойств массивов пород является принципиально невозможным вследствие их очевидной неисчерпаемости.

В нашем расчете использовалась упругая модель материалов, которая с одной стороны позволяет значительно уменьшить время выполнения расчетов для такой сложной системы, и при этом получаемые результаты имеют удовлетворительную точность. Для расчета использовались усредненные механические параметры слоев месторождения, приведенные в таблице 1 [5].

Таблица 1 – параметры материалов породного массива

Порода	Плотность, кг/м ³	Модуль Юнга, ГПа	Коэффициент Пуассона	Предел на сжатие, МПа
1. Отложения	2300	0.2	0.49	10
2. ГМТ	2200	0.7	0.35	8
3. Солесодержащий слой	2300	1.75	0.35	25.2
4. Калийные горизонты	2300	1.64	0.29	28.9
5. Постилающий слой - песчаник	2700	35	0.19	100

Материалы в таблице приведены в порядке «от поверхности к глубине».

Нагрузки, действующие на систему и граничные условия

Главным определяющим фактором напряженного состояния породного массива является гравитационное поле.

Самые большие напряжения в породе возникают именно под действием веса пород, находящихся над ней. Именно этот фактор следует учитывать в первую очередь и именно он обеспечивает наибольшие величины напряжений в породе.

Существуют также и другие факторы, такие как тектонические напряжения. В массиве, подверженном совместному влиянию гравитационных и тектонических сил, действуют две активные нагрузки: в вертикальном направлении - силы веса пород и в определенном горизонтальном направлении - тектонические силы. Возникающие при этом боковые реактивные напряжения следует рассматривать отдельно в горизонтальной плоскости – для гравитационного поля и в вертикальной плоскости - для поля действующих тектонических сил. Степень неоднородности поля тектонических напряжений может меняться в весьма широких пределах.

На данном этапе наших исследований мы сосредоточились на моделировании гравитационной составляющей действующих в массиве породы сил.

Ко всем рассматриваемым расчетным моделям прикладывается стандартная гравитационная нагрузка. Для каждого из слоев породы задается плотность, в соответствии с таблицей 1, которая обуславливает массу и вес данного слоя.

Так как массив рассматриваемого месторождения опирается на прочное скальное основание, во всех рассматриваемых моделях использовалось жесткое закрепление основания геометрической модели.

Кроме того, боковые грани рассматриваемого массива породы опираются на соседние массивы, что обуславливает минимальное перемещение в горизонтальной плоскости. Поэтому на боковые грани моделей накладывались ограничения на перемещения по горизонтали, при этом перемещения под действием силы тяжести возможны, и вертикальные перемещения не ограничивались.

Моделирование в пакете Code Aster. Полученные результаты.

Расчет проводился в пакете Code Aster, в качестве графической оболочки для него использовалось приложение Salome, обеспечивающее создание на основе геометрической модели конечно-элементной сетки, запуск расчета и визуализацию результатов.

Кроме основных слоев месторождения модель включает в себя несколько лав: мест выработки породы. Это необходимо для того, чтобы оценить влияние лавы на деформации рельефа местности после того, как произойдет обрушение лавы по мере ее эксплуатации. Расположение четырех лав в слоях породы можно увидеть на рис. 2



Рисунок 2 - Расположение лав в слоях породы

Полученная в пакете Salome конечно элементная сетка выглядит следующим образом:

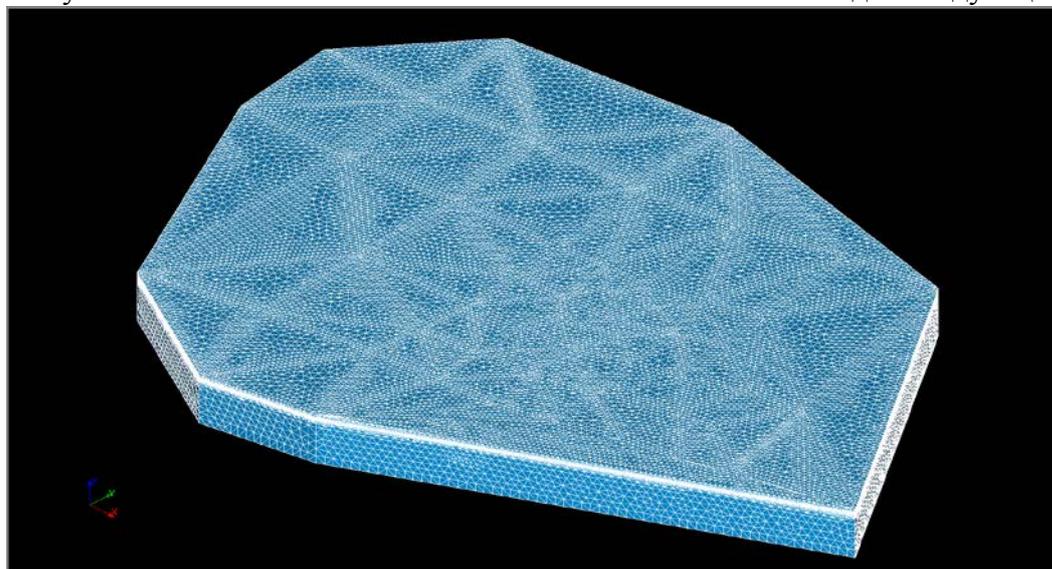


Рисунок 3 - Конечно-элементная сетка, общий вид.

В связи с значительной разницей в толщине рассматриваемых в модели слоев, сетка имеет большую неоднородность по высоте модели. Вид сетки боковой поверхности модели показан на рис. 4

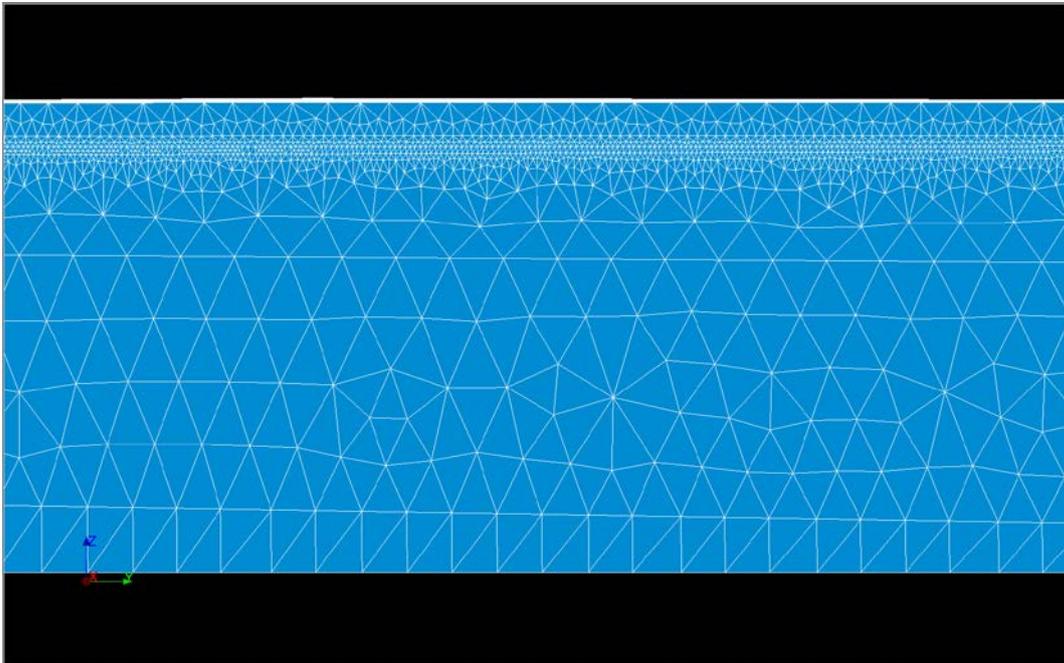


Рисунок 4 - Конечно элементная сетка боковой поверхности.

Нижние, более толстые слои состоят из крупных элементов, верхние тонкие осадочные слои имеют значительно более плотную конечно-элементную сетку.

После расчета созданной модели были получены поля напряжений и перемещений в массиве пород. Общий вид полей перемещений на поверхности месторождения показан на рис. 5

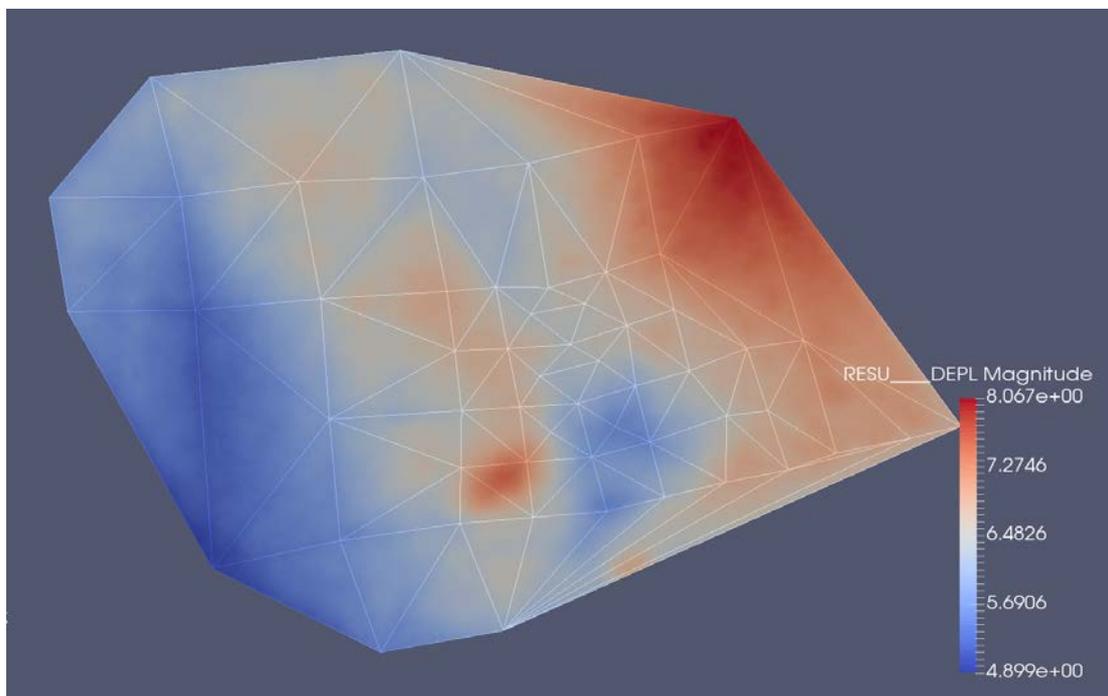


Рисунок 5 - Перемещения на поверхности месторождения

Наибольшие перемещения наблюдаются в верхнем левом углу, что обусловлено тем, что там присутствуют самые толстые слои мягких пород.

Также имеются пятна в нижней части модели. Эти пятна соответствуют местоположению выработанного пространства лав.

Область расположения лав в большем масштабе можно увидеть на рис. 6

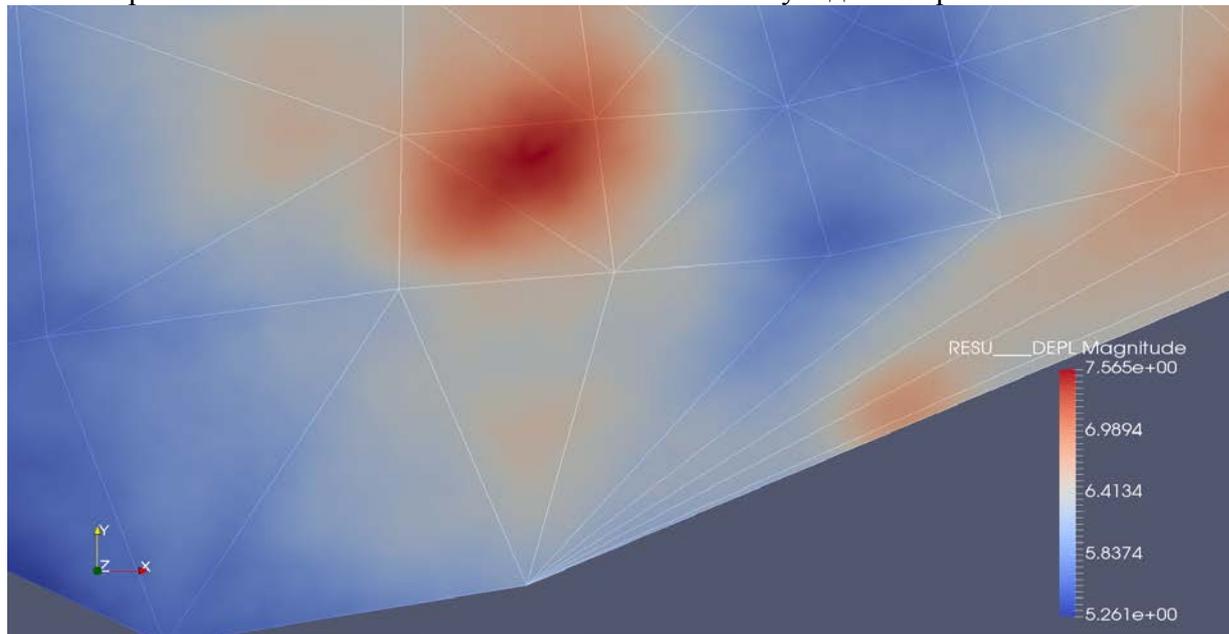


Рисунок 6 - Перемещения в местах расположения лав.

Самое крупное пятно на рис 6 соответствует расположению нескольких крупных лав, небольшое пятно у края модели - еще одна лава меньшего размера.

Расчет показал, что наличие лавы дает увеличение проседания породы по сравнению со сплошной на величину от 1 до трех метров.

Моделирование в пакете Comsol, полученные результаты.

В пакете Comsol была построена конечно-элементная сетка, показанная на рис. 7

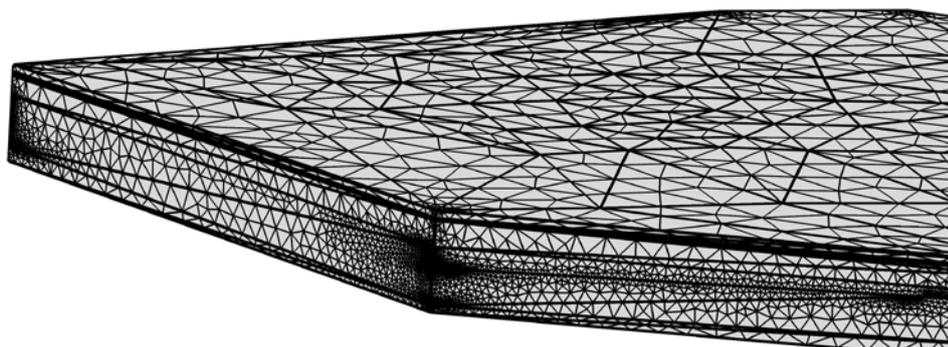


Рисунок 7 - Конечно-элементная сетка полученная в Comsol

Были наложены граничные условия, описанные ранее, и графически представленные на рисунках 8 и 9

На нижней части подложки задавалось граничное условия отсутствия всех смещений:

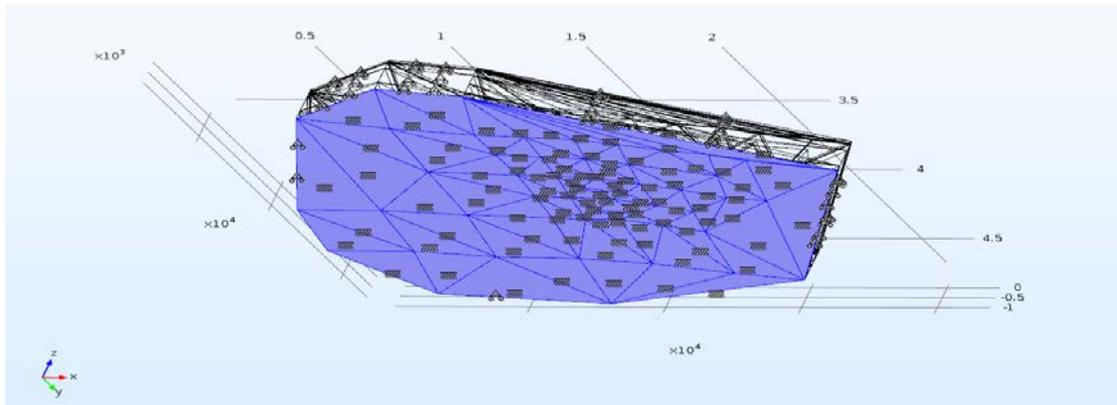


Рисунок 8 - Границы с условием «закрепление»

На боковых гранях задавалось граничное условие равенства нулю нормальных смещений:

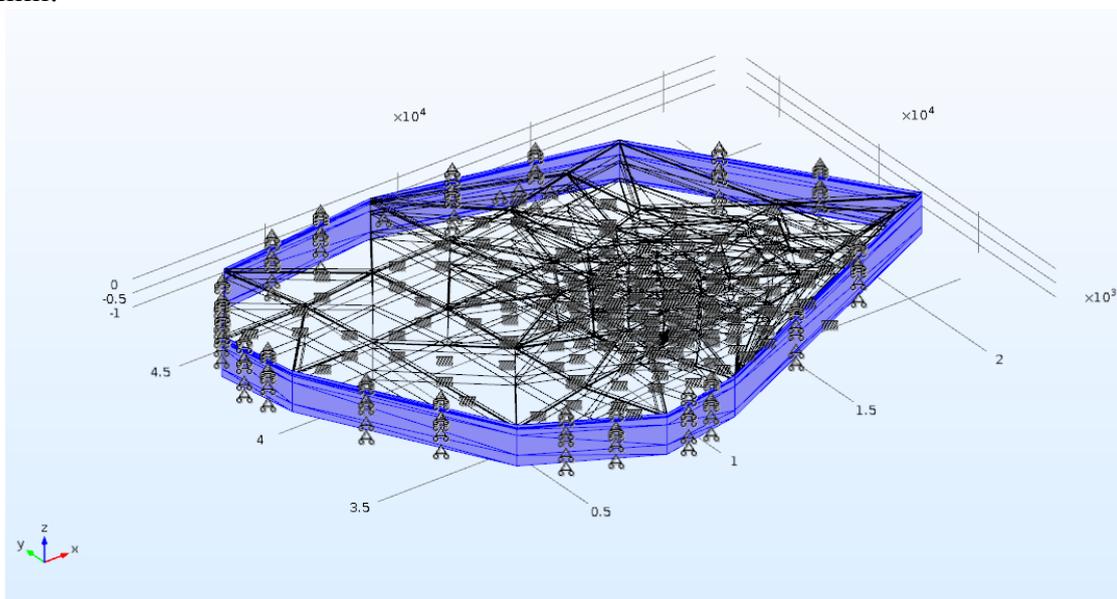


Рисунок 9- Границы с условием «скольжение»

Верхняя граница описывалась как свободная (нет внешних напряжений, разрешены все смещения). Внутренние границы описывались как свободные поверхности, вводилось условие непрерывности свойств среды.

Расчет был выполнен в 2 этапа:

1. Расчёт напряжённо-деформированного состояния пород месторождения под воздействием силы тяжести. Определение поля смещений и, следовательно, поля напряжений во всех узлах. Расчёт производился в стационарном режиме.
2. Расчёт напряженно-деформированного состояния пород месторождения под воздействием силы тяжести с учётом выработанной лавы. В качестве начальных условий брались предварительно вычисленные поля напряжений и смещений. Расчёт производился в стационарном режиме.

Это позволило получить перемещения, которые обусловлены наличием только лавы. Из которых исключены перемещения, обусловленные сжатием пород под действием гравитации.

Результат первого этапа расчетов показан на рис. 10

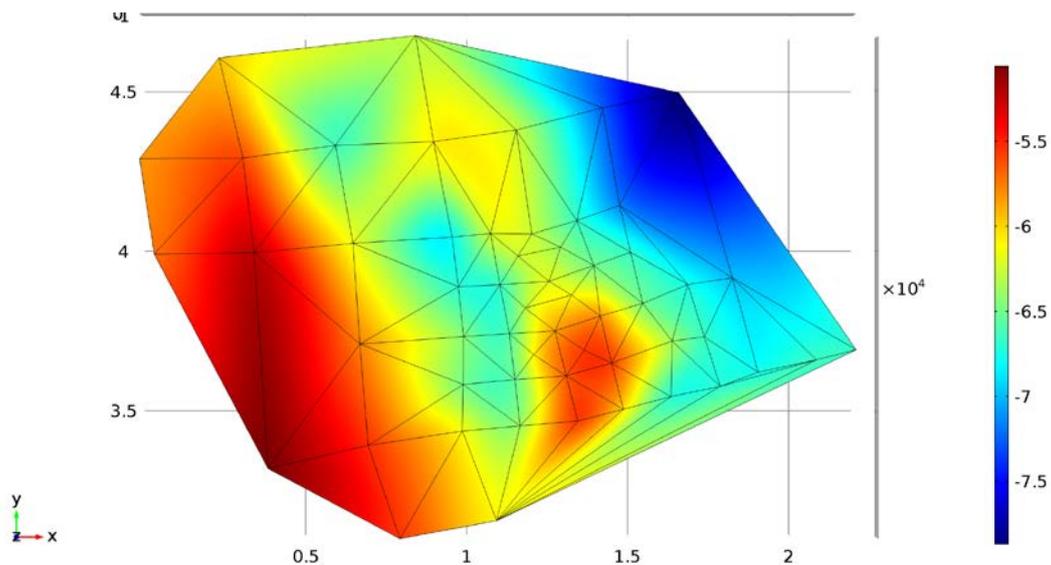


Рисунок 10 - Смещения на верхней поверхности месторождения под воздействием гравитации, без лавы

Перемещения породы, обусловленные лавой, показаны на рис 11

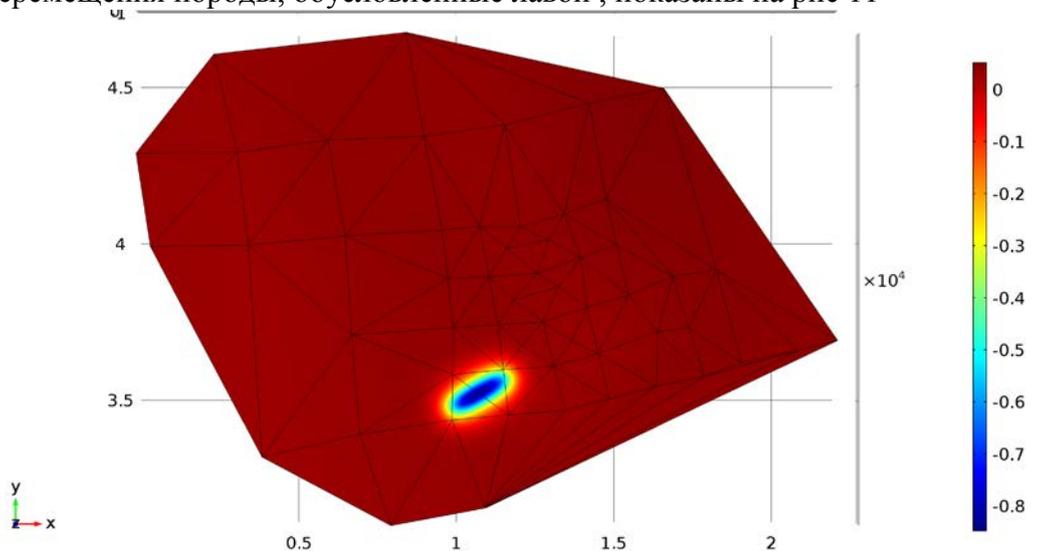


Рисунок 11 - Смещения на верхней поверхности месторождения под воздействием гравитации с учетом только наличия лавы.

ВЫВОДЫ

В ходе выполнения работ по проекту научно-технической программы Союзного государства «Исследования и разработка высокопроизводительных информационно-вычислительных технологий для увеличения и эффективного использования ресурсного потенциала углеводородного сырья Союзного государства» («СКИФ-НЕДРА») были созданы:

Модель участка Старобинского месторождения калийных и каменных солей.

На основе данных геологической разведки была создана трехмерная геометрическая модель участка Старобинского месторождения калийных и каменных солей,

Созданы конечно-элементные модели данного месторождения в пакетах Comsol и Code Aster.

Выполнены расчеты напряженного состояния массива пород месторождения под действием гравитационных сил.

Получены величины перемещений на поверхности месторождения, обусловленные наличием выработанного пространства. Обе модели показали достаточно близкие результаты, что свидетельствует об адекватности расчетных методик обоих пакетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Журавков, М.А., Мартыненко, М. Д. Теоретические основы деформационной механики блочно-слоистого массива соляных горных пород. – Минск: Университетское, 1995. – 255 с.
2. Динник, А.Н. Статьи по горному делу / [Предисл. чл.-кор. АН УССР П. С. Кучерова и проф. Н. П. Гришковой]. - М.: Углетехиздат, 1957. - 195 с.
3. Динник, А.Н. Справочник по технической механике с горным уклоном. - [Б. м.]: Уголь, 1931. - 190 с. – (Сер. справ. изд. / Об-ние гос. каменноугол. пром-сти "Уголь", Науч.-изд. бюро ; Кн. 8).
4. Савин, Г.Н. Вопросы горной механики: Труды Науч. конференции по горной механике, посвящ. 100-летию со дня рождения акад. М. М. Федорова (Донецк, 4-6 апр. 1967 г.) / Донецкий ин-т горной механики и техн. кибернетики им. М. М. Федорова МУП СССР. Ин-т геотехн. механики АН УССР. - Киев: Наукова думка, 1969. - 325 с. с ил.; 1 л. портр.
5. Компьютерное моделирование в геомеханике: материалы Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и механико-математические модели в геомеханике, механике машин и механизмов», 3-7 нояб., 2008 г., г. Минск /М. А. Журавков [и др.]; под общ. ред. М.А.Журавкова. – Минск, Изд. центр БГУ, 2008. - 443 с.

Статья поступила в редакцию 16.07.2017