

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ГЕОФИЗИКИ им. С.И.СУББОТИНА

На правах рукописи

УДК 550.361

Бахова Наталья Ивановна

Тепловые аномалии и термоупругие напряжения
в сложно построенных геологических средах
(по результатам численного моделирования
на основе метода конечных элементов).

Специальность 01.04.12 - Геофизика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Киев - 1995

850.3



00761491 (S)

Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Институте геофизики им. С.И.Субботина

Национальной академии наук Украины

Научный руководитель д.г.-м.н., профессор Кутас Р.И.

Официальные оппоненты:

- 1. Доктор геолого-минералогических наук, профессор Осадчий В.Г.
- 2. Кандидат физико-математических наук Хазан Я.М.

Ведущая организация:

Центр аэрокосмических исследований НАН Украины

Защита состоится 19 декабря в 13 часов
 на заседании специализированного совета Д 01.95.01 при
 Институте геофизики НАН Украины: 252142, г.Киев, проспект
 Палладина, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института геофизики им. С.И.Субботина НАН Украины.

Автореферат разослан "16" ноября 1995г.

Ученый секретарь

специализированного ученого совета

доктор физико-математических наук

В.С.Гейко

ЛНБ ім. В. Стефаніка
 АН України

Введение

А к т у а л ь н о с т ь. Тепловой поток является основным источником информации о тепловом состоянии Земли и энергетике происходящих в ней процессов.

Многообразие тектонических процессов, неравномерное распределение источников тепла, изменение механизма теплопередачи на разных глубинах значительно влияет на распределение тепловых потоков. Существенные возмущения теплового поля создаются термическими процессами, происходящими в приповерхностном слое, где обычно измеряются тепловые потоки. К ним относятся гидротермальные эффекты, топография, осадконакопление и эрозия, неоднородность геологического разреза по теплофизическим свойствам.

Методы интерпретации неоднородностей теплового поля разработаны слабее, чем других геофизических полей, ввиду того, что в формировании геотермических аномалий участвует большее число природных факторов.

В случае неоднородной среды (даже если размеры геологических тел достигают несколько сотен метров) могут возникать значительные вариации потока.

Таким образом, возникает необходимость получить детальное распределение температур и тепловых потоков в сложно построенных геологических средах. Это даст возможность оценить влияние на тепловое поле природных факторов, таких как неравномерное распределение источников тепла, контрастная теплопроводность геологических тел, отложение осадков при низкой температуре, неоднородные граничные условия.

Аналитические решения уравнения теплопроводности в неоднородной среде получены лишь для частных случаев, когда включения с иными теплофизическими свойствами можно представить телами правильной геометрической формы [Е.А.Любимова, 1975]. Использование конечно-разностных схем для решения уравнения Пуассона в областях сложной формы с разрывными коэффициентами и произвольными граничными условиями встречаются с определенными трудностями [А.А.Самарский, 1977]. Метод конечных элементов (МКЭ) позволяет эти трудности обойти и в физически наглядной форме с высокой точностью учесть сложность геометрии среды и граничных условий, реальные нагрузки, свойства вещества.

Использование МКЭ для решения прямых задач геотермики и построении системы интерпретации полученных результатов на его основе представляется весьма актуальным.

Неоднородности в среде и неравномерное нагревание являются причиной возникновения термоупругих напряжений. Количественное описание напряженно-деформированного состояния областей сложного очертания с различными теплофизическими и упругими свойствами необходимо для оценки региональной сейсмической и вулканической активности.

Цель и задачи работы. Интерпретация теплового поля в отличие от других геофизических полей имеет свою специфику, требующую всестороннего анализа и эффективных численных методов решения прямых задач геотермии.

Цель работы заключается в разработке методики расчета геотермических аномалий и термоупругих напряжений в реальных сложно построенных геологических средах с произвольными граничными условиями.

Для этого потребовалось решение следующих задач:

- 1) на основе комплексного анализа имеющихся геофизических данных по исследуемым областям составить адекватные физические модели для регионов;
- 2) разработать вычислительные алгоритмы и составить программы для численного моделирования исследуемых процессов;
- 3) провести расчеты на ЭВМ и проанализировать полученные численные результаты с возможным уточнением моделей.

Методика исследований. Для анализа тепловых возмущений и термоупругих напряжений, вызванных неоднородными включениями и блоками земной коры, использовалось численное моделирование на основе метода конечных элементов.

Научная новизна. Впервые на основе метода конечных элементов разработаны алгоритмы и программы расчета геотермических аномалий для неоднородных сред различного очертания с произвольными граничными условиями.

Предложены двумерные геотермические модели Днепровско-Донецкой впадины и Карпатского региона. Физико-математические модели максимально приближены к реальной среде. Это позволило впервые получить высокоточное детальное распределение тепловых потоков по глубине и латерали.

С помощью МКЭ дана количественная характеристика термоупругих напряжений и перемещений для сложно построенных сред и изучено взаимное влияние геометрии среды и граничных условий.

Впервые на основе МКЭ рассчитаны напряжения и деформации в земной коре Карпатского региона, обусловленные неравномерным распределением температуры.

Практическое значение. Подробные расчетные данные о приповерхностном тепловом режиме необходимы при анализе геотермических аномалий, определении их природы, а также построении системы интерпретации, исходя из конкретной геологической обстановки и особенностей истории тектонического развития. Кроме того, решение прямых задач геотермии с помощью МКЭ имеет значение для прогноза глубинных температур в конкретных регионах.

Оценка термоупругого состояния земной коры должна не только помочь лучше понять региональные характеристики сейсмической и вулканической активности, но и обеспечить дополнительную информацию, позволяющую оценить опасность, связанную с этими природными явлениями.

Исходные материалы и личный вклад автора. В работе изложены результаты исследований, проводимых автором с 1989 по 1994 год в Институте геофизики им.С.И.Субботина НАН Украины в рамках научной темы 1.5.2.2 "Тепловой режим и современная динамика сейсмических и асейсмических областей" и проекта ГКНТ 6.2/5 "Исследование роли теплопереноса на формирование аномалий теплового потока Земли на территории Украины (1993-1994 гг.)", разрабатываемыми в отделе геотермии и современной геодинамики.

В процессе проведения исследований, а также при изложении полученных результатов автор опиралась на известные положения теории метода конечных элементов, методов численного анализа, вычислительной математики, программирования на ЭВМ. При изучении эффективности разработанных алгоритмов и программ широко применялись методы модельных исследований и вычислительный эксперимент. **Достоверность и**

обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обуславливается большим количеством модельных расчетов и результатами сравнения с имеющимися аналитическими решениями и данными полевого эксперимента.

Все результаты численного моделирования получены автором самостоятельно. Создание и реализация программ на ЭВМ, опробование их эффективности на тестовых примерах также осуществлены автором.

В работе приведены результаты применения метода конечных элементов для интерпретации геотермических аномалий в сложно построенных геологических средах, а также для количественного описания режима термоупругих напряжений по созданной автором методике расчета стационарных задач геотермии и термоупругости на основе МКЭ. Используемые при этом данные были любезно предоставлены автору руководителем отдела геотермии и современной геодинамики Р.И.Кутасом.

Публикации и апробация работы. Отдельные положения и результаты работы изложены в трех статьях. Материалы исследования докладывались на межреспубликанском совещании "Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон" (с. Долинка, оз.Иссык-Куль, Кыргызстан, 1991), а также на коллоквиумах отдела геотермии и современной геодинамики (1990-1994).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав и заключения, изложенных на 156 страницах машинописного текста; включает 1 таблицу, 64 рисунка и список литературы из 51 наименования.

Работа была выполнена в очной аспирантуре в отделе геотермии и современной геодинамики Института геофизики НАН Украины под руководством профессора, доктора геолого-минералогических наук Р.И.Кутаса.

Автор искренне благодарит доктора геол.-мин. наук Р.И.Кутаса за постоянные консультации, чрезвычайно полезные предложения и замечания, способствовавшим первым самостоятельным исследованиям автора.

Подготовка диссертации во многом обязана благотворной обстановке, сложившейся в отделе геотермии и современной геодинамики. На различных стадиях работы над диссертацией автор получила большую пользу от дискуссий с В.А.Цвященко, В.П.Коболевым, М.И.Бевзюком и О.П.Кравчуком.

Автор глубоко признательна ведущему инженеру Ю.М.Пищаному за постоянную поддержку и большую помощь в реализации программного обеспечения для ПЭВМ.

Глава 1. Конечные элементы в континууме (вариационный подход).

Изучение реальных природных процессов в последнее время было бы невозможно без применения численных методов. Метод конечных элементов является одним из современных и самых эффективных методов решения дифференциальных уравнений.

Преимущества метода конечных элементов над другими численными методами заключаются в следующем: 1) значительное приближение расчетной схемы к реальной среде; 2) простота исследования неоднородных и анизотропных тел; 3) возможность использования элементов различной формы и размеров для аппроксимации произвольных границ и для исследования областей

сильного изменения неизвестных функций; 4) граничные условия для градиента вводятся естественным образом и с большей точностью, чем в конечно-разностных методах; 5) точность решения можно увеличивать за счет использования элементов более высоких порядков без усложнения граничных условий, чего нельзя добиться при использовании конечно-разностной аппроксимации более высокого порядка.

Однако следует отметить, что, несмотря на растущую популярность метода конечных элементов, не стоит забывать другие процессы аппроксимации, так как в конкретных ситуациях каждый тип аппроксимации имеет свои достоинства.

Решение задач с помощью МКЭ состоит из нескольких этапов:

- 1) построение функционала;
- 2) расчленение системы на конечные элементы и выбор координатных функций;
- 3) построение матриц жесткости и приведение местной нагрузки к узловой;
- 4) построение системы алгебраических уравнений;
- 5) решение системы алгебраических уравнений;
- 6) расчет любой другой функции, зависящей от узловых неизвестных.

Одна из замечательных особенностей метода конечных элементов заключается в том, что он легко программируется для быстродействующих машин.

Автором созданы программы для решения стационарного уравнения теплопроводности с граничными условиями Дирихле и Неймана; линейной задачи о плоской деформации и плоском напряженном состоянии на языке Фортран 77. Программы ориентированы на эффективное решение задач малых и средних размеров с различной аппроксимацией пробной функции (линейной, квадратичной и кубической). При разработке алгоритмов основное

внимание уделялось созданию простой, гибкой системы, которую легко приспособить к любым конкретным условиям.

Основными вопросами реализации метода конечных элементов на ЭВМ являются построение расчетной сетки, вычисление матрицы жесткости системы, составление и решение системы алгебраических уравнений, определение градиентов искомой функции.

Для двумерных объектов назначение узлов подобно нанесению расчетной сетки в методе конечных разностей. Здесь приходится искать приемлемый компромисс между нужной точностью расчета и возможностями решения системы линейных уравнений. Часто положение осложняется высоким градиентом разрешающей функции, что вызывает необходимость сгущать расчетную сетку. Построение расчетной сетки включает в себя элемент творчества, но в то же время регламентируется множеством условий (время счета, наличие элементов).

Нумерация узлов сетки определяет ширину ленты матрицы системы. Эффективность решения возрастает с уменьшением ширины ленты. Кроме того, требуемая память также может быть уменьшена при уменьшении ширины ленты. В работе использовался алгоритм Б. Айронса перевода верхней треугольной матрицы жесткости системы в одномерный массив. Это позволяет существенно сократить память и решать задачи с большими системами уравнений.

Решение алгебраической системы уравнений проводилось с помощью алгоритма К.Бафа и И.Уилсона. Алгоритм основан на вычислении элементов матрицы, записанной в одномерный массив, по столбцам. Эта процедура предпочтительнее простого метода исключения Гаусса, т.к. она более быстрая.

Глава 2. Математическая постановка и решение двумерных стационарных задач теплопроводности в сложных геологических условиях.

Особая важность данной главы заключается в разработке методики расчета геотермических аномалий в реальных сложно построенных геологических средах, что позволяет в значительной степени прояснить вопрос о происхождении и роли локальных и региональных неоднородностей теплового поля. Тщательный учет свойств среды, формы инородных включений, формы границы среды, граничных условий дает возможность выяснить *роль вещества и его свойств* в геотермике.

Детальное распределение тепловых потоков по глубине и латерали для задач прикладной геологии позволило определить интенсивность, закономерности распространения, затухание аномалий, вызванных контрастными включениями и локальными структурами.

На примере уступообразного контакта двух сред показано, что вариации теплового потока могут достигать 60% от регионального невозмущенного значения. Возмущения теплового поля распространяются на глубину и по латерали на расстояние в 4-5 раз превышающее высоту уступа.

Наличие перекрывающего низкотеплопроводного слоя, мощность которого равна высоте уступа, не влияет на закономерности в распределении температуры и теплового потока, но вызывает интенсивное затухание по глубине. Максимальные вариации потоков наблюдаются под перекрывающим слоем в верхней половине уступа.

Переменный тепловой поток (большие значения q заданы на нижней границе модели под уступом) также не меняет характер распределения аномалий теплового поля, вызывая лишь увеличение

амплитуды возмущений. При отношении потоков $q_1/q_2=1.6$ и высоте уступа равной мощности перекрывающего слоя, коэффициент теплопроводности которых относится к коэффициенту теплопроводности остальной части среды как 1:2.5, ширина аномалии составляет 100 км.

Прогибы также оказывают существенное влияние на перераспределение тепловых потоков. Так, при отношении глубины прогиба к его ширине 1:3 и коэффициентов теплопроводности в прогибе и за его пределами 1:2 искажения теплового потока составляют 27%. Чем меньше ширина прогиба, тем интенсивнее отрицательная аномалия в его центральной части. Тепловые потоки здесь на 25% меньше невозмущенных региональных потоков. По мере увеличения ширины грабена (отношение глубины к ширине равно 1:7) аномалия достигает 35%, а в центре прогиба потоки уменьшаются на 12%.

Присутствие радиогенных источников тепла оказывает заметное влияние на величину теплового потока. Так при отношении глубины прогиба к его ширине 2:1 и теплогенерации слагающих прогиб пород к теплогенерации пород за его вертикальными границами 2:1 (теплопроводность всей среды однородна) аномалия в центральной части прогиба достигает 7% относительно фонового значения теплового потока. При увеличении горизонтальных размеров грабена (отношение глубины к ширине равно 1:2) и прежнем соотношении теплогенераций аномалия увеличивается до 19%. Ширина аномалии в несколько раз превышает глубину прогиба.

Однако присутствие блоков с различной теплопроводностью вызывает более значительные искажения теплового поля по сравнению с радиогенными источниками тепла. При предыдущих соотношениях размеров прогиба (2:1) и вместо коэффициентов

теплогенерации коэффициентов теплопроводности (2:1) возмущения теплового потока составляют 57%.

Вторая часть главы посвящена расчету геотермических аномалий по реальным сейсмическим профилям. Очевидно, что для получения достоверной картины распределения теплового потока и температуры необходимо рассмотреть относительное влияние геодинамической обстановки и тектонических процессов, состава и строения земной коры.

В настоящее время появился новый способ теоретического исследования сложных тепловых процессов - это вычислительный эксперимент, т.е. анализ теплового поля и его неоднородностей средствами вычислительной математики.

Разработанная на основе метода конечных элементов методика численного моделирования позволяет решать широкий круг практических задач геотермики: 1) оценивать влияние на тепловое поле теплофизических неоднородностей произвольной формы и размеров; 2) учитывать неравномерное по глубине и латерали распределение источников тепла; 3) рассчитывать температуры и тепловые потоки в неоднородной земной коре; 4) методом подбора решать обратные задачи геотермики.

Реализация разработанных программ расчета температур и тепловых потоков иллюстрируется на конкретных структурах в Днепровско-Донецкой впадине и Карпатском регионе. Проверка правильности выбора геотермической модели осуществляется сравнением вычисленного теплового потока на поверхности модели с наблюдаемым поверхностным тепловым потоком, а также сопоставлением расчетных температур с температурами, измеренными в глубоких скважинах. Обе задачи решались с использованием линейного функционала. В областях контакта сред с различными

теплофизическими свойствами проводилось регулярное измельчение сетки.

Геотермическая модель Днепровско-Донецкой впадины рассчитана по профилю Михайловка-Ахтырка, который пересекает впадину в ее центральной части. В качестве граничных условий приняты: отсутствие теплового потока на боковых границах на достаточном удалении от рифта, постоянная температура (9°C) на верхней границе и тепловой поток на нижней границе. В качестве первого приближения на нижней границе был задан постоянный тепловой поток 40 мВт/м^2 . Оказалось, что именно при таком условии наилучшим образом удалось согласовать рассчитанные для верхней части разреза и наблюдаемые тепловые потоки. Расхождения не превышают точности определения теплового потока. Они могут быть связаны с движением вод, точностью наблюдений, условиями осреднения тепловых потоков по скважинам и др. Более высокие наблюдаемые тепловые потоки в северо-западной части профиля, по-видимому, обусловлены наличием соленосных отложений в прибортовой зоне.

Неоднородности земной коры являются причиной не только колебаний теплового потока по площади, но и по глубине. На борту рифта над выступами соленосных отложений тепловой поток с глубиной уменьшается, а в прибортовой зоне рифта тепловой поток увеличивается. Подобная закономерность наблюдается и в центральной наиболее опущенной части рифта.

Анализ термического режима Карпатского региона базируется на геологических и геотермических данных в районе профиля ГСЗ Берегово-Долина (геотраверс II), который пересекает главные тектонические зоны Карпат - Закарпатский прогиб, Внешние (Флишевые) Карпаты и Предкарпатский прогиб.

При построении модели распределения температур и тепловых потоков принята слоистая модель земной коры. Граничные условия Дирихле на верхней поверхности модели приняты следующими: для Закарпатского прогиба $T=12^{\circ}\text{C}$, для Внешних Карпат $T=6^{\circ}\text{C}$ и в области Предкарпатского прогиба $T=9^{\circ}\text{C}$. В результате численного эксперимента определены значения мантийной составляющей теплового потока для разных тектонических зон, а именно $q=70$ мВт/м² (Закарпатский прогиб), $q=30$ мВт/м² (Внешние Карпаты), $q=15$ мВт/м² (Предкарпатский прогиб).

Поверхностный тепловой поток хорошо согласуется с наблюдаемыми данными. Расхождения не превышают точности определения теплового потока. Скачкообразные изменения потока вызваны поверхностными контактными зонами и разностью величин мантийного теплового потока. Более высокие наблюдаемые потоки в Закарпатском прогибе обусловлены, вероятно, вулканической деятельностью и особенностями теплопередачи внутри литосферы.

Глава 3. Термоупругие напряжения в неоднородных упругих средах.

Метод конечных элементов был создан для решения сложных уравнений упругости и строительной механики и оказался гораздо эффективнее метода конечных разностей [О.Зенкевич, 1975].

Расчет термоупругих напряжений с помощью МКЭ имеет следующие преимущества над классическими подходами.

1) Перемещения и деформации могут быть получены в любой точке внутри литосферы. Так, при использовании МКЭ не вызывает затруднения определение литосферного утолщения - важного геофизического параметра.

2) Возможно применение более реальной тепловой нагрузки, которая легко определяется для каждого элемента.

3) Точно определяется положение нейтральной плоскости.

При решении задач термоупругости оценка теплового режима упругой среды является промежуточным этапом. Данные о распределении температур в регионе являются исходной информацией для расчета термоупругих напряжений и деформаций. Если для задачи теплопроводности и термоупругости использовать совместные конечно-элементные модели, то можно получить достаточно работоспособный и рациональный приближенный метод решения задач термоупругости.

Целью настоящей главы является количественное описание режима термоупругих напряжений в земной коре на основе МКЭ.

Напряженное состояние в любой точке внутри литосферы является результатом действия напряжений различного происхождения.

Литосфера является относительно прочной внешней оболочкой Земли, которая сохраняет жесткость в течение значительных промежутков времени (вплоть до 10^9 лет) [Д.Теркот, Дж.Шуберт, 1985]. Свойство жесткости позволяет плитам в геологических интервалах времени накапливать и передавать упругие напряжения.

Системы напряжений, действующих в литосфере, могут быть удобно разделены на две главные категории: *возобновляемые* и *невозобновляемые* [М.Н.Вотт, N.I.Kusznir, 1984].

Напряжения возобновляемого типа являются результатом непрерывного действия (или вторичного приложения) поверхностных и массовых сил.

Гравитационные массовые силы, нагружение литосферы поверхностной топографией, вариации мощности земной коры, изгиб

литосферы являются механизмами возобновляемого типа напряжений [М.Н.Ботт, N.I.Kusznir, 1984].

К напряжениям невозобновляемого типа относятся мембранные и тепловые напряжения [М.Н.Ботт, N.I.Kusznir, 1984].

Наиболее заметный импульс развитию исследования тепловых напряжений дали работы Д.Теркота. Простые модели одноосных тепловых напряжений в остывающей океанической литосфере Д.Теркота открыли новый путь к исследованию феномена внутриплитовой тектоники, заключающегося в существовании тектонической активности далеко от границ плит.

Приложение термической и термо-механической моделей океанической литосферы к континентальной невозможно (S.D.Willett et. al., 1985). Отмечаемая в океанической литосфере корреляция между тепловым потоком и возрастом структур и между мощностью упруго-вязкого слоя и характерными температурами на континентах имеет более сложный характер.

Существует ряд термо-механических моделей для описания наблюдаемых флексур континентальной литосферы, механизма рифтообразования (S.D.Willett et. al., 1985; W.F.Naxby et. al., 1976; N.H.Sleep, 1971; M.H.P.Bott, 1981).

Для построения комплексной модели, описывающей напряженно-деформированное состояние какого-либо конкретного региона необходим эффективный численный метод, который позволит учесть существующие в исследуемой области силы как по отдельности, так и в их совокупном действии в различные геологические эпохи. Такому сложному требованию современной геодинамики ответит метод конечных элементов.

МКЭ, обходя громоздкие математические формулировки, дает возможность учесть реальные нагрузки, действующие в любой точке

исследуемой среды, наличие ослабленных областей, трещин, а также учесть реальную геометрию среды.

В настоящей работе рассмотрены деформации и напряжения, генерируемые неоднородным нагреванием среды, а также различным коэффициентом теплового расширения в отсутствие изгиба.

На теоретических моделях проведено исследование распределения термоупругих напряжений и перемещений. Это необходимо для оценки чисто термоупругого вклада в напряженное состояние литосферы.

Из теории термоупругости известно, что состояние тела считается недеформированным при отсутствии внешних сил и при некоторой заданной температуре T_0 . При $T \neq T_0$ даже в отсутствие внешних сил тело будет деформировано из-за наличия теплового расширения [Л.Д.Ландау, 1987]. В геофизике определить температуру недеформированного состояния довольно сложно, а порой бывает невозможно. Поэтому во всех теоретических моделях, а также при расчетах для реальных сред принимается следующее предположение: деформации, вызванные однородным нагреванием однородной среды считаются пренебрежимо малыми и температура T_0 в каждом узле сетки рассчитывается при однородном тепловом потоке.

Возмущения теплового поля, возникающие в области уступообразного контакта двух сред (теплопроводность в уступе равна $k_1=1.4$ Вт/(м·К), а в остальной части среды $k_2=3.5$ Вт/(м·К)) при однородном нагревании ($q=50$ мВт/м²) и коэффициенте линейного расширения $\alpha=10^{-5}$ °C⁻¹, вызывают термоупругие напряжения, величина которых достигает 90 бар. Максимум вертикальных перемещений находится в пределах 14-15 м, а горизонтальных - 6-7 м.

При уменьшении α в 2 раза в низкотеплопроводном блоке закономерности распределения термоупругих напряжений и смещений не изменяются. Хотя значения напряжений и перемещений незначительно меньше.

При неоднородном разогреве однородной среды ($q_1=80$ мВт/м² и $q_2=50$ мВт/м², $\alpha=10^{-5}$ °С⁻¹, $k=3.5$ Вт/(м·К)) максимальные значения термоупругих напряжений находятся в пределах 100-150 бар, а вертикальных смещений - 14-15 м и горизонтальных - 5-7 м.

Результаты, которые получаются при неоднородном нагревании уступа, являются суммарным эффектом влияния однородного нагревания уступа и влияния неравномерного нагревания однородной среды.

Наличие перекрывающего низкотеплопроводного слоя, мощность которого равна высоте уступа, в модели неоднородного нагревания уступа не влияет на закономерности в распределении напряжений и перемещений, но значительно увеличивает их амплитуду. Так, величина максимальных термоупругих напряжений достигает 500 бар, а вертикальных перемещений - 70 м и горизонтальных - 30 м.

У всех рассмотренных моделей жестко закреплена нижняя граница. "Закрепление" моделей влияет только на распределение перемещений.

Исследуемая геологическая среда не всегда имеет строго прямоугольную форму. Ее геометрия может быть различной. На примере среды уступообразной формы показано, что увеличение ширины уступообразного выреза приводит к увеличению смещений.

Заключительная часть главы посвящена расчету термоупругих напряжений и перемещений в Карпатском регионе.

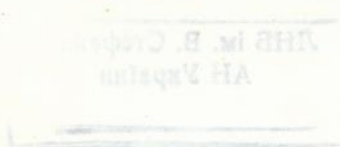
Геотермические измерения, проведенные в Карпатском регионе, показали, что тепловое поле неоднородно не только по вертикали, но и по латерали. В геотермической активности Карпатского региона выделены два этапа. Первый этап связан с событиями конца палеозоя или начала мезозоя. Региональная аномалия относительно слабой интенсивности увязывается с источником тепла, который сформировался в верхней мантии примерно 160-180 млн. лет назад. Следующий этап активизации проходил около 25-30 млн. лет назад и был обусловлен подъемом астеносферы. С этим этапом связаны аномалии высоких тепловых потоков Закарпатского прогиба и Паннонии [Р.И.Кутас, 1993].

С учетом истории теплового и геологического развития исследуемого региона сформировано первое приближение модели расчета термоупругих эффектов: для определения значения T_0 принимается отсутствие дополнительных мантийных источников тепла под Карпатами и Закарпатским прогибом и предполагается однородное нагревание исследуемого региона.

Иными словами, температура T_0 для каждого узла сетки рассчитывалась при мантийном тепловом потоке $q=25$ мВт/м² в Закарпатском прогибе и $q=15$ мВт/м² в Карпатах.

Второе приближение термоупругой модели Карпатского региона заключается в следующем: среда считается проводником термоупругих напряжений до глубины залегания 500°С изотермы. Именно с таких позиций выбрана нижняя граница модели.

В области перехода от Закарпатского прогиба к Карпатам на глубинах от 15 км до 30 км температура достигает 800°С. Хотя эта зона включена в модель, возникающие в ней термоупругие напряжения, вероятно, должны высвободиться пластично.



Важным моментом в построении модели тепловых напряжений является задание известных перемещений в качестве граничных условий. Выбор известных перемещений зависит от конкретной геодинамической обстановки.

В сложнопостроенных геологических средах, таких как Карпатский регион, "закрепление" модели несколько затруднительно. В таких ситуациях на помощь приходит вычислительный эксперимент. Модель рассчитывалась для трех вариантов "закрепления".

Максимальные значения σ_{yy} (1.5-2 кбар) находятся в области Закарпатского прогиба и Складчатых Карпат. Восточно-Европейская платформа характеризуется низкими значениями напряжений - 0-240 бар. σ_{yy} являются растягивающими напряжениями. Таким образом, неоднородное нагревание и различный коэффициент линейного расширения горных пород Карпатского региона способны генерировать большие термоупругие напряжения, которые могут способствовать сейсмической активности и играть важную роль в тектонике растяжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе на основе численного моделирования с помощью метода конечных элементов предложена методика расчета геотермических аномалий и термоупругих напряжений в сложнопостроенных геологических средах с произвольными граничными условиями.

На модельных примерах показано, что в отличие от других приближенных методов, в которых приходится прибегать к идеализации свойств среды и схематизации геометрических форм геологических объектов, МКЭ с присущей ему логичностью и

эффективности применения позволяет значительно приблизить расчетную схему к реальному объекту.

Для улучшения точности вычислений температуры и теплового потока использовалась кубическая аппроксимация пробной функции. Однако введение базисных функций высших степеней требует увеличения времени счета и оперативной памяти. Поэтому выбор аппроксимации зависит от конкретной задачи и наилучшей будет та аппроксимация, которая дает максимальную точность решения при наименьших вычислительных затратах.

Разработанная на основе метода конечных элементов методика численного моделирования позволяет:

- 1) оценивать влияние на тепловое поле теплофизических неоднородностей произвольной формы и размеров;
- 2) рассчитывать температуры и тепловые потоки в неоднородной земной коре.

Из установленных при решении задач прикладной геологии закономерностей в распределении тепловых потоков и температур следует, что наличие контрастных включений и локальных структур может быть причиной существенных вариаций теплового потока как по латерали, так и по глубине. Связанные с контактными зонами аномалии достаточно интенсивны и занимают обширные территории.

Геотермическая модель Днепровско-Донецкой впадины рассчитывалась по профилю Михайловка-Ахтырка, который пересекает впадину в ее центральной части. Конечно-элементная сетка, построенная с использованием линейных треугольных элементов, максимально отражает особенности строения центральной части ДДВ. Результаты расчетов температур и тепловых потоков показывают, что неоднородности земной коры являются причиной колебаний теплового потока не только по площади, но и по глубине.

Построение геотермической модели Карпатского региона проводилось по конкретному сейсмическому профилю с использованием линейного функционала. Скачкообразные изменения потока вызвано поверхностными контактными зонами и разностью величин мантийного теплового потока. Анализ региональных особенностей теплового поля Карпатского региона показывает существенное различие по величине теплового потока главных тектонических этапов, что является подтверждением их разной природы и возраста земной коры.

Проверка правильности выбора геотермической модели для ДДВ и Карпатского региона осуществлялась сравнением вычисленного теплового потока на поверхности модели с наблюдаемым поверхностным тепловым потоком, а также сопоставлением расчетных температур с температурами, измеренными в глубоких скважинах.

Одновременный подбор параметров среды и граничных условий позволил хорошо согласовать рассчитанный тепловой поток в Днепровско-Донецкой впадине и Карпатах с наблюдаемыми данными. Расхождения не превышают точности определения теплового потока.

Аномалии теплового поля, вызванные неравномерным нагреванием неоднородной среды являются причиной возникновения термоупругих напряжений и перемещений.

На модельных примерах показано, что неравномерный разогрев геологической среды способен вызвать значительные тепловые напряжения. Хотя возникающие при этом деформации невелики. Задание известных перемещений в качестве граничных условий для различных сред влияет на смещения в x - и y -направлениях. Геометрия упругой среды также может вызвать

существенные перераспределения в вертикальных и горизонтальных смещениях.

Оценка чисто термоупругого вклада в напряженное состояние земной коры Карпатского региона показывает, что величины тепловых напряжений достигают предела прочности пород 1.5 кбар. Хотя величины максимальных смещений незначительны: 200-300 м в вертикальном направлении и 70-80 м в горизонтальном.

Таким образом, в результате исследования теплового режима и связанного с ним термоупругого состояния неоднородной геологической среды с произвольными граничными условиями на основе численного моделирования с помощью МКЭ получено представление о роли локальных инородных включений в земной коре.

Защищаемые положения.

Автор защищает:

- разработанные алгоритмы и программы для численного решения на основе метода конечных элементов уравнения Пуассона с граничными условиями Дирихле и Неймана, линейной задачи о плоской деформации и о плоском напряженном состоянии.
- методику получения детального распределения теплового потока по глубине и латерали для неоднородных сред различного очертания с произвольными граничными условиями.
- двумерные геотермические модели Днепровско-Донецкой впадины и Карпатского региона.
- методику определения режима термоупругих напряжений для сложно построенной геологической упругой среды с произвольными граничными условиями.
- термоупругую модель Карпатского региона.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.

1. Бахова Н.И. Тепловые неоднородности и напряженное состояние океанической литосферы / Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. - Москва: Наука, 1993. - с. 86-92.

2. Кутас Р.И., Бахова Н.И. Исследование вариаций теплового потока в зонах с контрастной теплопроводностью (конечно-элементная модель) // Доп. НАН України. - 1995. - №4. - С. 75-77.

3. Бахова Н.И. Тепловой поток и термоупругие напряжения в Карпатском регионе. - Киев. - Деп. в ГНТБ Украины. - 1995. - N2226-Ук.95. - 18 с.

Бахова Н.І. Теплові аномалії та термопружні напруження в складно побудованих геологічних середовищах (за результатами чисельного моделювання на основі методу кінцевих елементів).

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізикоматематичних наук по спеціальності 01.04.12. - геофізика. Інститут геофізики ім. С.І.Субботіна НАН України, Київ, 1995.

Захищаються три наукові праці в яких аналізуються геотермічні аномалії і термопружні напруження на основі чисельного моделювання за допомогою кінцевих елементів. Показано, що наявність блоків з контрастною теплопровідністю може спричинити значні варіації теплового потоку як по латералі, так і по глибині. Зміна температури є джерелом теплових напружень. Збільшення або зменшення температури обумовлює розширення або стиснення породи і появу значних напружень. Побудовані чисельні моделі, на основі яких розраховані температури, теплові потоки та термопружні напруження в Карпатському регіоні. Розрахунки показують, що напруження, які при цьому виникають, є напруженнями розтягання. Аналізуються зяйки геодинамічні наслідки термопружних напружень,

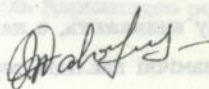
зокрема: а) прогин земної кори в епіцентральної частині джерела тепла; б) утворення розтягуючих напружень в області геотермічних аномалій, які можуть проявлятися у вигляді підвищеної сейсмічності у верхніх шарах земної кори в межах цих областей.

Ключеві слова: температура, тепловий потік, термопружні напруження, кінцеві елементи, модель, алгоритм, апроксимація.

Bahova N.I. Thermal anomalies and thermoelastic stress in complicated geologic media (according to the results of numerical modeling based on finite elements method).

Thesis for a degree of Master of Physics and Mathematics with speciality 01.04.12. - Geophysics. S.I.Subbotin Institute of Geophysics of National Academy of Sciences of the Ukraine, Kiev, 1995.

Three scientific theses are maintained which analyze geothermal anomalies and thermoelastic stress on the basis of numerical modeling made by finite elements method. It is shown that blocks with contrasting thermal conductivity may cause significant thermal flow variations both laterally and at depths. Temperature variations are a source of thermal stress. Temperature increase and decrease extend and compress the rocks causing high stress. Numerous modeling have been set up which enable temperature, heat flow and thermoelastic stress calculation for the Carpathian region. On the basis of the calculations it is shown that the stress produced is tensile stress. Analyzed are some geodynamic consequences of thermoelastic stress namely: а) an earth's crust depression in the epicentral part of the heat source; б) appearance of tensile stress in the areas of thermal anomalies which may be manifested in high seismicity of the upper crustal layers in these areas.



Подп. к печ. 10.11.85.

Формат 60×84^{1/8}.

Бумага тип. № 2. Способ печати офсетный. Услови. печ. л. 2,33.

Услови. кр.-отт. 1,62. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 220. Зак. № 5-4731.

Фирма «ВИПОЛ»

252151, г. Киев, ул. Волюнская, 60.

444353

A B

32130
AB 33.408