

Федеральное агентство по образованию Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального
образования
«Южно-Уральский государственный университет»
Факультет «Аэрокосмический»
Кафедра «Техническая механика»

РАБОТА (ПРОЕКТ) ПРОВЕРЕНА

Резидент, (должность)

_____ (И.О.Ф.)

_____ 2020 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой

_____ (П.А.Тараненко)

_____ 2020 г.

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ПОЛЕЙ ТЕМПЕРАТУР И
НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ПОДЗЕМНОГО ХРАНИЛИЩА
РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

К ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИЦИРОВАННОЙ РАБОТЕ(ПРОЕКТУ)

ЮУрГУ-150303.2020.006.00 ПЗ ВКР (ПЗ ВКП)

Консультант (должность)

_____ И.О.Ф.

_____ 2020 г.

Руководитель проекта (должность)

д.т.н., профессор

_____ А.О.Чернявский

_____ 2020 г.

Автор проекта

студент группы П-429

_____ А.А.Чагина

_____ 2020 г.

_____ 2020 г.

_____ 2020 г.

Нормоконтролер (должность)

к.т.н., доцент

_____ А.С.Теребов

_____ 2020 г.

Челябинск 2020

АННОТАЦИЯ

Чагина А.А. Разработка методики расчета полей температур и напряжений в окрестности подземного хранилища радиоактивных отходов. – Челябинск: ЮУрГУ, П–429, 34 с., 11 ил., 2 табл., библиогр. список – 7 наим., 2 прил..

Дипломный проект выполнен с целью разработки методики численного анализа температур и напряжений в горном массиве и инженерных барьерах пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, обладающей приемлемой трудоемкостью и точностью.

В дипломном проекте была изучена технология решения нестационарной тепловой задачи с использованием метода SUBMODELING.

Выполнена оценка точности результатов и требования к моделям, обеспечивающие получение заданной точности, достижимый выигрыш во времени расчетов при использовании рассматриваемой технологии.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1.АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР: ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (ПГЗРО) И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ.....	8
2.ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕМЕНЕНИЯ МЕТОДА SUBMODELING ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ.....	14
3. ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И СКОРОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ.....	21
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	24
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	25

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема утилизации отходов является одной из важных, поскольку ежегодно в мире вырабатывается огромное количество мусора, который несет вред окружающей среде. Значительную опасность представляют радиоактивные отходы. Большинство из них невозможно уничтожить и даже сложно перемещать. Поэтому проблема разработки методик расчета теплового и напряженного состояния в окрестности подземного хранилища радиоактивных отходов является актуальной.

В выпускной квалифицированной работе решается задача разработки методики численного анализа температур и напряжений в горном массиве и инженерных барьерах пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, обладающей приемлемой трудоемкостью и точностью

Объект работы: технология решения нестационарной тепловой задачи с использованием метода SUBMODELING.

Результаты: была изучена технология применения метода SUBMODELING, а также выполнена оценка точности и скорости вычисления.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР: ПРОБЛЕМА СОЗДАНИЯ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ (ПГЗРО) И СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПОДХОДЫ К ИХ РЕШЕНИЮ

1.1 Рассматриваемая схема пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО).

Основной целью пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов является окончательный вывод из сферы жизнедеятельности ранее накопленных в РФ наиболее экологически опасных долгоживущих высокоактивных и среднеактивных отходов, находящихся в наземных временных хранилищах.

Согласно плану ПГЗРО будет находиться в массиве гранитных пород, глубиной 525 метров. Остеклованные радиоактивные отходы 1 класса будут размещены в вертикальных скважинах диаметром 1,3 м, глубиной 75 м между двумя горизонтами (плюс 5 м и минус 70 м в балтийской системе отсчета), а долгоживущие радиоактивные 2 класса опасности – в камерах захоронения.

При размещении РАО в пунктах глубинного захоронения функцию удержания выполняют инженерные барьеры безопасности, минимизирующие выход радионуклидов за пределы объекта, а функцию изоляции — природные (естественные) барьеры, ограничивающие воздействие отходов на человека и биосферу. Природные барьеры представляют собой горные породы, как правило, трех основных типов: кристаллические, соляные и глинисто-обломочные. В российском проекте тип пород — кристаллический, состоящий из гранитов, гнейсов и диоритов. Инженерные барьеры включают в себя консервирующую матрицу, стальные оболочки, слои бетона, бентонита и других материалов.[]

Пункт захоронения будет разделен на два участка, на первом из которых будут размещаться отходы, накопленные до 2010 года, имеющее начальное тепловыделение порядка 1 кВт/м³, на втором - накопленные после 2010 года с начальным тепловыделением около (1,5 – 2) кВт/м³ [1].

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

Высоко активные отходы (ВАО) размещаются в металлических пеналах, по 3 бидона. Объем ВАО в пенале 0,6 м³ (диаметр стекломатрицы 0,6 м), масса 1500 кг, (бидон вмещает примерно 0,2 м³ остеклованной массы весом 500 кг). Пространство между изолирующим контейнером (диаметр ИК – 1,2 м) и стенкой скважины заполняется тиксотропным шликером или бентонитом.

Температура окружающей породы на глубине 400 м – 500 м составляет 5°С – 10°С. Среднегодовая температура вблизи поверхности земли – около 0°С. [1]

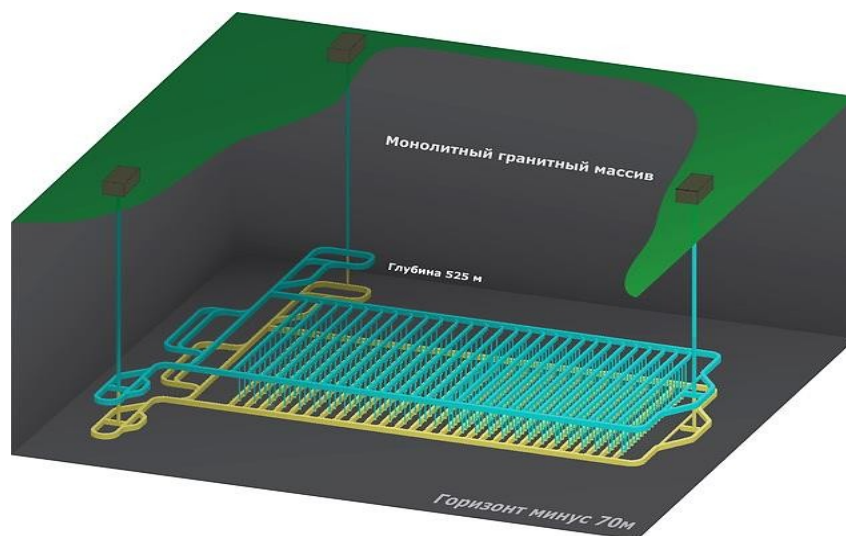


Рисунок 1.1. – Схема захоронения радиоактивных отходов

Создание пункта глубинного захоронения позволит прекратить накопление радиоактивных отходов 1 и 2 классов опасности в организациях Росатома и поможет разгрузить временные хранилища РАО.

1.2 Нагрузки на элементы конструкции и условия прочности.

По определению под «конструкцией» понимается любое тело с неоднородным напряженным состоянием. Поэтому массив горных пород и инженерные барьеры также являются конструкцией. Знание напряженного состояния по пункту глубинного захоронения является важным моментом для обеспечения безопасности конструкции на длительный период времени и более достоверного моделирования эволюции ПГЗРО.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

Необходимость теплового расчета связана с тем, что температура оказывает значительное влияние на механическую прочность, коррозионную стойкость и другие физические и химические свойства барьеров. Основным источником тепла является тепловыделение от распада остеклованных РАО 1 класса опасности (продукты деления, актиноиды, гамма – нейтронное излучение), располагаемых в скважинах захоронения. Моделируемый источник тепла имеет удельную эквивалентную мощность тепловыделения, уменьшающуюся по экспоненциальному закону $q = q_0 \cdot \exp(-Bt)$.

1.3. Применяемые методы расчета.

На данный момент существует несколько подходов для решения задач о нестационарной теплопроводности. Одним из таких является использование аналитического решения. В качестве моделей тепловых источников РАО были взяты тела простой геометрической формы, упрощенных до состояния, допускающего аналитического решения. Существует единый алгоритм решения одномерных нестационарных задач теплопроводности в телах простой геометрической формы с внутренними источниками теплоты различной природы. Решение подобной задачи, основанное на использовании метода конечных интегральных преобразований, представленного в виде ряда с улучшенной сходимостью.[2]

Аналитическое решение дает точный результат, однако данный метод применим только для моделей с простой геометрической формой.

Аналитическое решение имеет достаточно общий вида, позволяющий учитывать:

- граничные условия вида «температура на поверхности есть произвольная заданная функция времени» или «тепловой поток через

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

поверхность есть произвольная заданная функция времени» (на наружной и внутренней поверхностях допускаются условия разного вида);

- любое (центральносимметричное) начальное распределение температуры;
- любое распределение объемного тепловыделения по радиусу.

Решение задач, учитывающих сложную геометрию возможно только численными методами, на данный момент самым используемым является метод конечных элементов (МКЭ). В основе данного метода лежат две главные идеи: разделения исследуемого объекта на конечное множество элементов и кусочно-элементная аппроксимация исследуемых функций. Реализуют вычислительный процесс МКЭ с помощью пакета компьютерных программ (ANSYS, MSC.NASTRAN и др.), они имеют удобный интерфейс для ввода исходных данных, контроля процесса вычислений и обработки результатов расчёта. К основным достоинствам данного метода можно отнести:

- возможность исследовать объекты различных форм;
- можно решать как стационарные, так и нестационарные задачи;
- моделирование различных граничных условий;
- можно исследовать однородные и неоднородные, изотропные и анизотропные объекты с линейными и нелинейными свойствами;
- возможность решения контактных задач;

Одним из главных недостатков МКЭ является то, что сложно оценить точность и достоверность решения, поскольку этот метод не содержит средств, дающих гарантированную оценку ошибки.

В качестве характеристики сетки КЭ представляется удобным принять не абсолютный размер элемента (в метрах), а относительны перепад температуры по элементу

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

$$\delta T = \max_i \frac{T_{max_i} - T_{min_i}}{T_{max_i}},$$

где T_{max_i} и T_{min_i} – максимальная и минимальная температура в конечном элементе номер i ; максимум берется по всем конечным элементам модели.

Способом оценки погрешности в данном случае является сопоставление численного решения с аналитическим. Численные решения соответствуют имеющимся аналитическим решениям, что обеспечивает определенную уверенность в корректности численных процедур расчета теплового состояния ПГЗРО.[1]

Также недостатком является то, что инженерные барьеры и окружающий горный массив имеют размеры, различающиеся на порядки. В этих условиях применение «монокристаллической» модели, описывающей тепловые поля в рамках одного расчета, требует большого количества конечных элементов и времени расчета.

1.4. Задачи данной работы

Проведенный анализ показал, что оценка выполнения условий прочности для проектируемого ПГЗРО требует численных расчетов. Используемые сейчас расчеты для всей области в целом настолько трудоемки, что оказывается невозможным применение обычного метода оценки точности, заключающегося в выполнении последовательности расчетов с уменьшением размеров КЭ в каждом следующем расчете. В связи с этим в работе поставлена следующая цель:

разработать методику численного анализа температур и напряжений в горном массиве и инженерных барьерах пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, обладающую приемлемой трудоемкостью и точностью.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

Для достижения этой цели предполагается решить следующие задачи:

- разработать технологию решения нестационарной тепловой задачи с использованием метода SUBMODELING;
- оценить точность результатов и требования к моделям, обеспечивающие получение заданной точности;
- оценить достижимый выигрыш во времени расчетов при использовании рассматриваемой технологии.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

2.ТЕХНОЛОГИЯ ПРЕМЕНЕНИЯ МЕТОДА SUBMODELING ДЛЯ РЕШЕНИЯ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ

Подмоделирование (submodeling) – это важный приём в методе конечных элементов, который позволяет нам получить более точный результат в конкретной локальной зоне большой модели. Для больших и сложных моделей вычислительные и временные ограничения зачастую не дают использовать во всех локальных местах мелкую сетку, достаточную для достоверной оценки результатов. Подмодель представляет собой независимую модель локальной области основной модели, по которой построена более мелкая (в сравнении с основной моделью) сетка. Подмоделирование основано на принципе Сен-Венана, в котором постулируется, что различие в эффектах, вызываемых различными статически эквивалентными системами сил, становится несущественным по мере удаления от зоны приложения нагрузок. Следовательно, если границы подмодели находятся достаточно далеко от интересующей нас области, то подмодель позволяет получить для этой зоны точные результаты.

Основная идея данного метода заключается в том, что первоначальный расчет осуществляется на грубой сетке,

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

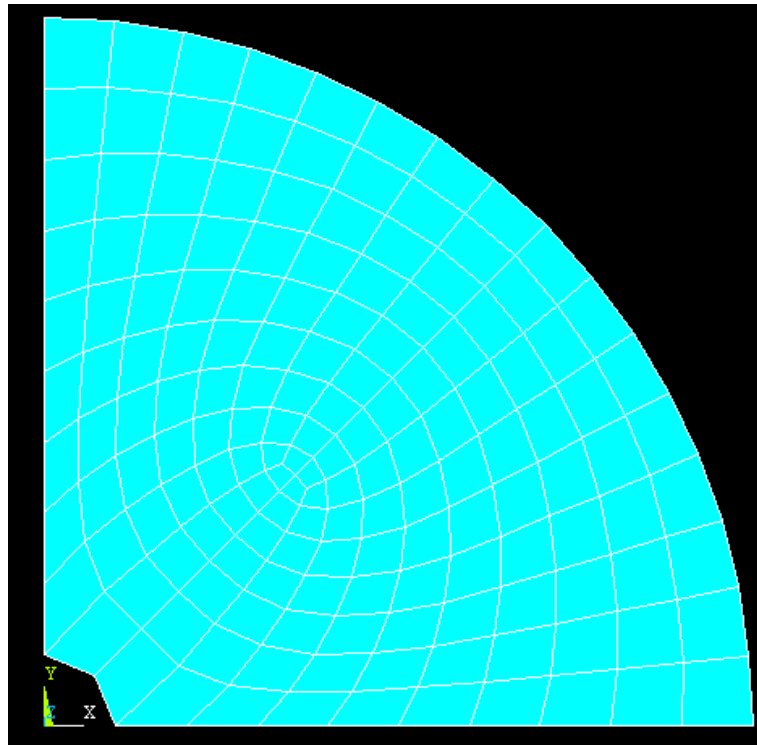


Рисунок 2.1. – Расчет на грубой сетке

далее выполняется расчет подмодели на мелкой сетке и определяются координаты граничных узлов.

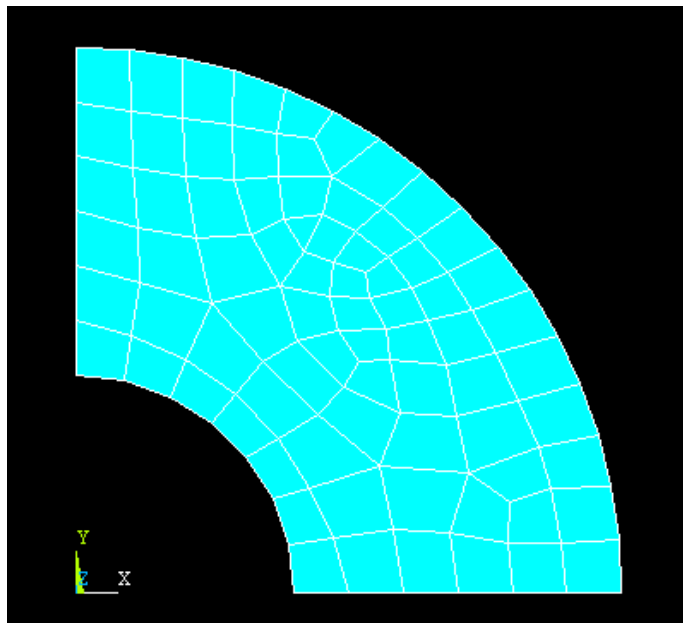


Рисунок 2.2. – Расчет на мелкой сетке

После этого осуществляется возврат к грубой модели и интерполяция граничных условий в точках, соответствующих граничным узлам подмодели –

для всех моментов времени расчета на грубой сетке, и запись результатов в файл. И далее возврат к подмодели, расчеты для того же ряда шагов по времени (при этом зависимость граничных температур от времени интерполируется кусочно-линейной функцией, которая строится по результатам для моментов времени расчета на грубой сетке). Для сравнения разбивка на конечные элементы для задачи решенной без использования метода SUBMODELING выглядит следующим образом:

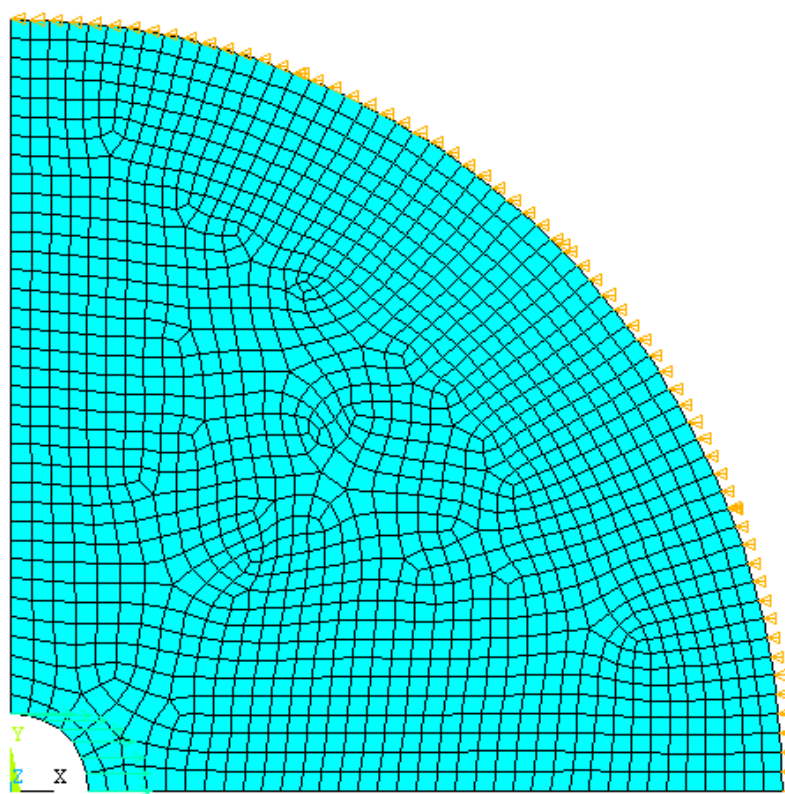


Рисунок 2.3. – Расчет без использования SUBMODELING

В данной работе мы рассмотрим задачу о шаре с полостью в центре. На поверхности полости задан переменный по времени тепловой поток, на наружной поверхности – температура. Тепловой поток на поверхности полости экспоненциально уменьшается с течением времени:

$$q = q_0 \cdot \exp(-Bt) \quad (1)$$

(q_0 и B – константы, t – время). Температура на внутренней поверхности (поверхности полости) при выбранных параметрах расчета в течение 1-го

года, максимальный рост температуры составляет 75°C , затем температура начинает снижаться. Поскольку граничные условия на внешней поверхности «подмодели» меняются по времени то они должны определяться на каждом шаге расчета.

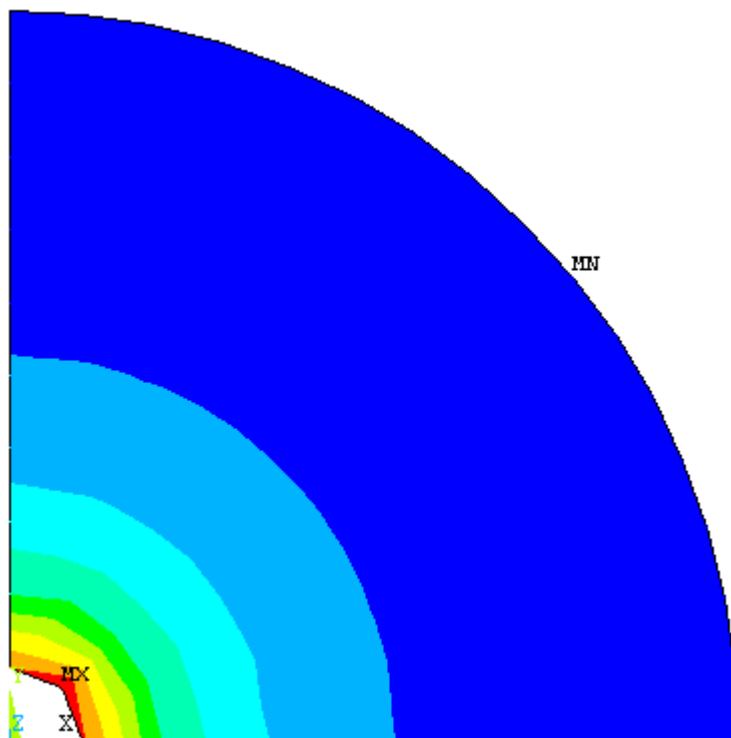


Рисунок 2.4. – Решение, полученное для грубой сетки

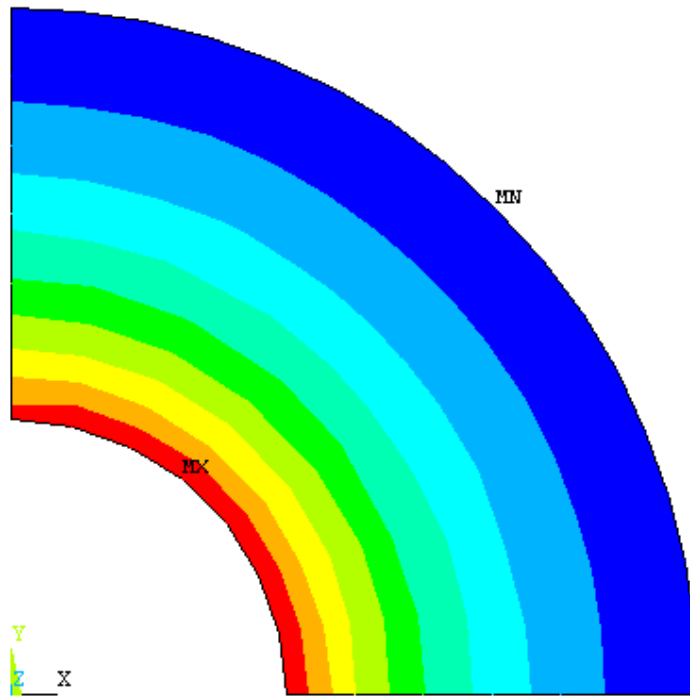


Рисунок 2.5. – Решение, полученное для подмодели

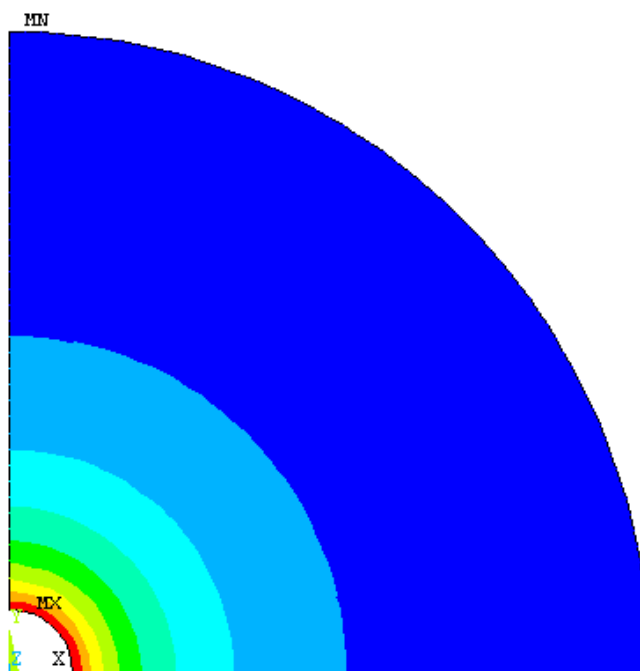


Рисунок 2.5. – Решение, полученное без использования метода
SUBMODELING

Возможно 2 подхода к оптимизации использования технологии SUBMODELING:

- на каждом шаге возвращаться к «грубой» модели и вычислять условия на границе «подмодели» для соответствующего момента времени;
- обратиться к «грубой» модели один раз и сгенерировать набор описаний граничных условий для разных моментов времени – а уж потом делать расчет для «подмодели» для всех моментов времени;

В данной работе продемонстрировано использование второго подхода. Поскольку этот подход существенно быстрее, потому что загрузка и выгрузка базы данных большой задачи требует заметного времени. Однако он требует интерполяции граничных условий для «подмодели» в промежуточные моменты времени и может (за счет этой интерполяции) приводить к снижению точности.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

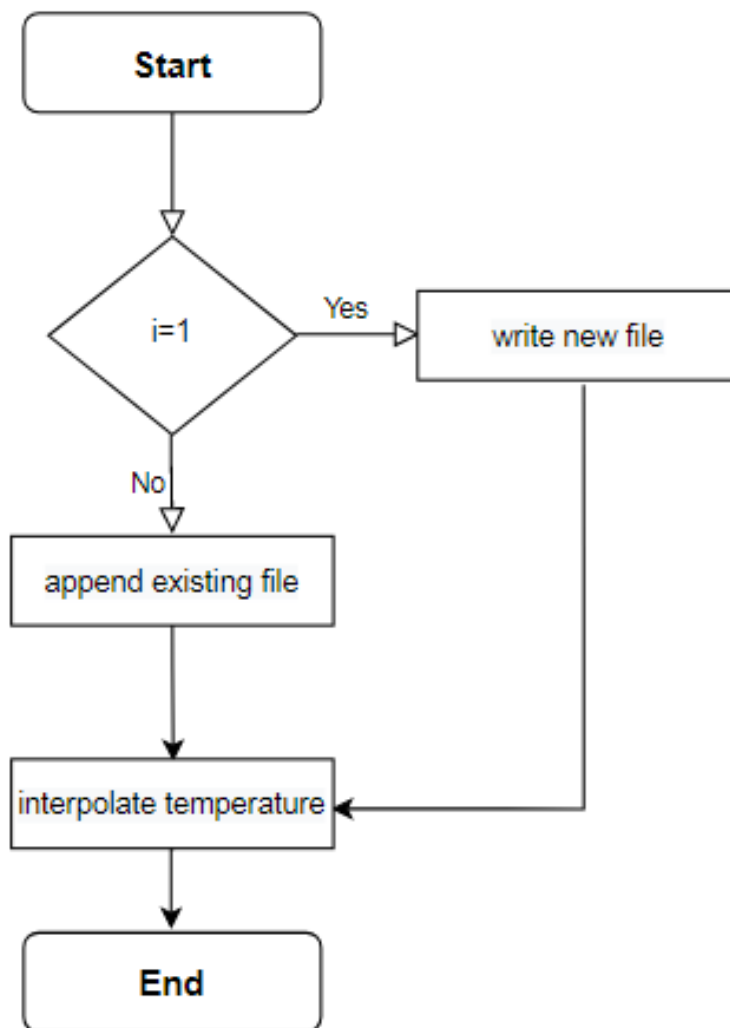


Рисунок 2.5. – Блок – схема интерполяции граничных условий

3. ОЦЕНКИ ТОЧНОСТИ И СКОРОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Оценка точности численных решений необходима для определения на основе полученных аналитических результатов сравнимых числовых (количественные) характеристики, выражающих качественную сторону самих измерений и условий их проведения. Помимо оценки возможной погрешности МКЭ сопоставление полученных результатов позволяет установить минимальные требования к сетке КЭ при наличии определенных требований к точности результатов моделирования.

Сопоставление с аналитическим решением и «монолитной» моделью обеспечивает оценку выигрыша по времени при приемлемой точности. Это позволит нам сделать выводы о целесообразности применения данного подхода в рассматриваемой задаче.

Параметр	«Монолитная» модель	Модель всей конструкции с грубой сеткой	Подмодель
Число элементов	1353	158	76
Число узлов	1425	177	94
Время счета	33 мин 24 с	1 мин 38 с	0 мин 25 с
Суммарно 2 мин 3 с.			

Таблица 3.1. – Оценка выигрыша по времени

Погрешности для задачи 4

Погрешности			
r R	el_fine/ el_coarse	T	T/T
3/20	0.3/2	0.099	0.133
3.5/20	0.35/2	0.165	0.219
4/20	0.4/2	0.024	0.032
5/20	0.5/2	-0.043	0.057
5/20	0.25/2	-0.108	0.144

Таблица 3.1. – Оценка погрешности

Как видно, из полученных результатов, при достаточно приемлемой точности время расчета уменьшилось примерно в 15 раз. С учетом того, что рассматриваемый пример является не самым сложным и в реальной задаче выигрыш возможен в разы больше, можно считать, что метод SUBMODELING целесообразно применять для решения подобных задач.

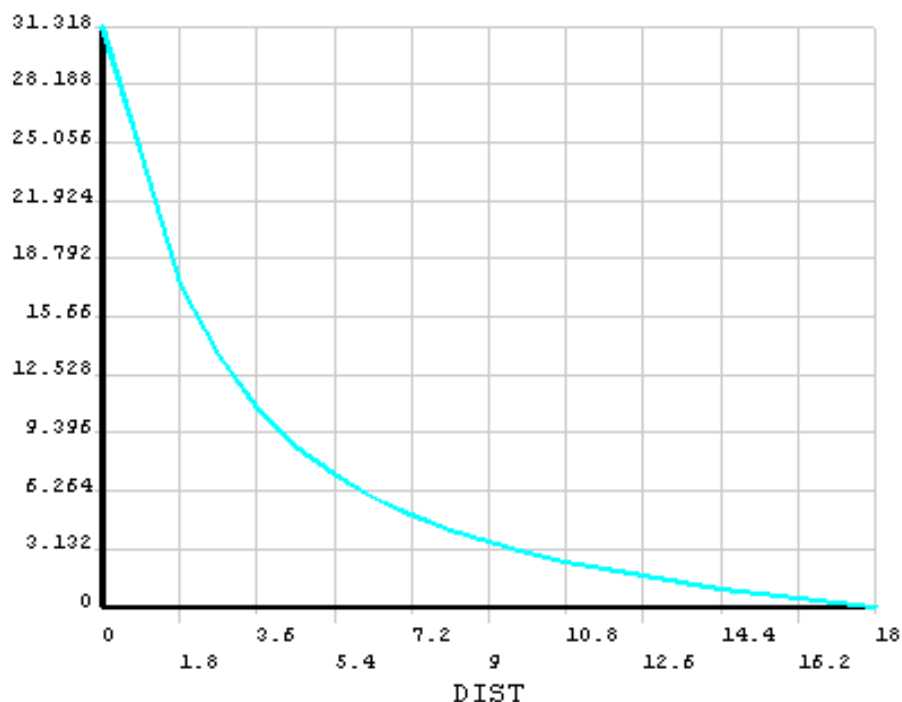


Рисунок 3.1. – График зависимости температуры от радиуса на грубой сетке

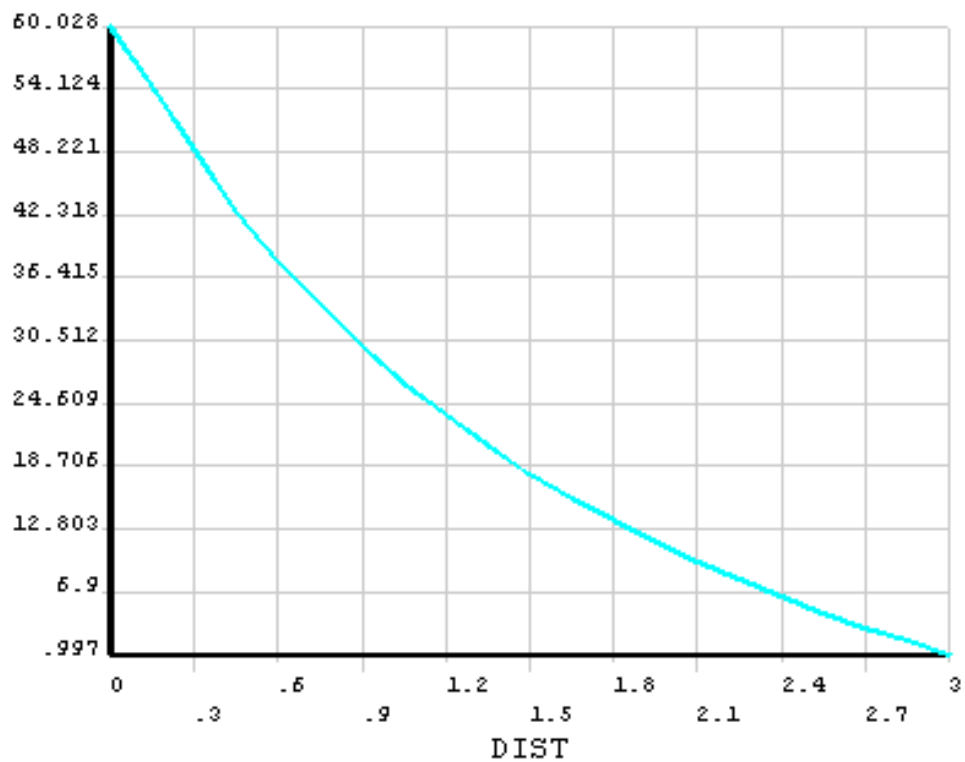


Рисунок 3.2. – График зависимости температуры от радиуса для подмодели

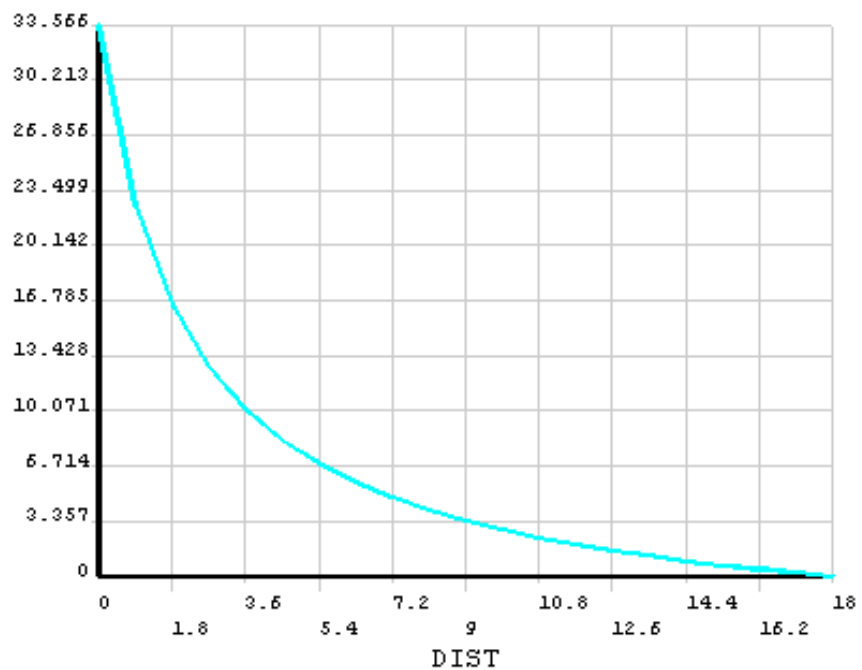


Рисунок 3.3. – График зависимости температуры от радиуса для модели

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы была разработана методика численного анализа температур и напряжений в горном массиве и инженерных барьерах пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов.

При приемлемой точности выигрыш по времени счета составляет примерно 15 раз – даже в этом, как было сказано, не самом ярком примере. В реальной задаче, тем более при использовании нескольких уровней вложенности, можно достичь существенно большего выигрыша (выигрыш достигается как за счет изменения размерности задачи, так и за счет изменения шага по времени – для больших элементов при нестационарном тепловом расчете в ANSYS шаг по времени больше, чем для мелких).

В настоящее время существуют значительные неопределенности исходных данных для создания уточненной расчетной модели ПГЗРО. Неопределенность исходных данных связана с неоднородностью геологических структур, так как теплофизические и прочностные свойства слагающих Нижнеканский массив пород, существенно различаются по объему выбранного захоронения. Для получения более точных оценок теплового и напряженного состояния ПГЗРО требуется уточнение входных данных для расчетов. В первую очередь это касается свойств материалов, геометрии геологических структур и принятых проектных решений по ПГЗРО.

Выполненная работа имеет практическую ценность и рекомендована для дальнейшего развития.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамов А.В., Бекетов А.П., Рыкованов Г.Н., Хрулев А.Н., Чернявский А.О., Аналитическое и численное моделирование теплового и напряженного состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов, Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2019 г., стр. 35

2. Н.И. Дробышевский, Е.В. Моисеенко, Р.А. Бутов, Ю.Н. Токарев (Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН), Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижнеканском массиве горных пород, Москва, журнал «Радиоактивные отходы», 2017 г., № 1, стр. 64-73.

3. К.В. Мартынов, Е.В. Захарова (Институт физической химии и электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН), Анализ локализации и сценария эволюции ПГЗРО на участке Енисейский (Красноярский край), Москва, журнал «Радиоактивные отходы», 2018 г., № 2 (3), стр. 52-62.

4. Елисеев В.Н., Товстоног В.А., Боровкова Т.В. Алгоритм решения обобщенной задачи нестационарной теплопроводности в телах простой геометрической формы – Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017 г., № 1, стр.112-128, DOI: 10.18698/0236-3941-2017-1-112-128.

5. Лыков А.В. Теория теплопроводности – М.: Высшая шк., 1967. – 600 с.

6. В.Н. Татаринов, В.Н. Морозов, А.И. Каган, В.А. Пятыгин (Геофизический центр РАН), Влияние температуры на изоляционные свойства породных массивов при захоронении радиоактивных отходов, Москва, Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал), 2015 г., № 8, стр. 338-344.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

7. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения, Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии, НП-093-14. Утверждены 15.12.2014, Москва, 2015 г, с 24.

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица А 1 – Оценка выигрыша по времени

Параметр	«Монолитная» модель	Модель всей конструкции грубой сеткой	Подмодель с
Число элементов	1353	158	76
Число узлов	1425	177	94
Время счета	33 мин 24 с	1 мин 38 с	0 мин 25 с
Суммарно 2 мин 3 с.			

Таблица А 2 – Оценка погрешности

Погрешности			
r R	el_fine/ el_coarse	T	T/T
3/20	0.3/2	0.099	0.133
3.5/20	0.35/2	0.165	0.219
4/20	0.4/2	0.024	0.032
5/20	0.5/2	-0.043	0.057
5/20	0.25/2	-0.108	0.144

ПРИЛОЖЕНИЕ В

V1 Решение на грубой сетке (lgw файл)

Lambda1=2.91 ! теплопроводность

Ro1=2700 ! плотность

C1=840 ! теплоемкость

Rout=20 ! наружный радиус

Rin=2.0 ! радиус полости

Tout=00.0 ! температура наружной поверхности

T0=0.0 ! начальная температура

Q1=145.5 ! тепловой поток

B1=3.208e-09 ! параметр скорости изменения потока

Tau1=10*(3600*24*365.25) ! время, до которого считаем

el_sz=Rout/10 ! размер КЭ

/PREP7

!*

ET,1,PLANE55

KEYOPT,1,3,1

!*

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,0

MPDATA,KXX,1,,Lambda1

MPDATA,C,1,,C1

MPDATA,DENS,1,,Ro1

CYL4, , ,Rin, ,Rout,90

mshkey,0

esize,el_sz

amesh,1

DL,1, ,TEMP,Tout,0

IC,all,TEMP,T0,

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

```

LSEL,S,,3
NSLL,S,1
*GET,N1,NODE,,COUNT
L1=(3.1415926536/2)*RIN/(N1-1) ! ИСТИННЫЙ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА НА
ПОВЕРХНОСТИ (ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ EL_SZ, ПОСКОЛЬКУ ЧИСЛО
ЭЛЕМЕНТОВ - ЦЕЛОЕ ЧЕТНОЕ)
allsel,all
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
*SET,ITS,(el_sz**2)/(4*Lambda1/(Ro1*C1))
DELTIM,ITS,0.1*ITS,100*ITS
KBC,0
*do,tim1,its,Tau1,its
  Q2=Q1*exp(-B1*tim1)
  LSEL,S,,3
  nsll,s,0
  *get,n1,node,,num,min
  *dowhile,n1
    F,n1,HEAT,Q2*2*3.1415926536*nx(n1)*L1 ! поток тепла в узел = Q1 *
(площадь кольца)
    n1=ndnext(n1)
  *enddo
  ksel,s,,4
  nsllk,s
  *get,n1,node,,num,min
  F,n1,HEAT,Q2*2*3.1415926536*nx(n1)*(L1/2)
  ksel,s,,3
  nsllk,s
  *get,n1,node,,num,min

```

```

F,n1,HEAT,Q2*3.1415926536*(L1/2)**2
allsel,all
time,tim1
solve
*enddo
finish
/POST1
set,last
PLNSOL, TEMP,, 0
KSEL,S, , ,4
nslk,s
*get,n1,node,,num,min
*get,T1,node,n1,temp ! температура на внутренней поверхности в момент
времени Tau1
allsel,all
FINISH
SAVE,COARSE,DB
PARSAV,ALL,'params','txt'
B2 Решение с использованием метода SUBMODELING (lgw файл)
PARRES,NEW,'params','txt' ! те же параметры, что были использованы в грубой
модели, изменим только параметры, отличающиеся в модели с мелкой сеткой
Rout=5
el_sz=Rout/10 ! размер КЭ
/PREP7
!*
ET,1,PLANE55
KEYOPT,1,3,1
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,KXX,1,,Lambda1

```

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

```

MPDATA,C,1,,C1
MPDATA,DENS,1,,Ro1
CYL4, , ,Rin, ,Rout,90
mshkey,0
esize,el_sz
amesh,all
IC,all,TEMP,T0,
LSEL,S, , , 1
NSLL,S,1
NWRITE,'bound_nodes','txt',' ',0 ! узлы на границе, условия в которых будут
заданы ! по результату расчета "грубой" модели
ALLSEL,ALL
save,fine,db
RESUME,'COARSE','DB', ,0,0 ! возвращаемся к задаче на грубой сетке
/POST1
set,last
*get,nstep1,active,0,set,lstp ! определяем номер последнего шага расчета,
который был сделан
*dim,Time1,,nstep1 ! массив для записи моментов времени, в которые был
сделан "грубый" расчет ! (чтобы в подмодели использовать эти же моменты
времени)
*do,i,1,nstep1
! интерполяция граничных условий для подмодели с мелкой сеткой делается
за один проход -
! чтобы базу данных "грубой" задачи открывать только один раз, а не на
каждом шаге счета
! для подмодели
SET,i
*get,tmp,active,0,set,time
Time1(i)=tmp
*if,i,lt,1.5,then

```

```

j=0 ! если это первый шаг (i=1), то результаты интерполяции пишем в
новый файл
*else
j=1 ! если не первый - дописываем к существующему файлу
*endif
! интерполируем температуры на границе fine-модели
CBDOF,'bound_nodes','txt',' ','bound_temps','txt',' ',j, ,0
*enddo
PARSAV,ALL,'params','txt'
RESUME,'FINE','DB', ,0,0 ! возвращаемся к подмодели
PARRES,CHANGE,'params','txt'
LSEL,S,,3
NSLL,S,1
*GET,N1,NODE,,COUNT
L1=(3.1415926536/2)*RIN/(N1-1) ! ИСТИННЫЙ РАЗМЕР ЭЛЕМЕНТА НА
ПОВЕРХНОСТИ ПОДМОДЕЛИ
allsel,all
FINISH
/SOL
ANTYPE,4
*SET,ITS,(el_sz**2)/(4*Lambda1/(Ro1*C1))
DELTIM,ITS,0.1*ITS,20*ITS
KBC,0
! граничные условия для подмодели, записанные ранее в bound_temps.txt,
нужно читать
! из этого файла для соответствующего момента времени - с места,
отмеченного меткой
! вида :CBi (i - номер момента времени). Преобразование i в строковую
переменную -
! функцией CHARVAL. А вот строковая операция типа ':CB'+CHARVAL(i) в
ANSYS 17 не

```

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

! работает (может, в более поздних есть?). Придуман прием (кривой, но лучше что-то

! не нашел): метки вида :CB1, :CB2, ... :CB(много) заранее записаны в файл lab.txt,

! читаются оттуда в массив, из которого выбирается нужная.

!

*dim,lab1,string,nstep1

*sread,lab1,'lab1','txt' ! файл, содержащий строки вида :cb1, :cb2 и т.д.

*do,i,1,nstep1

tim1=Time1(i)

time,tim1

Q2=Q1*exp(-B1*tim1)

LSEL,S,,,3

nsl,s,0

*get,n1,node,,num,min

*dowhile,n1

F,n1,HEAT,Q2*2*3.1415926536*nx(n1)*L1 ! поток тепла в узел = Q1 *
(площадь кольца)

n1=ndnext(n1)

*enddo

ksel,s,,,4

nslk,s

*get,n1,node,,num,min

F,n1,HEAT,Q2*2*3.1415926536*nx(n1)*(L1/2)

ksel,s,,,3

nslk,s

*get,n1,node,,num,min

F,n1,HEAT,Q2*3.1415926536*(L1/2)**2

allsel,all

time,tim1 ! читаем условия на границе подмодели из файла bound_temps.txt -
с нужного места

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2

```
tmpstr=lab1(1,i)

```

					П - 429.006.2020	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		2