

ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра радиофизики

Направление «Прикладные математика и физика»



МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА ТОКОВЕДУЩИХ СИСТЕМ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Бакалаврская работа студента
дневного отделения
Бегаля Дмитрия Игоревича

Научный руководитель:
к. ф.-м. н., доцент **Павлейно.М.А.**

Рецензент:
к. т. н., ст. науч. сотр. **Павлов А.В.**

Санкт-Петербург
2017

Оглавление

Введение.....	3
Обзор литературы	5
Глава 1. Нагрев квазиодномерных ТВС, содержащих электрические контакты.	7
1.1. Определение температуры контактных площадок по методу Хольма-Кольрауша. Стационарный нагрев.	7
Симметричные проводники. Учет теплообмена с поверхности.	7
Зависимость от радиуса контактного пятна.	11
Асимметричные проводники.	12
Асимметрия тепловых нагрузок.	15
1.2. Оценка возможности применения метода Хольма-Кольрауша при импульсном нагреве ТВС.	17
Симметричные проводники. Длительный нагрев.	17
Кратковременный нагрев.	20
Асимметрия тепловых нагрузок	22
Выводы.....	23
Глава 2. Нагрев сугубо трехмерных ТВС, содержащих электрические контакты.....	25
2.1. Нагрев элементов ТВС ВДК.....	25
2.2. Моделирование нагрева ТВС.....	31
Выводы.....	34
Заключение	35
Список литературы	36

Введение

В настоящее время жизнь без электрической энергии кажется невозможной, в связи с этим необходимо обеспечивать надежность работы электрических сетей и, в частности, высоковольтных электрических аппаратов. Основной их частью являются, несомненно, токоведущие системы (ТВС). Именно они напрямую подвергаются серьёзным токовым воздействиям. Несмотря на то, что количество аварийных ситуаций стремятся уменьшить с помощью различных средств защиты, аварии все равно остаются неизбежными. Поэтому, высоковольтный аппарат должен выдерживать как номинальные воздействия, так и аварийные.

Выделяется три основных режима протекания тока в ТВС:

- номинальный ток – ток, который протекает в системе в обычном, стационарном режиме работы, воздействие такого тока не должно ни коим образом негативно влиять на ТВС в течение любого времени. Как правило, нагрев таким током составляет около 100 градусов [4, 8].

- ударный ток короткого замыкания – наибольшее мгновенное значение тока, возникающего в системе при коротком замыкании. Длительность воздействия таким током составляет примерно полупериод промышленной частоты. Величина тока значительно превышает номинальный ток. Короткие, но сильные импульсы тока могут привести к значительному нагреву и сварке элементов ТВС [3].

- ток термической стойкости – ток, термическое воздействие которого должен выдержать без повреждений электрический аппарат в течение заданного времени. Как правило, аппарат должен выдерживать несколько секунд воздействия таким током [2, 8, 9].

Неотъемлемой частью токоведущих систем являются электрические контакты. Электрический контакт – надежное соединение двух проводников, позволяющее проводить ток. Поверхность электрического контакта проводит ток не по всей своей площади. Из-за микроскопических шероховатостей поверхности возникают отдельные площадки, действительно способные проводить электрический ток. Такие площадки принято называть контактными пятнами, а поверхность контакта – кажущейся контактной поверхностью. Проявляется эффект стягивания линий тока к контактными пятнам и, в результате, появляется контактное сопротивление, ведь длина линий тока увеличивается. Есть и другие причины появления контактного сопротивления, такие как оксидные пленки на контактной поверхности, но в данной работе рассматриваются очищенные и обработанные контакты, и учитывается лишь сопротивление стягивания, поскольку рассматриваются силовоточные контакты, для которых усилие поджатия велико, а характерные перегревы разрушают эти пленки [1, 2].

За счет того, что через маленькую площадь контактных пятен протекает та же величина тока, что и через ТВС, немалое внимание стоит уделить проблеме нагрева контакта. В случае воздействия номинальным током это не так критично, поскольку перегрев составляет порядка десятков градусов [4, 8] и от температуры свойства материала, кроме удельного сопротивления, изменяются слабо. Однако воздействие токами термической стойкости приводит к достаточно большим нагревам, удельное сопротивление в области контактного пятна увеличивается, что, в свою очередь, увеличивает тепловыделение на контактном пятне. В результате процесс нагрева контактного пятна оказывается сложным и нелинейным.

Нетривиальной задачей является нахождение параметров контактного пятна: его размеры и положение на кажущейся контактной поверхности. Экспериментально можно увидеть область, в которой находились контактные пятна по следам сварки после воздействия большими токами. Также, возможно найти радиус контактного пятна, зная контактное сопротивление [1-5]. Впрочем, в случае плоских электродов заранее сложно предположить, сколько контактных пятен будет в действительности. К тому же, в настоящее время могут использоваться достаточно геометрически сложные элементы ТВС, такие как электрод вакуумной дугогасительной камеры, в результате чего контактное сопротивление зависит не только от размеров контактного пятна, но и от его положения.

Благодаря современным методам компьютерного моделирования становится возможным более подробно рассматривать эти проблемы. С помощью метода конечно-элементного моделирования становится возможным рассматривать тепловые и электрические поля в интересующем элементе ТВС, моделировать электрические контакты с использованием более или менее точных приближений. Они дают возможность разработчику ТВС удобно и в достаточно короткие сроки получить наглядную картину того, каким будет спроектированный элемент.

Тем не менее, требования к вычислительной мощности у пакетов конечно-элементного моделирования достаточно высоки, при этом и многие задачи являются достаточно сложными, включая в себя расчет различных нелинейных задач. Получение точного решения зачастую требует большого количества времени как от человека, выполняющего моделирование, так и от машины, производящей расчеты, даже при современных вычислительных мощностях. В связи с этим необходимо упрощать задачи, использовать те или иные приближения.

В случае рассмотрения нагрева токоведущих систем возможно использовать квазиодномерное приближение [12]. В связи с высокой теплопроводностью металлов, из которых состоят проводники, тепловой поток направлен вдоль линии протекания тока. Соответственно, и градиент

температуры изменяется вдоль этой линии. Таким образом, ТВС возможно представить одномерной вдоль линий протекания электрического тока, получая при этом достаточно точные результаты.

В данной работе рассматривается нестационарный нагрев токоведущих систем при воздействии токами, провоцирующими достаточно большой (сотни градусов) перегрев. Основное внимание уделяется электрическим контактам, поскольку зачастую именно они являются наиболее нагретыми.

В первой главе работы рассматриваются приближения, с помощью которых возможно рассчитать температуру контактных пятен. Оцениваются рамки применимости приближений в различных условиях. Рассматриваются приближения, которые достаточно хорошо работают в стационарном случае, однако их применимость в нестационарном случае ранее не рассматривалась.

Во второй главе рассматривается трехмерная постановка задачи с целью определить, как некоторые приближения, относящиеся к моделированию электрического контакта, влияют на распределение температуры в элементе ТВС и какую часть этого элемента возможно моделировать в одномерной постановке без потери точности.

Обзор литературы

Аналитическое решение для нахождения температуры контактного пятна было предложено в [2]. При этом, оно является точным при использовании нескольких приближений. Во-первых, поверхность проводника изолирована термически и электрически за исключением двух эквипотенциальных поверхностей (показано на рисунке 1). Во-вторых, считается, что через контактную поверхность не проходит тепловой поток, то есть область стягивания симметрична относительно КП. В-третьих, рассматривается установившееся распределение температуры.

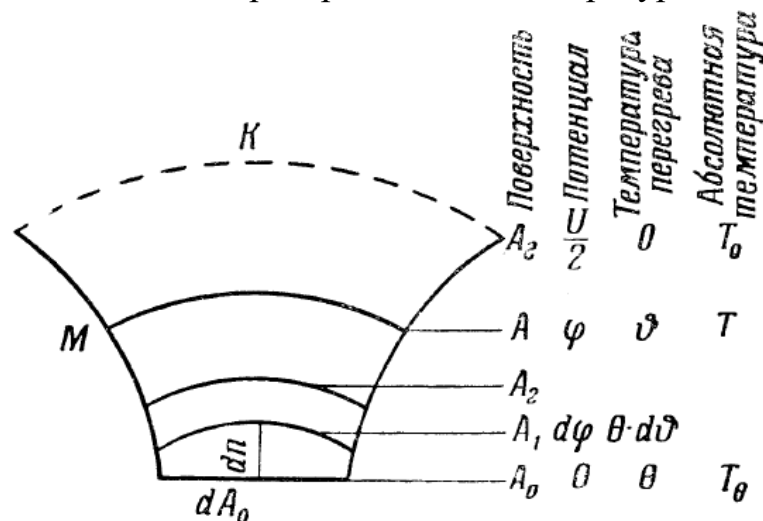


Рис. 1. Схематическое изображение области стягивания

При соблюдении этих условий, можно установить связь между температурой КП и температурой и потенциалом в точке, лежащей в области стягивания выглядит таким образом и называется соотношением Хольма-Кольрауша:

$$L(T_{\theta}^2 - T^2) = \frac{U^2}{4}$$

где L – постоянная Лоренца, T – температура на концевой поверхности, U – падение напряжения на концевой поверхности, T_{θ} – температура КП.

Однако условия, на основании которого получалось данное соотношение, выполняются далеко не всегда. При рассмотрении таких ТВС, как например вакуумный выключатель, необходимо учитывать теплообмен с окружающей средой, за счет асимметрии элементов ТВС может возникать тепловой поток вдоль системы и, соответственно, через КП, а цель работы заключается в рассмотрении нестационарного нагрева. Поэтому необходимо рассмотреть, насколько влияют те или иные факторы на возможность определения температуры КП таким способом.

Задача нагрева номинальным током была решена в [4]. В ней описан расчет нагрева номинальным током при использовании квазиодномерного приближения [12], при этом степень точности достаточно высокая (2-3%), что подтверждается конечно-элементным моделированием. Задача нагрева ударными токами была детально рассмотрена в [3]. Однако подробное исследование особенностей нагрева токоведущих систем токами термической стойкости не проводилось в найденной литературе.

Для описания ТВС квазиодномерной моделью был написан алгоритм TERMOS [ссылка на статью]. Этот алгоритм рассчитывает распределение температуры вдоль квазиодномерной ТВС с учетом конвекции и излучения с поверхности проводников. Точность алгоритма при расчете нагрева номинальным током показана в [4].

Глава 1. Нагрев квазиодномерных ТВС, содержащих электрические контакты.

Для оценки применимости приближения Хольма-Кольрауша, о котором было написано ранее, будем рассматривать квазиодномерные ТВС. По сути, рассматриваемые модели можно представить как одномерные, за исключением области стягивания линий тока. В данном случае использование простой модели обусловлено тем, что важно оценить влияние различных факторов на изменение погрешности измерения температуры КП. При этом не важно, какой формой и размерами обладают контакты; важными факторами являются интенсивность теплообмена с окружающей средой, геометрическая либо тепловая симметрия контактов, соотношение размеров КП с размерами контакта. Также важно рассмотреть, насколько соотношение Хольма-Кольрауша выполняется при его применении к неустановившемуся распределению температур.

1.1. Определение температуры контактных площадок по методу Хольма-Кольрауша. Стационарный нагрев.

Симметричные проводники. Учет теплообмена с поверхности.

Поскольку мы работаем с квазиодномерным приближением, необходимо, чтобы температура в поперечном сечении проводника менялась незначительно. Теплоотдача с поверхности проводника, напротив, может это нарушать. В простейшем случае можно рассмотреть контактное соединение двух квазиодномерных проводников с учетом теплоотдачи с их поверхности. При этом рассмотреть применимость метода Хольма-Кольрауша при различной интенсивности теплообмена.

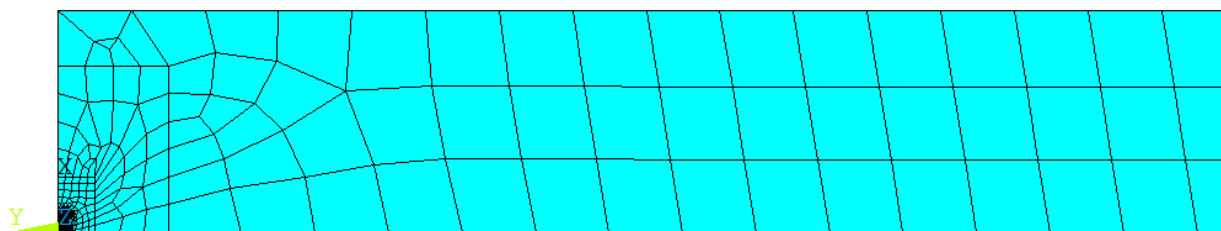


Рис. 2. Конечно-элементная модель проводника

Для этого в пакете ANSYS была создана двумерная осесимметричная конечно-элементная модель проводника с круглым контактным пятном по центру. Отношение радиуса контактного пятна a к радиусу проводника R было выбрано $\frac{a}{R} = \frac{1}{20}$. Такое отношение позволяет не учитывать границ при рассмотрении области стягивания [3].

Будем рассматривать задачу, в которой вся выделяемая в области контакта и проводнике тепловая мощность будет отводиться за счет конвекции и излучения со стенок проводника. На удалении от контактного пятна тепловой поток вдоль оси проводника таким образом будет нулевым.

Это позволяет задать условие адиабаты на определенном расстоянии от КП. Данное расстояние выбиралось так, чтобы решение не менялось небольшими изменениями длины конечно-элементной модели.

На контактную поверхность задается нулевой потенциал, и подбирается ток таким образом, чтобы перегрев контактного пятна относительно температуры окружающей среды (293 К) достигал значения 100 ± 10 °С. При такой величине перегрева можно получить достаточно наглядные результаты при хорошей сходимости задачи.

Стоит отметить, что процесс подбора подходящего значения тока достаточно долгий, поэтому будем считать, что отклонение в 10 градусов приемлемо, тем более что характер распределения температуры будет оставаться тем же при небольшом изменении значения прикладываемого электрического тока. По этой причине некоторые распределения будут приводиться к одной максимальной температуре. Моделирование дает точные результаты в задачах о нагреве проводников токопрохождением, поэтому считаем полученные в моделировании результаты за истинные.

Рассмотрим распределения температуры в проводнике при разной интенсивности теплообмена с окружающей средой, а именно с различными коэффициентами конвекции. Были выбраны коэффициенты $k_{conv} = 10; 100; 1000; 10000$, что по порядку величин соответствует свободной конвекции, вынужденной конвекции, жидкостному охлаждению и жидкостным испарителям соответственно [4, 6].

Получены поверхностные распределения возле контакта:

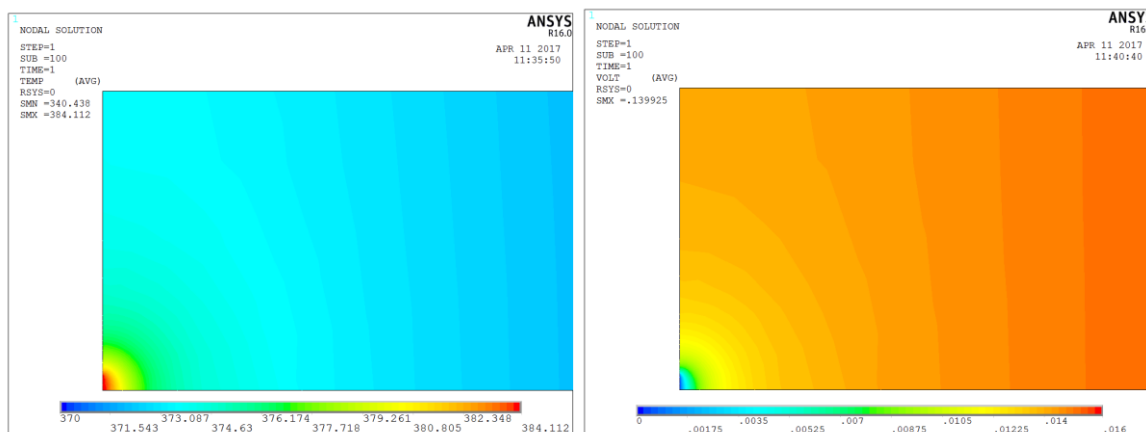


Рис. 3. Распределение температуры (слева) и потенциала (справа) при $k_{conv} = 10$

На расстоянии более $20a$ изотермы и эквипотенциальные поверхности уже практически перпендикулярны линиям протекания тока, что показывает границу зоны стягивания. Также видно, что форма контуров для обоих распределений близка, а именно это требуется для выполнения соотношения Хольма-Кольрауша. Тогда при малом теплообмене с окружающей средой оправдано применение данного соотношения для определения температуры

контактного пятна. Далее будет показано, насколько точным образом оно выполняется. Интересно также посмотреть распределение теплового потока. Огромное значение (3 МВт) теплового потока достигается сразу за краем контактного пятна по сравнению с величиной потока в области, удаленной от контакта. По сути, это показывает, насколько мала интенсивность теплообмена с поверхности по сравнению с тем, что происходит в области стягивания.

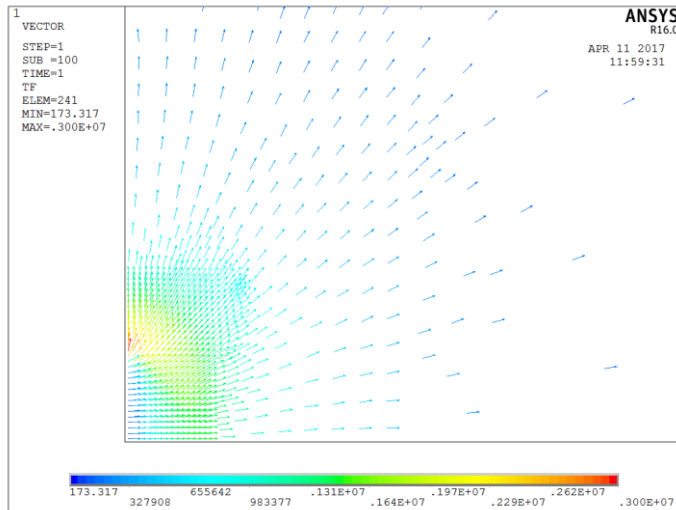


Рис. 4. Распределение потока тепла при $k_{conv} = 10$

Для коэффициента конвекции $k_{conv} = 1000$ получены следующие распределения:

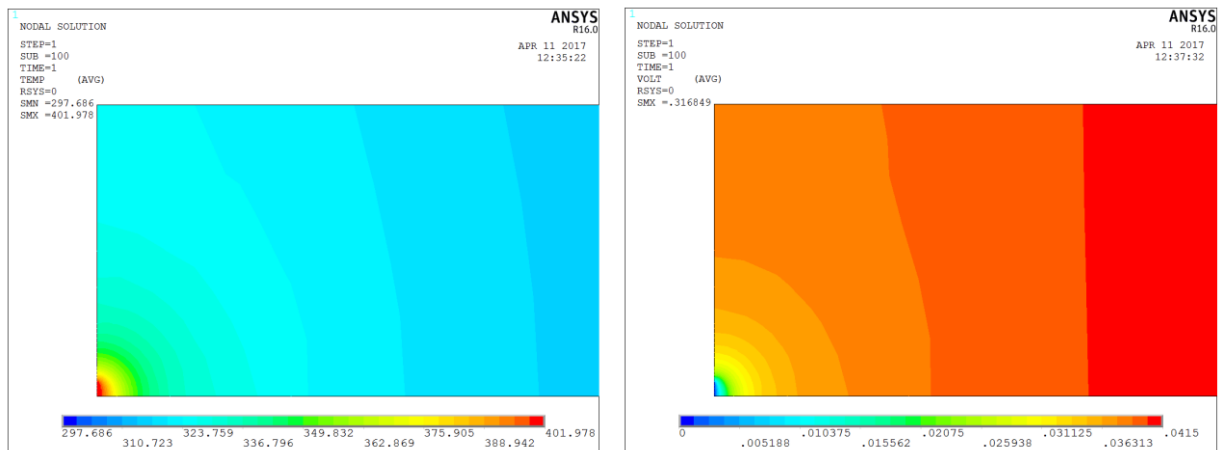


Рис. 5. Распределение температуры (слева) и потенциала (справа) при $k_{conv} = 1000$

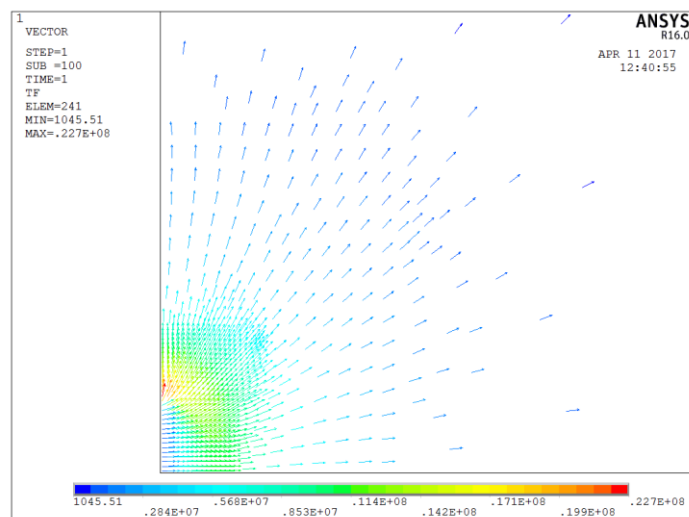


Рис. 6. Распределение потока тепла при $k_{conv} = 1000$

Поток тепла в данном случае на порядок больше, чем в случае с менее интенсивным теплообменом, хотя качественные распределения не сильно отличаются в области контакта. Это позволяет судить о том, что теплообмен с поверхности проводника слабо влияет на процессы, происходящие в непосредственной близости от контактного пятна. Однако видно, что на расстоянии порядка $20a$ эквипотенциальные линии не совпадают с изотермами так же хорошо, как и в предыдущем случае.

Сравнивать полученные решения удобнее на линейных графиках. Ниже представлены распределения температуры и потенциала вдоль оси симметрии на расстоянии до $100a$ от КП для данных коэффициентов конвекции.

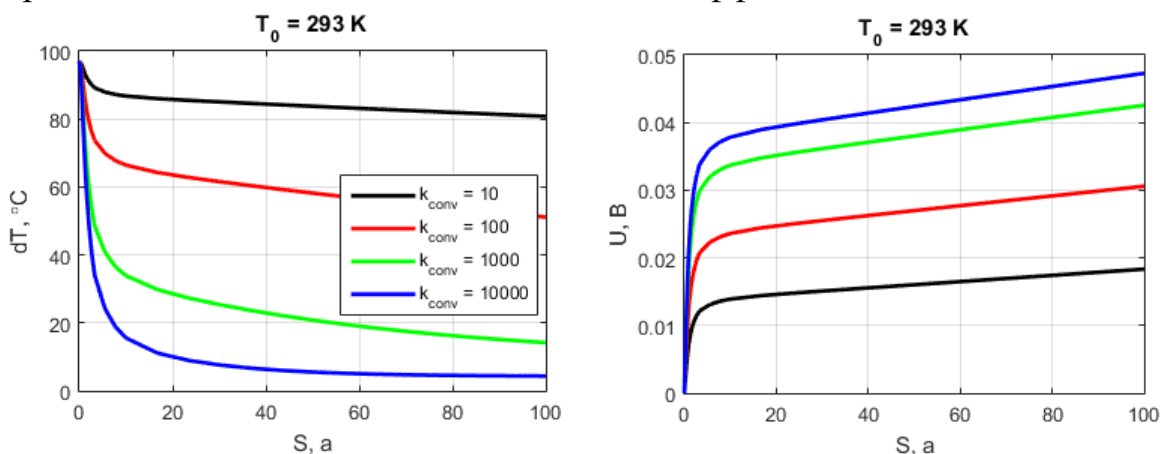


Рис. 7. Распределения температуры и потенциала вдоль оси симметрии проводника.

Теперь рассчитаем температуру КП по соотношению Хольма-Кольрауша T_{HK} . Построим также график зависимости отклонения T_{HK} от истинной температуры КП от положения концевой поверхности, на которой берутся

значения температуры и потенциала. Отклонение построено в процентах от перегрева КП:

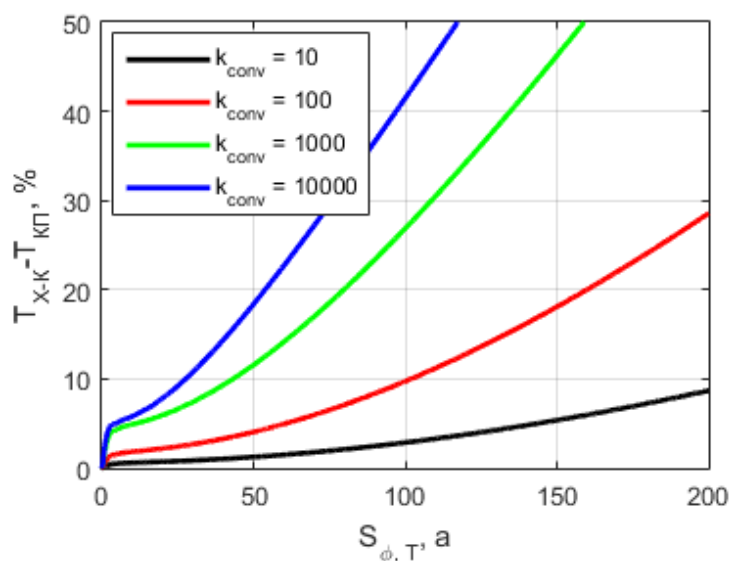


Рис. 8. Отклонение перегрева КП по Х-К от истинного в зависимости от выбора концевой поверхности при разной интенсивности теплообмена.

Заметно, что более интенсивный теплообмен приводит к увеличению погрешности метода Хольма-Кольрауша. Поток тепла при теплообмене с окружающей средой не будет направлен вдоль линий тока, тогда изотермы не будут совпадать с эквипотенциалами. Чем больше интенсивность теплообмена, тем ближе к области контакта начинается проявляться этот эффект, уменьшая точность метода Хольма-Кольрауша, в котором подразумевается совпадение изотермических и эквипотенциальных поверхностей. Впрочем, на расстоянии до $10a$ отклонение расчетной температуры от истинной не превышает 10 градусов даже для $k_{conv} = 10000$, что соответствует погрешности 10%.

Зависимость от радиуса контактного пятна.

Варьирование размера контактного пятна также имеет большое значение. Чем меньше отношение радиуса контактного пятна к радиусу проводника, тем больше проявляется эффект стягивания линий электрического тока. В свою очередь, это приводит к большему тепловыделению. Ожидается, что это приведет к выполнению соотношения Хольма-Кольрауша с большей степенью точности, ведь тепловыделение в области стягивания станет еще выше теплоотдачи с единицы площади поверхности.

Смоделируем перегрев в 100 градусов относительно окружающей среды. На рисунке ниже показано распределение температуры вдоль оси симметрии.

За счет того, что тепловая мощность, выделяемая в области стягивания увеличивается с уменьшением размера КП, перегрев области стягивания также

увеличивается, причем значительно. Рассмотрим, какая погрешность будет у метода Хольма-Кольрауша в таком случае:

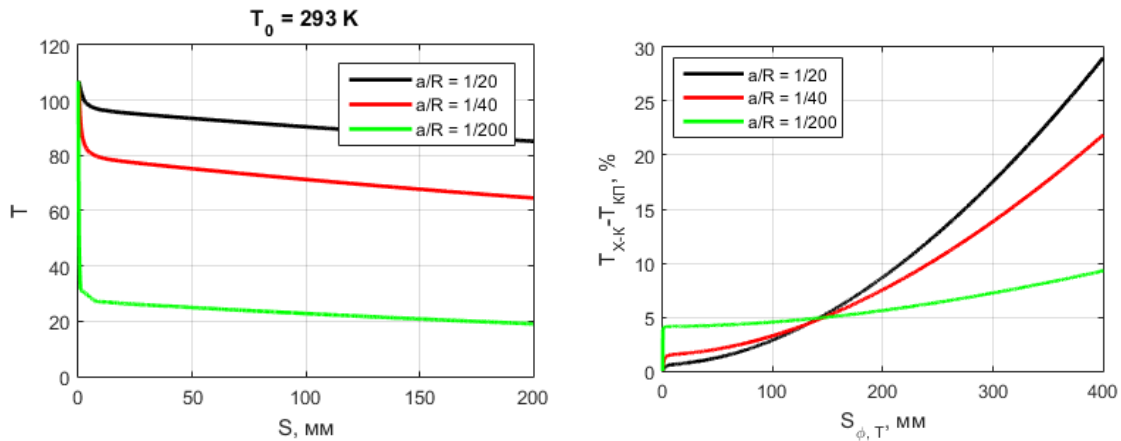


Рис. 9. Распределение температуры вдоль оси проводника (слева) и погрешность метода Х-К в зависимости от положения концевой поверхности (справа) при разных размерах КП

С уменьшением контактного пятна зависимость погрешности от выбора точки для расчета становится более пологой, однако начальное отклонение выше.

Асимметричные проводники.

Рассмотрев процессы в симметричных проводниках перейдем к более сложному случаю. Элементы ТВС зачастую разные по своим размерам, например в составе вакуумного выключателя гибкий токосъем, выводы электрода ВДК, сами электроды отличаются по размерам. В квазиодномерном приближении это выражается в различном радиусе контактирующих элементов. За счет этой асимметрии мощности, выделяемые на единицу длины проводников для каждого из них разные, что в стационарной постановке приводит к разному перегреву. Более того, разная выделяемая тепловая мощность на разных проводниках приведет к возникновению теплового потока вдоль линий протекания тока и, в частности, через контактное пятно. В предыдущей постановке поток через контактное пятно отсутствовал за счет симметрии задачи.

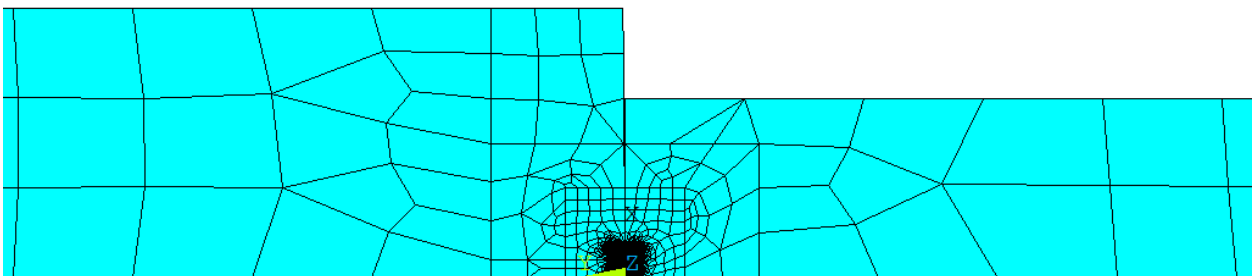


Рис. 10. Конечно-элементная модель асимметричных контактирующих проводников.

Зафиксируем радиус меньшего проводника и будем варьировать радиус большего, фиксируя перегрев в 100 градусов. Рассмотрим распределения температуры, потенциала и потока тепла в области КП в случае, когда асимметрия составляет 5%:

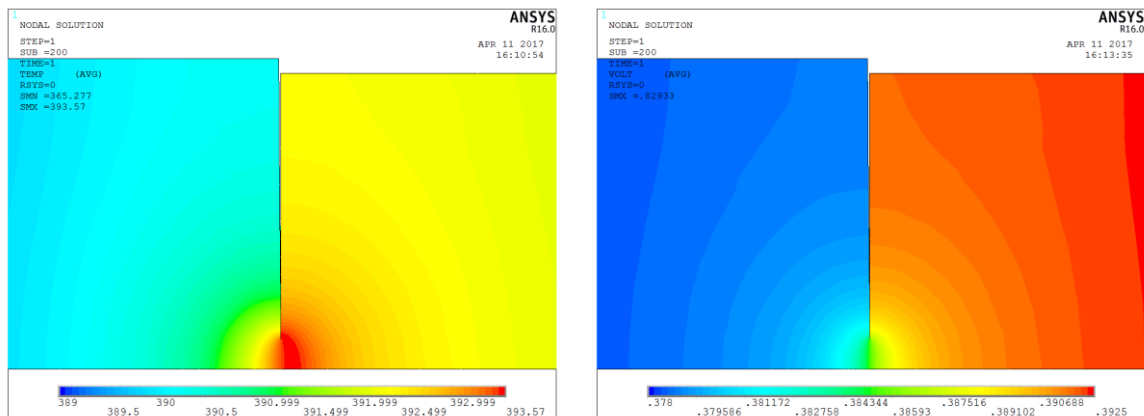


Рис. 11. Распределение температуры (слева) и потенциала (справа) вблизи КП

Распределение электрического потенциала выглядит практически симметрично. В то же время, по распределению температуры явно видно, что максимум смещен из центра контактного пятна в сторону проводника меньшего радиуса. Действительно, меньший размер ведет к большему объемному тепловыделению, за счет чего образуется поток тепла, отводящий мощность не только к поверхности, но и в сторону менее нагретого проводника.

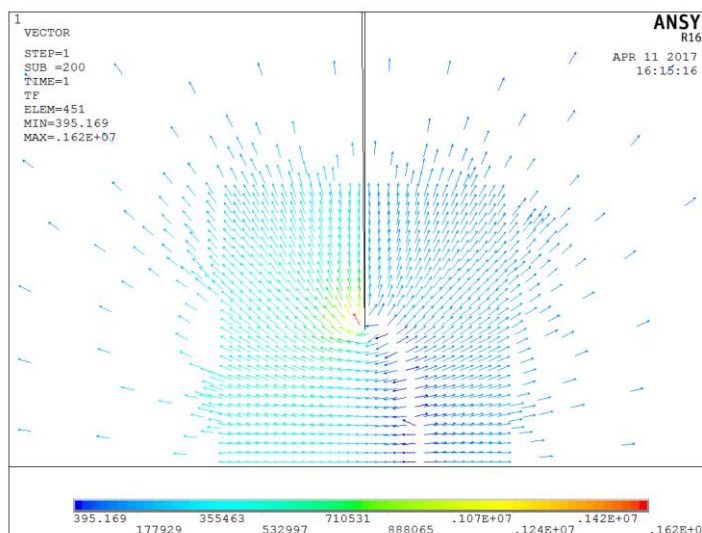


Рис. 12. Распределение теплового потока в области КП

Этот поток компенсирует поток тепла, отводящий тепло от самого контакта в обе стороны. Таким образом, поверхность с нулевым значением

потока, где и располагается максимум температуры, сдвигается в сторону более нагретого проводника.

Приведем линейные графики для того, чтобы сравнить результаты для разной степени асимметрии. На легенде в процентах указано разница радиусов проводников. При увеличении асимметрии контактов область стягивания перестает быть наиболее нагретой, поскольку тепловыделение на проводнике меньшего радиуса становится выше, чем на КП. Тогда определение температуры КП и вовсе не требуется.

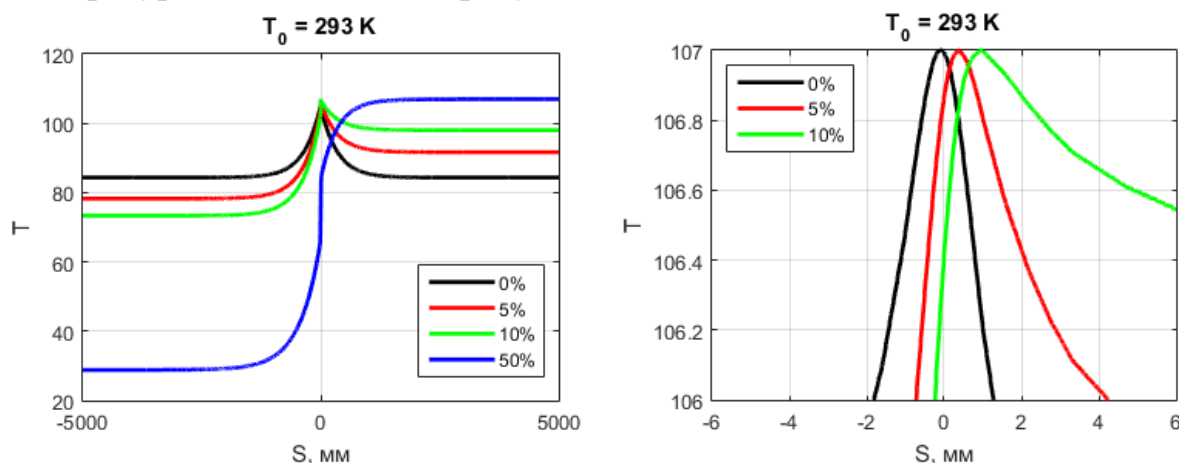


Рис. 13. Распределение температуры вдоль оси проводников. Слева вдоль всей оси, справа – вблизи КП.

Тем не менее, интересно рассмотреть случай с учетом асимметрии, в котором КП все еще является наиболее нагретым. В данном случае условия, требуемые для выполнения приближения Хольма-Кольрауша, сильно нарушаются. Изотермические поверхности явно не совпадают с эквипотенциальными вблизи КП (рис. 11), поток тепла через КП не нулевой (рис. 12). Распределение температур несимметрично, поэтому не очевидно, каким образом определять концевую поверхность. Тогда, для расчета температуры по методу Хольма-Кольрауша будем выбирать концевые поверхности отдельно с левой и правой стороны от КП и сравним результаты.

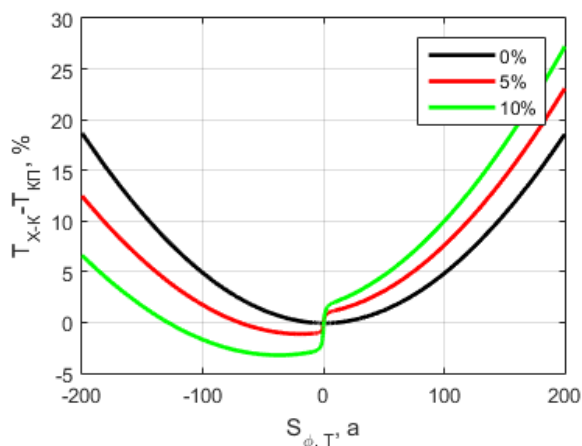


Рис. 14. Зависимость погрешности метода X-K от выбора концевой поверхности. $S_{\phi,T} = 0$ соответствует положению центра КП.

Не смотря на асимметрию, при измерении на расстоянии до 100 радиусов КП возможно получить температуру КП с погрешностью до 10%.

Асимметрия тепловых нагрузок.

В предыдущей части было описано поведение области стягивания в случае геометрической асимметрии. Она приводила к возникновению теплового потока через контактное пятно, что, в принципе, может происходить и в случае симметричной геометрической конфигурации системы. Одинаковые элементы ТВС могут подвергаться различным тепловым нагрузкам и, таким образом, через контактное пятно тоже будет наблюдаться тепловой поток, что также может повлиять на распределение температуры.

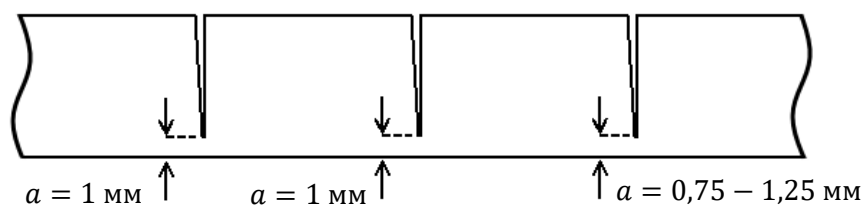


Рис. 15. Схема модели.

Рассмотрим квазиодномерную систему (схема на рисунке выше) из четырех одинаковых проводников, соединенных контактными пятнами. При этом, два пятна будут фиксированного размера, а размер третьего будет варьироваться. Это делается для того, чтобы создать асимметрию тепловых нагрузок на среднем контакте. Будем считать, что такая система симметрично продолжается в обе стороны, для того, чтобы в качестве граничного условия задать адиабату на середине крайних в модели проводников. Пропуская через систему такой ток, чтобы в симметричном случае добиться перегрева в примерно 100 градусов, проварьируем радиус крайнего контактного пятна.

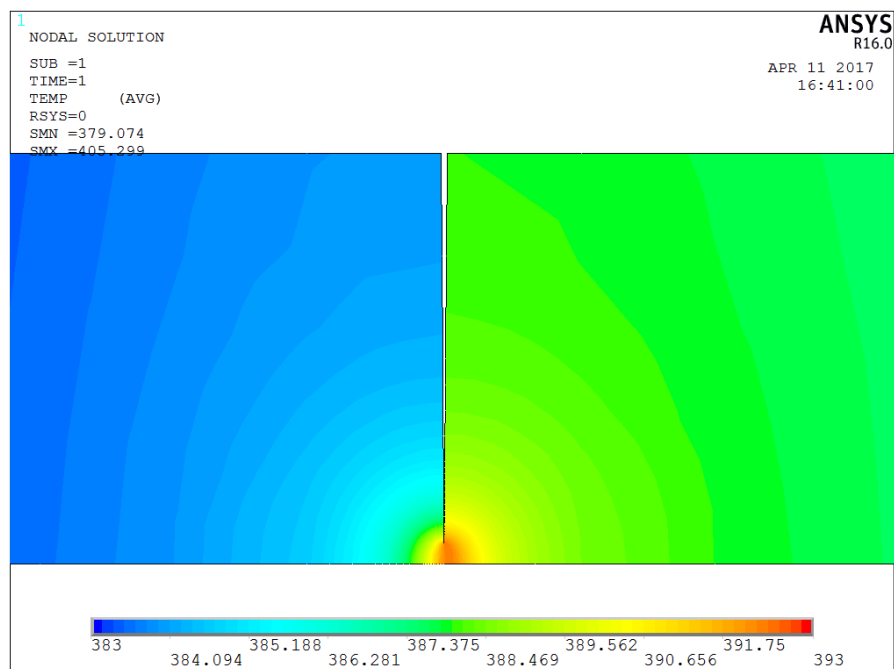


Рис. 15. Распределение температуры в центральном контакте при радиусе варьируемого контактного пятна 0.75 мм

Как и в случае с геометрической асимметрией, максимум температуры сдвигается в сторону более нагретого проводника, меняется лишь природа его нагрева. Ввиду близости расположения контактов тепловой поток, уходящий с крайнего контактного пятна отводится не только через боковую поверхность прилегающих проводников, часть его проходит через следующее, рассматриваемое контактное пятно. В зависимости от размера контактного пятна и, соответственно, тепловыделения на нем устанавливаются следующие распределения температуры:

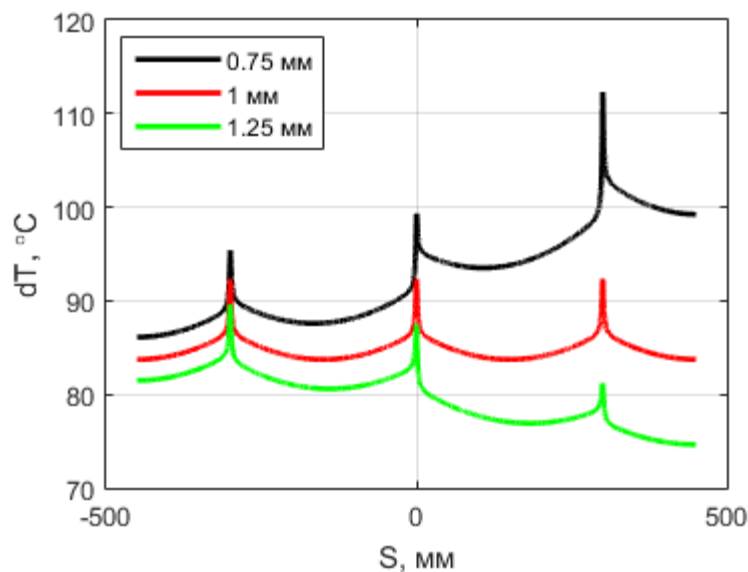


Рис. 16. Распределение температуры вдоль оси симметрии системы проводников. На легенде указан радиус изменяемого КП.

Уже было отмечено, что максимум температуры сдвигается. Нагляднее это можно увидеть на рисунке ниже. На самом деле, максимум температуры сдвигается на небольшое расстояние, меньшее, чем радиус самого контактного пятна:

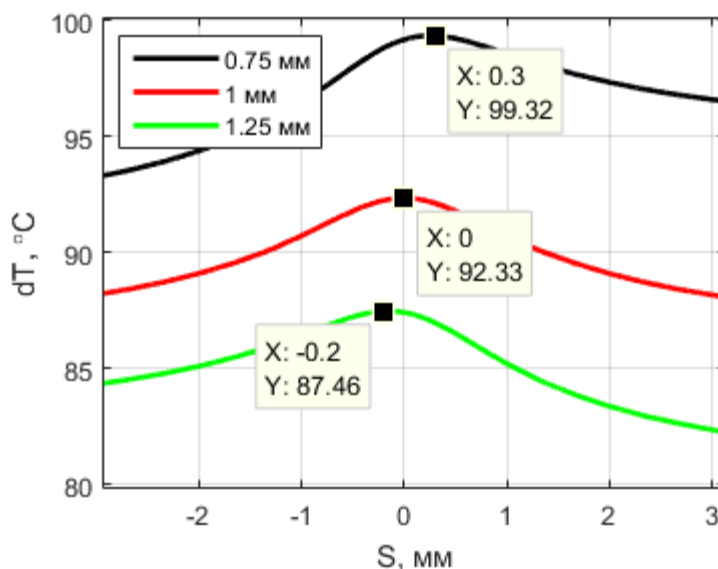


Рис. 17. Распределение температуры в области центрального контакта.

1.2. Оценка возможности применения метода Хольма-Кольрауша при импульсном нагреве ТВС.

Рассмотрев стационарный нагрев, перейдем к нестационарной постановке задачи. Известно, что в области контакта наблюдается значительно большее тепловыделение, чем в основной части проводника. В связи с этим можно ожидать, что до определенного момента времени существенный нагрев будет наблюдаться именно в области контакта, при этом тепловые потоки с тел контакта не окажут влияния на нагрев области стягивания. Таким образом, вклад теплообмена с окружающей средой, как и вклад нагрева самого проводника в распределение температуры может быть значительно меньше, чем вклад тепловыделения в области стягивания. Естественно, это будет в силе при малой длительности нагрева, существенно меньшей той, что нужна для достижения стационарного состояния. В этой части будет оценено время нагрева, при котором можно учитывать лишь нагрев зоны стягивания, без учета асимметрии тепловых потоков на контакте и теплообмена с окружающей средой и, в то же время, иметь возможность оценить температуру контакта с помощью соотношения Хольма-Кольрауша.

Симметричные проводники. Длительный нагрев.

Перейдем к исследованию нестационарного нагрева. Для того, чтобы сравнить с результатами предыдущей части, проведем рассмотрения той же задачи в нестационарной постановке: достигаем перегрева в 100 градусов в

системе из двух контактирующих симметричных проводников с учетом конвекции и излучения с поверхности.

Время анализа подбираем так, чтобы поля температур были близки к полученным в стационарном случае. Распределение температуры по поверхности проводника устанавливается дольше всего, поэтому оно было взято за критерий. Нагрев длительностью в 5000 с дает практически те же результаты, что и статическое решение.

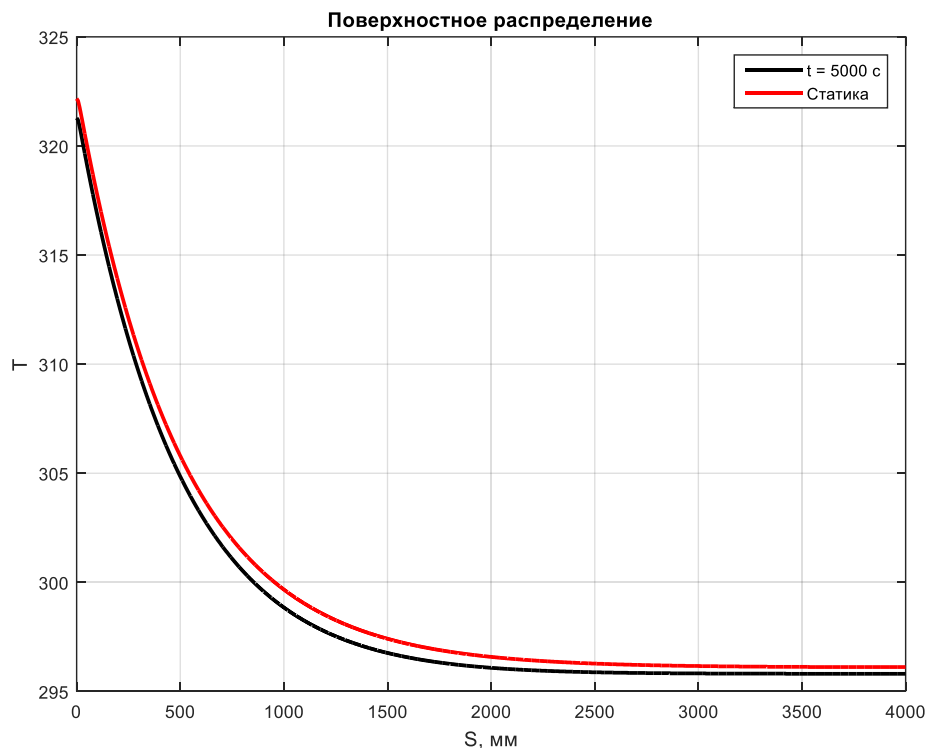


Рис 18. Распределение температуры по поверхности проводника.

Тогда построим распределения температур по поверхности и по оси проводника в разные моменты времени:

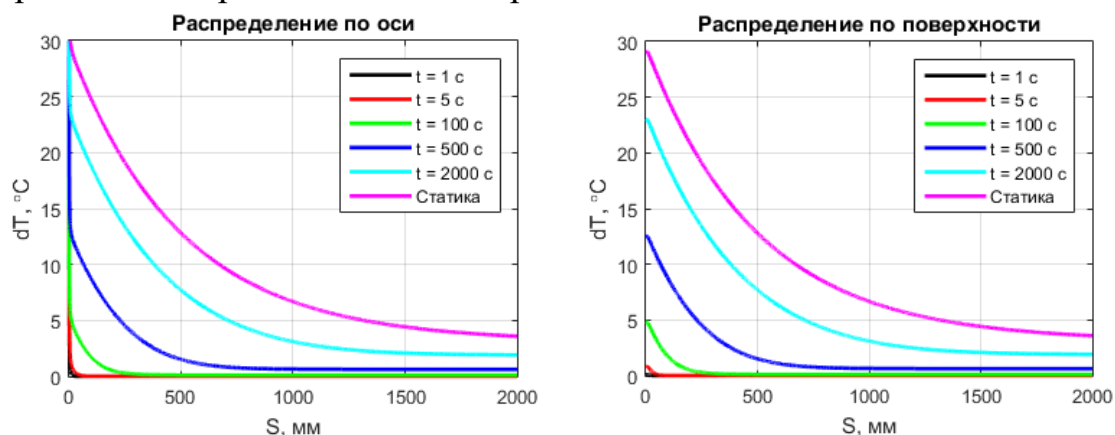


Рис. 19. Распределения температуры по оси и поверхности проводника в одном масштабе в разные моменты времени

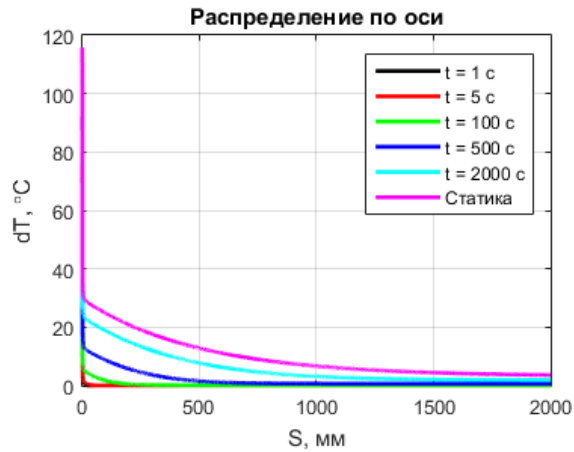


Рис. 20. Распределение температуры по оси проводника

В первые моменты времени температура на поверхности растет незначительно, и это сильно отличается от того, что происходит на контактном пятне. Распределение температуры вдоль радиуса проводника на уровне КП, показывает, что уже в первую секунду перегрев достигает около 70 градусов. Таким образом, при небольшой длительности нагрева можно пренебречь процессами, происходящими на поверхности проводника, таких как конвекция и излучение. При этом, распределение по оси на удалении от КП практически не отличается от распределения на поверхности. В таком случае, модель действительно близка к одномерной за исключением области стягивания.

Рассматривая поверхностные распределения температуры и потенциала можно заметить, что и потенциал, и температура вблизи контактного пятна распределены похожим образом, то есть условие совпадения изотермических и эквипотенциальных поверхностей выполняется. Исходя из этого, соотношение Хольма-Кольрауша должно выполняться.

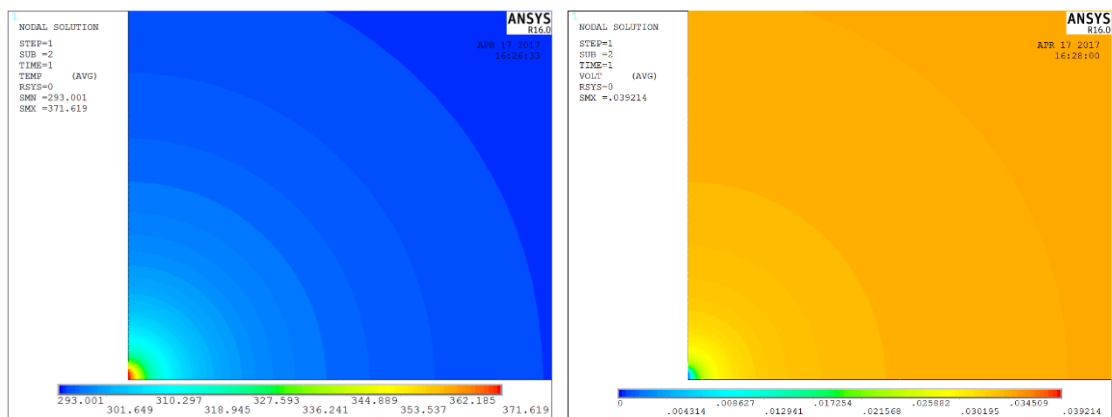


Рис. 21. Распределение температуры и потенциала в момент времени 1 с от начала нагрева.

Построим зависимости погрешности метода ХК для разных моментов времени от местоположения точки, в которой брались данные для расчета.

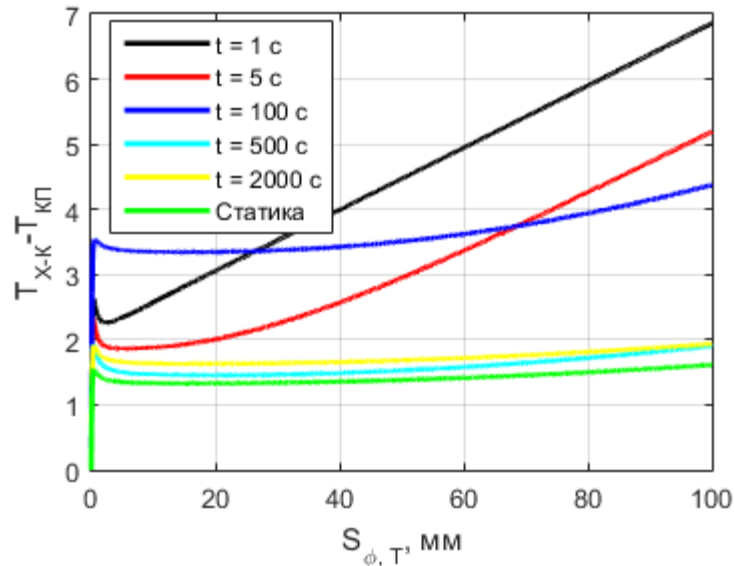


Рис. 22. Зависимость погрешности метода ХК от положения концевой поверхности.

Интересно, что при том, что поверхность практически не нагревается в первые моменты времени, погрешность метода ХК остается не слишком большой и даже удовлетворительной (до 10%).

Кратковременный нагрев.

Мы убедились, что метод Хольма-Кольрауша показывает достаточно хорошие результаты при достаточной длительности нагрева даже без выхода системы в стационарное состояние. В данной части попробуем оценить нижний предел по времени нагрева, когда соотношение Хольма-Кольрауша применимо. Для этого будем подавать импульсы тока различной длительности и фиксировать перегрев, как и раньше подбирая соответствующие значения тока. Для каждой длительности импульса будем рассматривать распределения температур для двух значений перегрева: 100 градусов и перегрев до плавления (1356 К для меди).

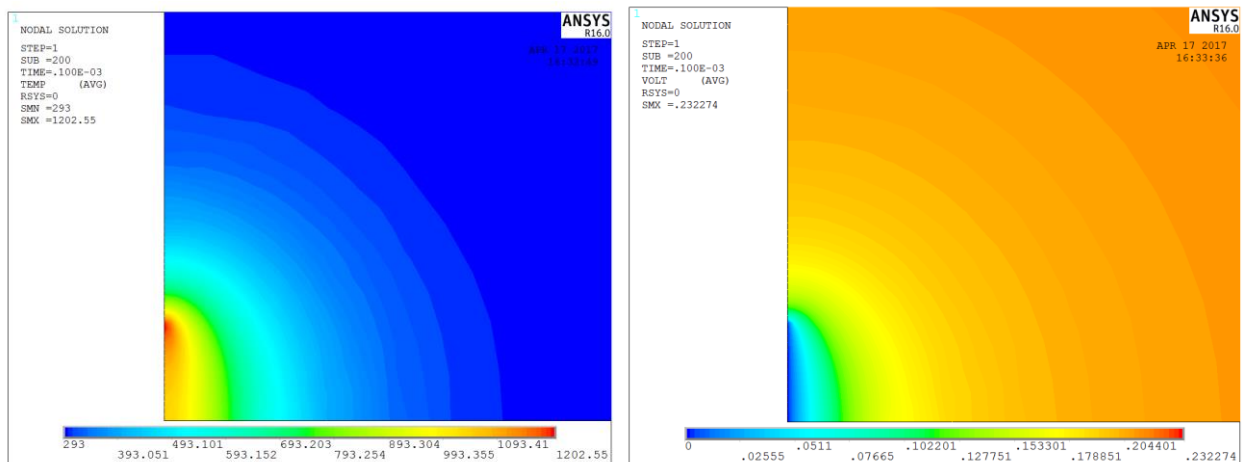


Рис. 23. Распределение температуры и потенциала при длительности импульса нагрева 0.1 мс.

В отличие от распределений, которые были получены ранее для стационарного случая, а также для случая более длительного нагрева, температура распределена явно неравномерно по контактному пятну. Край КП нагрет значительно сильнее, чем центр.

Рассмотрим распределение температуры вдоль радиуса проводника в области КП при перегреве до плавления и при подаче импульсов разной длительности:

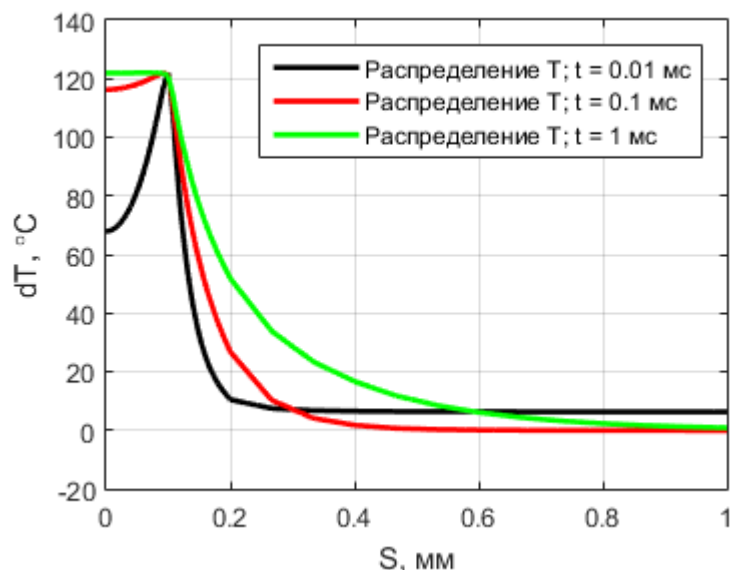


Рис. 24. Распределение температуры по радиусу модели от КП до поверхности.

С уменьшением длительности импульса меняется характер зависимости: максимальная температура установлена более не на всей контактной площадке, а на краю. Чем короче импульс, тем более ярко выраженное отличие наблюдается. Конечно же, изотермы и эквипотенциальные поверхности в данном случае не совпадают даже в области стягивания, что не позволяет получить точные значения температуры КП из соотношения Хольма-Кольрауша.

Возьмем точку на границе зоны стягивания (на расстоянии $5a$ от КП) и на удалении ($50a$). В этих точках возьмем температуру и потенциал для расчета температуры КП и построим зависимость погрешности метода ХК от времени импульса:

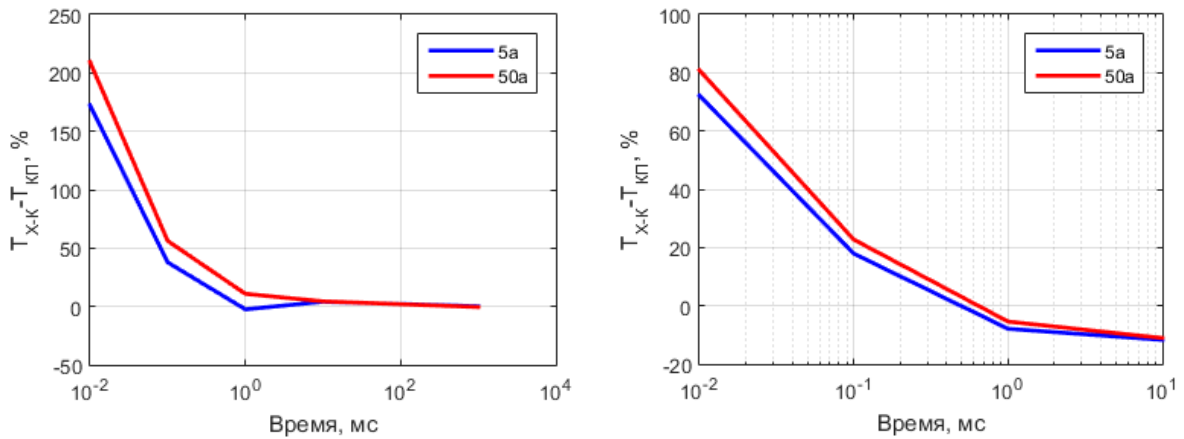


Рис. 25. Погрешность метода Х-К в зависимости от длительности нагрева. Перегрев до ~ 100 °C (слева) и до температуры плавления (справа)

Если взять за критерий погрешность в 10%, то можно заключить, что при длительности импульса в 1 мс использовать метод Хольма-Кольрауша можно с удовлетворительной точностью. При нагреве до 100 градусов длительность импульса, позволяющая использовать метод увеличивается до 10 мс. То, что метод можно применять для импульсов такой небольшой длительности – очень удобно, поскольку 10 мс – полупериод токов промышленной частоты, и, соответственно, длительность импульса ударного тока.

Асимметрия тепловых нагрузок

Рассмотрим нагрев нескольких соединенных контактными пятнами проводников в нестационарном случае. При малом времени нагрева по предыдущим результатам можно предварительно сказать, что вероятнее всего воздействия не будет за счет того, что перегрев локализован в области стягивания.

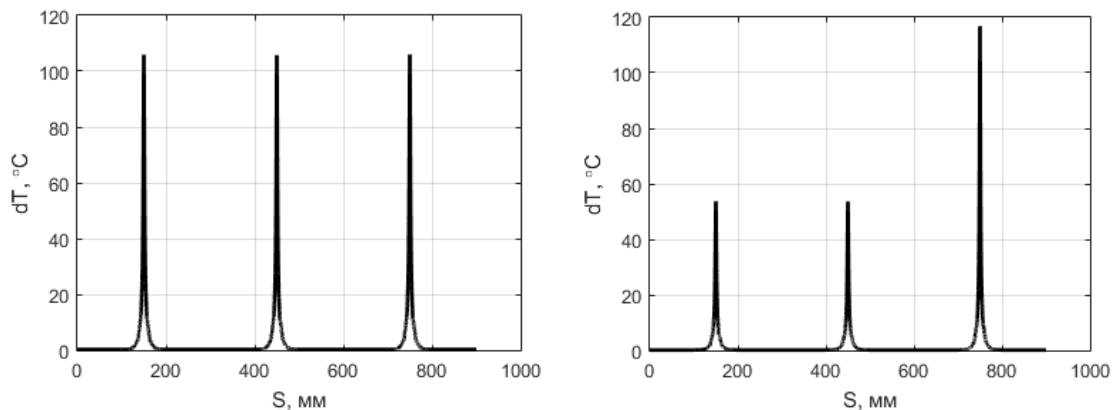


Рис. 26. Распределение температуры вдоль оси при одинаковых КП (слева) и с одним КП меньшего радиуса (справа).

Действительно, распределение температуры в области стягивания показывает, что при короткой длительности импульса контакты нагреваются независимо друг от друга, что позволяет рассматривать импульсный нагрев

ТВС лишь в области контактов при нагреве короткими импульсами. Тепловой поток, уходящий от контактных пятен переносит тепло на нагрев близкой к контакту области, не оказывая влияния на отдаленные участки.

Увеличивая время нагрева до 30 секунд получим распределение температуры, на котором видно, что начинается влияние тепловыделения на одном контакте на температуру точки проводника, равноудаленной от контактов. Это значит, что при таком порядке времени нагрева невозможно считать контактное пятно независимым от других нагреваемых элементов ТВС.

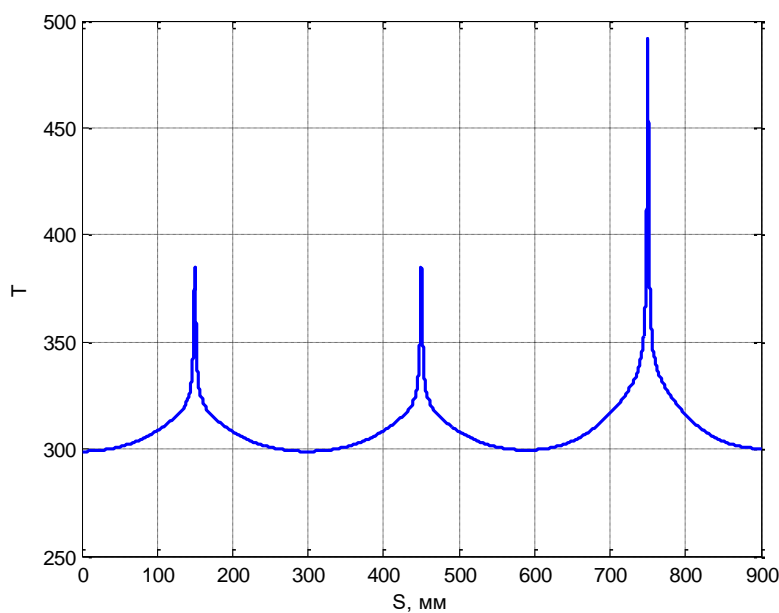


Рис. 27. Распределение температуры вдоль оси проводника в момент времени 30 с.

Выводы

- В случае стационарного нагрева метод Хольма-Кольрауша хорошо применим для симметричных проводников. Погрешность определения температуры КП таким методом не превышает 10% в случае, если концевая поверхность выбирается на расстоянии порядка нескольких десятков радиусов КП.

- Вызванная либо геометрической асимметрией, либо асимметрией тепловых нагрузок, асимметрия тепловых потоков через контактное пятно приводит к искажению распределения температуры в сравнении с симметричным случаем. Максимум температуры сдвигается из КП на расстояние, сравнимое с его радиусом. Тем не менее, метод Хольма-Кольрауша все еще позволяет определить температуру КП с погрешностью не более 10%.

- Метод Хольма-Кольрауша применим в нестационарном случае. При импульсах тока длительностью от 10 мс погрешность метода не превышает

10%. Это позволяет использовать его для оценки температуры КП при воздействии ударным током. Однако при меньших длительностях импульса нагрева распределение температуры по контактному пятну перестает быть равномерным, что не дает возможности применять соотношение X-K.

- При времени нагрева до нескольких секунд возможно рассматривать нагрев контактных пятен независимо друг от друга в случае, если тепловой поток от одного КП не доходит до другого. Это зависит от расстояния между контактными пятнами и теплопроводности материала.

Глава 2. Нагрев сугубо трехмерных ТВС, содержащих электрические контакты.

В настоящее время в составе ТВС могут находиться такие сложные элементы, как, например, электроды ВДК. Сложная геометрия элемента затрудняет моделирование ТВС. В то же время, задача усложняется тем, что точное расположение контактных пятен на контактной поверхности могут быть неизвестными. В таком случае возможно либо решать механическую контактную задачу для определения точки контактирования, либо исходя из экспериментальных данных определить область, в которой находится контакт, и подбирать точные положения контактных пятен, исходя из известного сопротивления элемента. Такие методы решения достаточно требовательны как к вычислительным ресурсам, так и ко времени, затрачиваемому на моделирование с учетом контактов. Электрод является частью ТВС, однако не всегда он представляет собой область интереса. При рассмотрении ТВС нас могут интересовать другие элементы, однако за счет того, что они контактируют с электродом, приходится моделировать и его. Однако делать это можно с учетом различных приближений.

Одним из вариантов является возможность использования приближения об эквивалентном тепловыделении на кажущейся контактной поверхности. Данное приближение предполагает прохождение тока через всю кажущуюся контактную поверхность, но в дополнение к тепловой мощности, которая выделяется за счет токопрохождения, на поверхности выделяется мощность эквивалентная той, что выделялась бы на контактном сопротивлении. С известными значениями тока в системе и контактного сопротивления возможно определить значение эквивалентной тепловой мощности:

$$W = I^2 R_{\text{конт}}$$

2.1. Нагрев элементов ТВС ВДК

Принимая во внимание написанное выше, рассмотрим в качестве сложного элемента ТВС электрод ВДК. Площадь кажущейся контактной поверхности такого электрода достаточно большая и содержит разрезы, из-за чего совсем неочевидно, где именно происходит электрический контакт. Результаты эксперимента на основании следов сварки дают информацию об области, в которой располагаются контактные пятна, однако точный их размеры и положения экспериментально получить невозможно.

Считалось, что контактные пятна расположены симметрично на каждом из «лепестков», как показано на рисунке ниже. В среднем сопротивление пары таких электродов составляет 15 мкОм, поэтому каждому из рассматриваемых положений КП соотносился размер, при котором полное сопротивление оставалось неизменным. Для этого решалась задача по пропусканию единичного тока через электрод без учета нагрева. Как результат,

регистрировалось падение напряжение между выводом электрода и контактными пятнами, которое в случае пропускания тока величиной 1 А и даёт сопротивление.

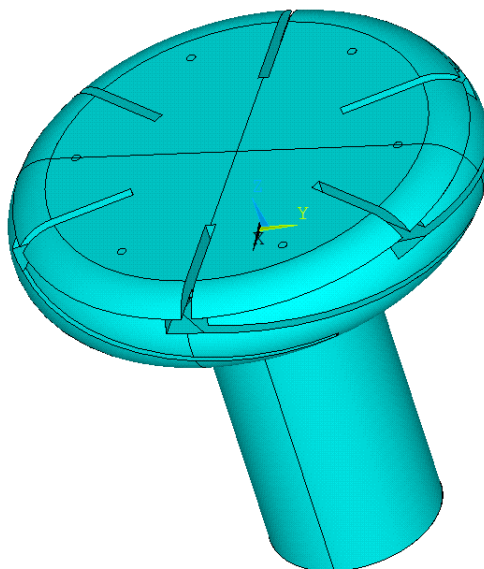


Рис. 27. Модель электрода ВДК

Радиусы КП, удовлетворяющие разным положениям на контактной накладке приведены в таблице ниже. Здесь r – расстояние от центра накладки, φ – угол отклонения от центра лепестка, a – радиус КП:

r , мм	φ , °	a , мм
19	24	1.020
19	0	0.510
19	-24	0.491
17	0	0.555

Будем рассматривать нестационарный нагрев импульсом тока величиной 20 кА длительностью 4 секунды. Такая постановка соответствует нагреву током термической стойкости для моделируемого электрода. Поскольку длительность нагрева небольшая, можно пренебречь теплоотводом с поверхности электрода, тем самым упростив задачу.

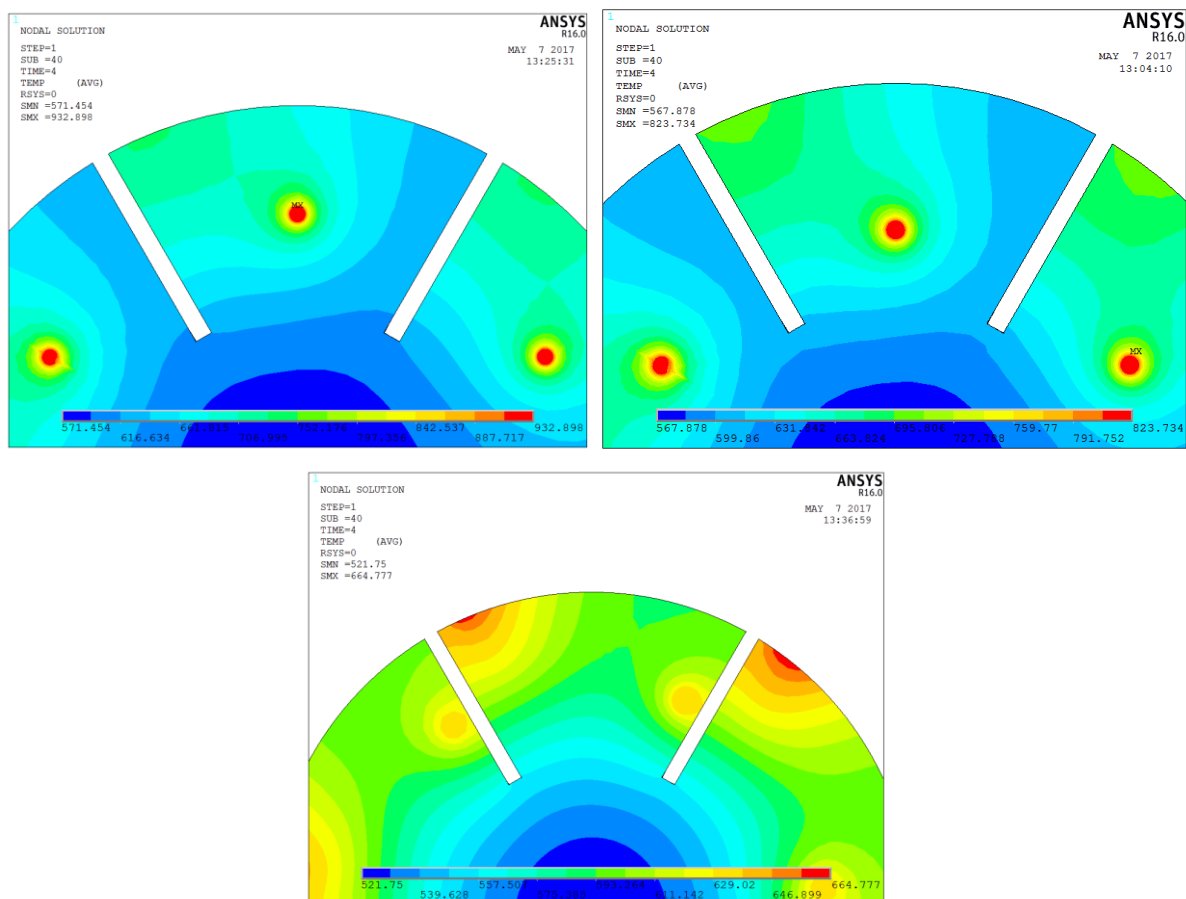


Рис. 28. Распределение температуры по поверхности накладки ВДК для разных положений контактных пятен при одном значении протекающего тока.

Располагая контактные пятна в различных местах на поверхности накладки ВДК видим, что распределение температуры изменяется. При сдвиге пятна к разрезу его размер увеличивается для того, чтобы удовлетворить значению контактного сопротивления, тогда плотность выделяемой тепловой мощности уменьшается. В итоге наблюдается значительное изменение распределения температуры на поверхности накладки. Но насколько это влияет на отдаленные части электрода?

В предыдущей главе на простой модели было показано, что при нестационарном нагреве с длительностью импульса прикладываемого тока порядка нескольких секунд нагрев области возле контактных пятен не оказывает большого влияния на распределение температуры. Для того, чтобы понять, насколько это выполняется в случае геометрически сложной модели, построим распределение температуры в сечении электрода:

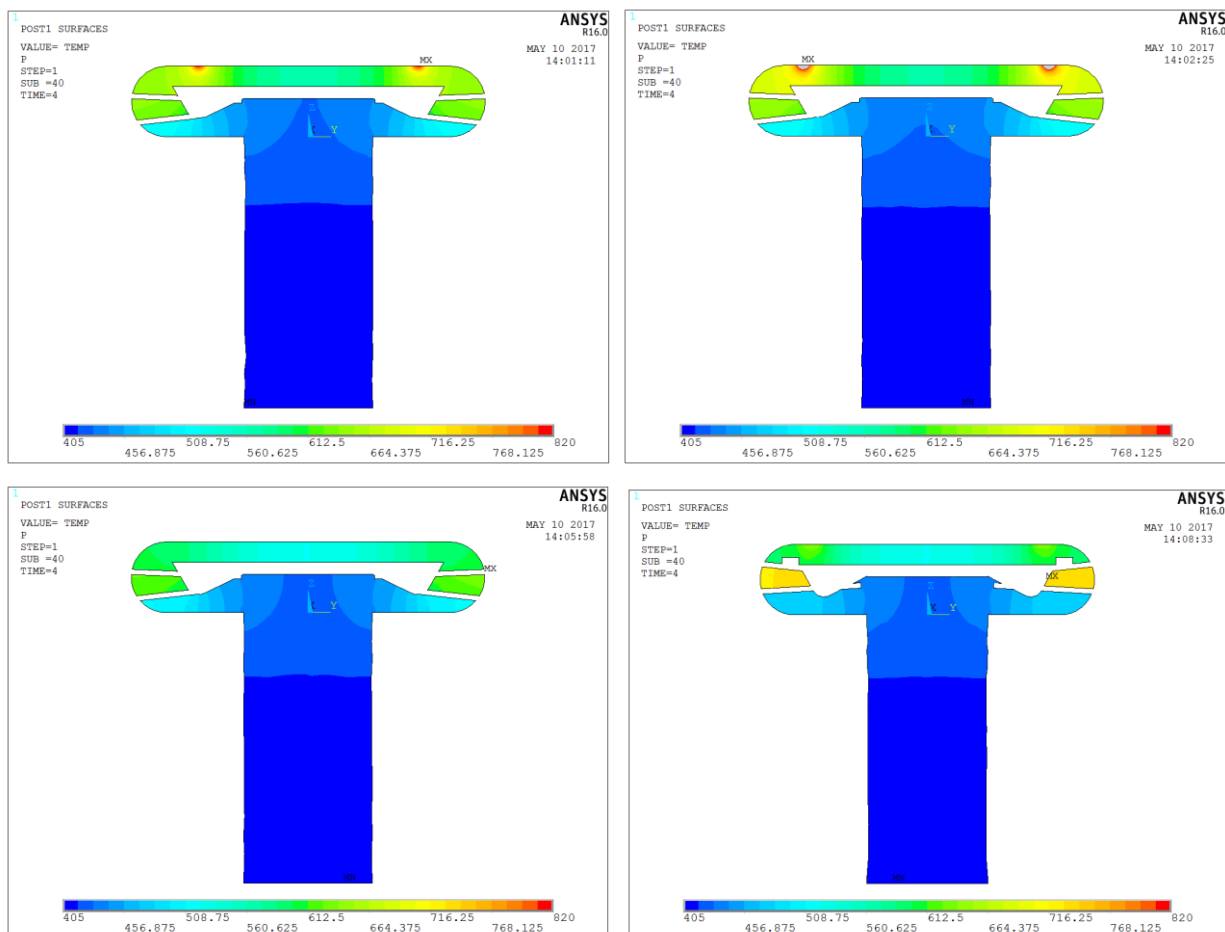


Рис. 29. Распределение температуры в сечении электрода для разных положений контактных пятен. Слева направо и сверху вниз: положение $r = 17$ мм, $\varphi = 0^\circ$; положение $r = 19$ мм, $\varphi = 0^\circ$; положение $r = 19$ мм, $\varphi = 24^\circ$, сечение через центр лепестка; положение $r = 19$ мм, $\varphi = 24^\circ$, сечение через КП.

Действительно, распределения похожи за исключением области вблизи контактных пятен вне зависимости от их расположения. Поскольку ток и контактное сопротивление остаются неизменными (размер КП специально подбирался при каждом положении для того, чтобы сопротивление оставалось тем же), выделяется одна и та же тепловая мощность в каждом из случаев, только распределение её меняется с тем, как располагаются линии тока. Также видно, что некоторые части электрода могут оказаться значительно более нагретыми, чем КП.

Тогда, если нас интересует, как нагреются части электрода, удаленные от КП, нет необходимости моделировать сами пятна: можно обойтись приближением об эквивалентном тепловыделении на кажущейся контактной поверхности. В этом случае считаем, что вся поверхность накладки является проводящей, однако вдобавок к джоулеву тепловыделению задается условие дополнительного тепловыделения на поверхности контактной накладки. Мощность тепловыделения рассчитывается из известного протекающего тока

и контактного сопротивления: $W = I^2 R_{\text{конт}}$. Решим такую задачу и сравним результаты с использованием приближения и без:

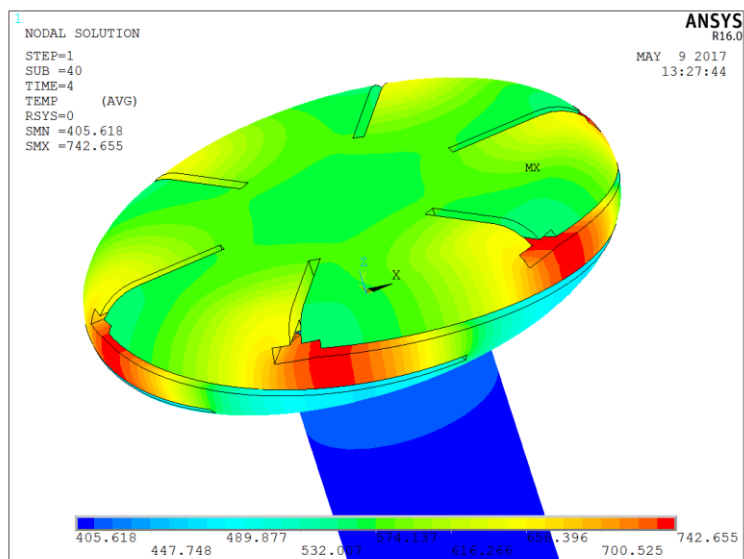


Рис. 30. Распределение температуры по поверхности электрода

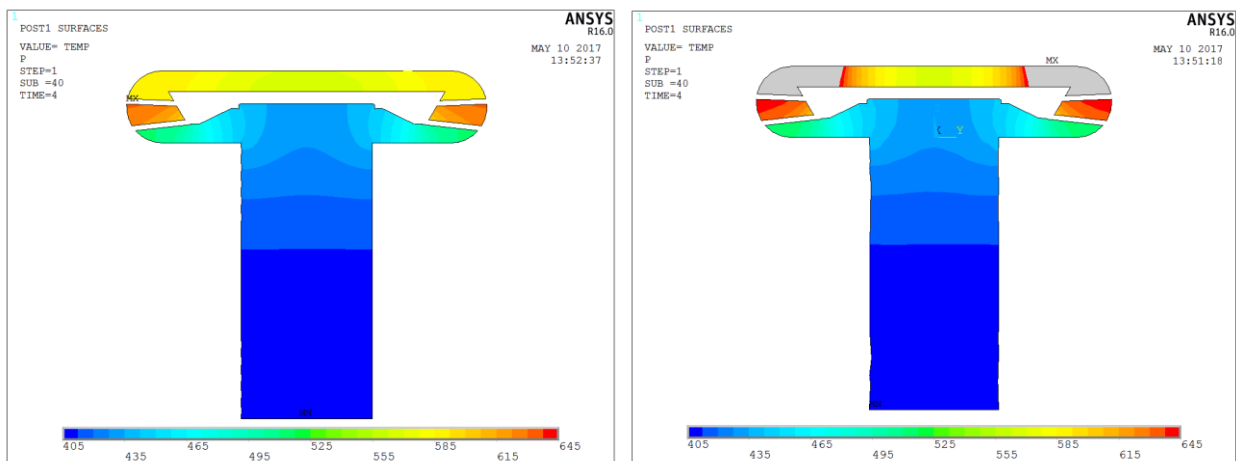


Рис. 31. Распределение температуры в сечении электрода с использованием приближения об эквиваленте тепловыделении (слева) и с моделированием контактных пятен (справа).

В сечении вдали от КП были получены похожие распределения. При приближении к КП на витках розетки заметно небольшое на фоне начальных 293К отличие в 10 градусов. Для того, чтобы подробнее рассмотреть различия в результатах, построим зависимость температуры от времени в нескольких контрольных точках для каждого из вариантов моделирования электрода (3 варианта расположения КП и замена эквивалентным тепловыделением). Расположение точек показано на рисунке ниже:

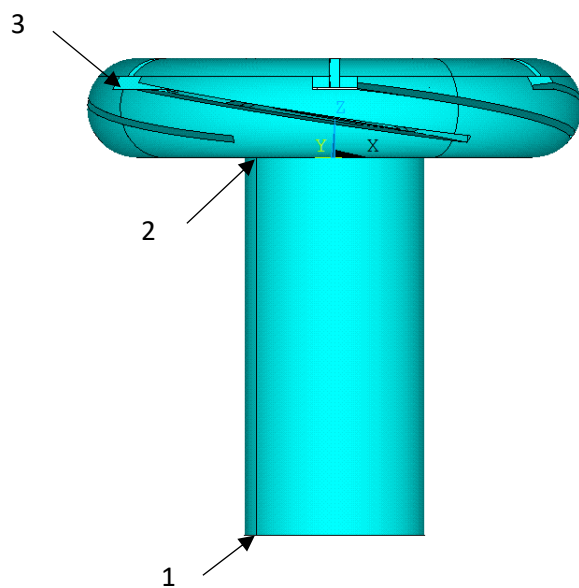


Рис. 32. Расположение контрольных точек на электроде

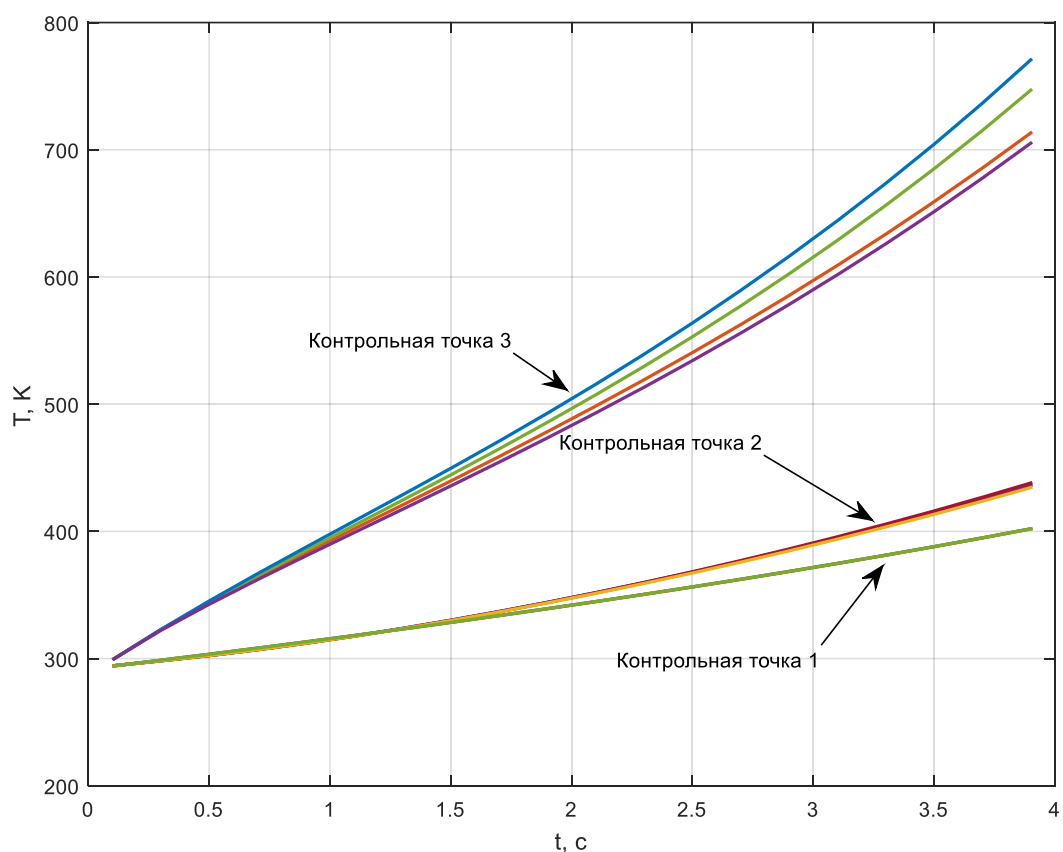


Рис. 33. Группы зависимостей температуры от времени в разных контрольных точках для разных способов моделирования электрода (3 варианта расположения КП и их замена эквивалентным тепловыделением).

Как видно из данного графика, значительное отличие наблюдается в КТ 3 за счет близости к контактному пятну. Напротив, температура на конце

вывода (КТ 1) не зависит от способа моделирования контакта. Небольшое отличие в несколько градусов наблюдается в КТ 2 на соединении розетки с выводом, однако оно несущественно. В таком случае, в области контрольной точки два можно устанавливать граничные условия для моделирования.

Таким образом, приближение об эквивалентном тепловыделении действительно подходит для моделирования нестационарного нагрева.

2.2. Моделирование нагрева ТВС

С использованием рассмотренного приближения, промоделируем нагрев ТВС вакуумного выключателя с учетом изоляции. Модель упрощена, из частей изоляции в нее включены только непосредственно прилегающие к ТВС, поскольку именно в них ожидается больший нагрев.

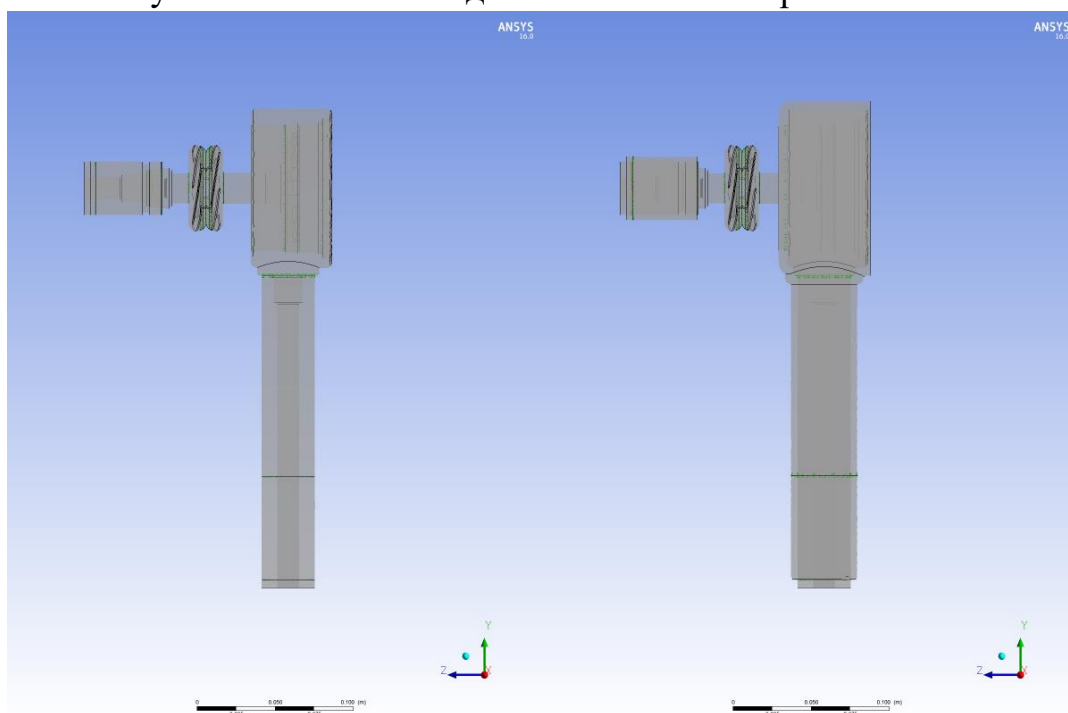


Рис. 34. Модель ТВС без изоляции (слева) и с изоляцией (справа)

Через данную ТВС пропускается ток в 20 кА длительностью импульса 4с. Считаем нагрев адиабатическим. Моделируется не только время протекания тока через ТВС, а значительно большее (4 минуты). После выключения тока накопившееся в ТВС тепло должно перераспределиться в системе, в том числе нагревая изоляцию.

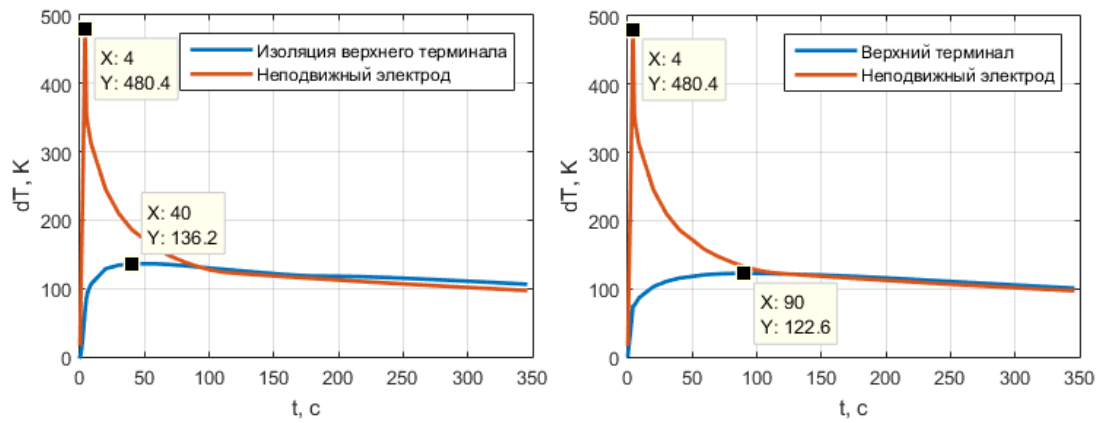


Рис. 35. Зависимость максимального перегрева изоляции и частей ТВС от времени

Заметно, что время достижения максимума температуры для разных элементов модели разное. Накопленное в наиболее нагретых областях тепло перераспределяется с течением времени, что может вызвать значительный нагрев тех частей ТВС, которые за время протекания тока практически не нагревались.

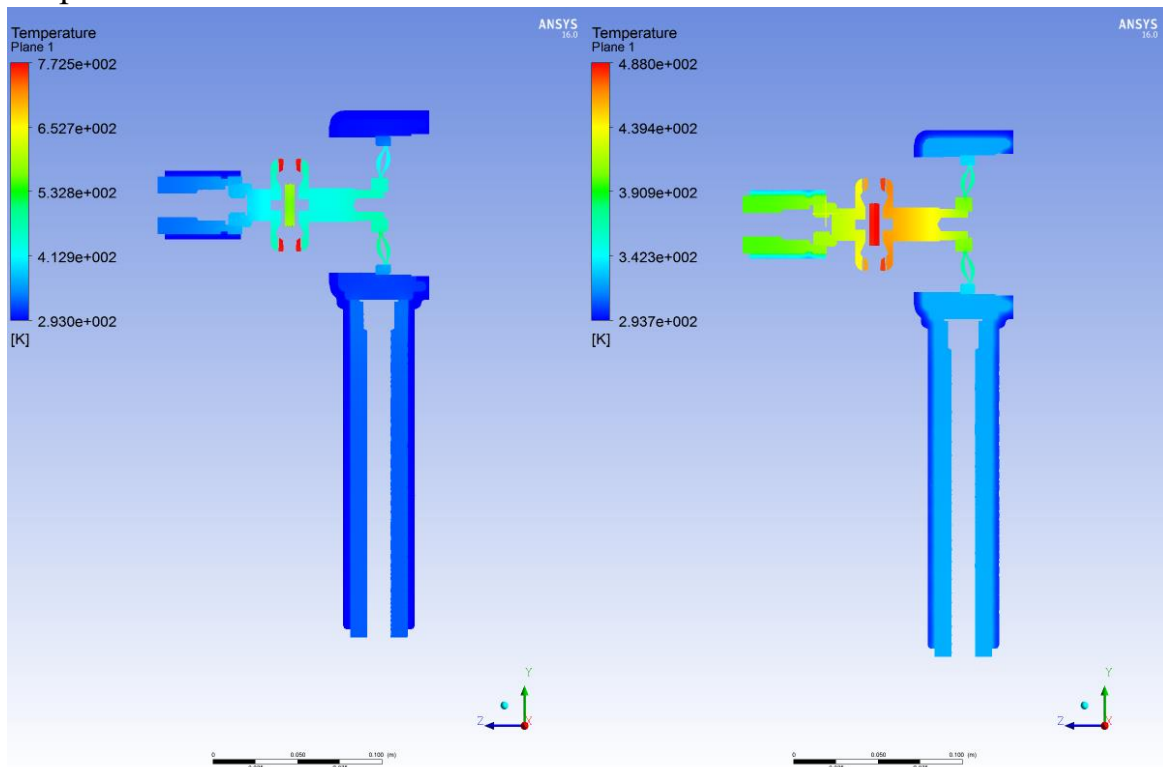


Рис. 36. Распределение температуры в ТВС и прилегающей изоляции в моменты времени 4с (слева) и 40с (справа)

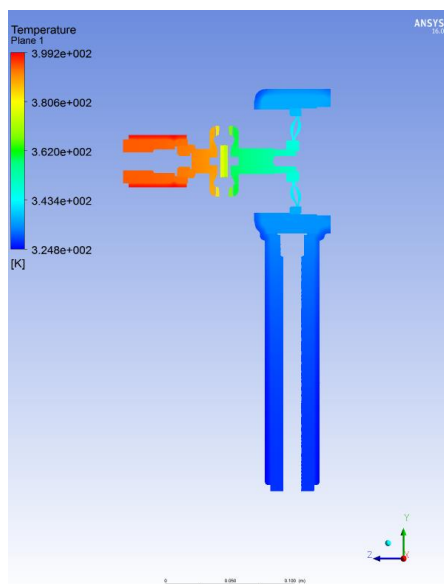


Рис. 37. Распределение температуры в ТВС и прилегающей изоляции в момент времени 340с

Для ТВС такие перегревы не опасны, но могут оказать влияние на свойства изоляции. Конечно, количественные результаты данного расчета не соответствуют действительности, поскольку не учтены некоторые элементы изоляции и ошиновка, через которые отводилась бы часть тепла. Тогда температура была бы меньше. Проблема также заключается в том, что для материалов, используемых в качестве изоляции вакуумных выключателей как правило указывается температура, при которой в течение длительного времени свойства материала не меняются, однако нет данных о том, насколько сильные термические воздействия может выдержать материал при их малой длительности. Впрочем, в данной модели перегрев изоляции ненамного превышает тот, который она может выдерживать длительной время. В таблице ниже указаны точные значения.

Элемент	Максимальный перегрев, °	Время, с	Допустимый перегрев, К°
Верхний терминал	122	90	640 (температура плавления алюминия)
Подвижная часть ГТ	189	4	180 (температура плавления покрытия О-Ви)
Ламели ГТ	220	4	180 (низкотемпературный отжиг меди для снятия напряжений) 480 (температура полного отжига меди)
Неподвижная часть ГТ	79	4	180 (температура плавления покрытия О-Ви)
Кольцо нижнего терминала	43	340	640 (температура плавления алюминия)

Вывод нижнего терминала (труба)	40	340	640 (температура плавления алюминия)
---------------------------------	----	-----	--------------------------------------

Таблица. Сравнение полученных в моделировании и допустимых перегревов.

Таким образом, рассчитывая нагрев ТТС необходимо рассматривать моменты времени после окончания протекания тока через ТВС, поскольку перераспределение тепловой энергии в устройстве приводит к тому, что максимальный нагрев отдельных частей достигается после окончания импульса тока и вполне может послужить причиной нагрева до критических температур.

Выводы

- Приближение эквивалентного тепловыделения на кажущейся контактной поверхности показывает хорошие результаты в случае нестационарного нагрева (длительностью импульса тока порядка секунд) и сильноточных контактов. В том случае, если участок ТВС с электрическим контактом не входит в область интереса, возможно провести моделирование данного участка с данным упрощением, получив при этом достаточно точные значения на границах, которые в дальнейшем можно использовать в качестве граничных условий для квазиодномерного приближения.

- При рассмотрении нагрева ТВС токами термической стойкости также необходимо уделять внимание процессам, происходящим после окончания действия тока. Перераспределение тепловой энергии может привести к значительному нагреву изоляции.

Заключение

В работе были рассмотрены особенности нагрева ТВС высоковольтных электрических аппаратов. С использованием квазиодномерного приближения оценена применимость метода Хольма-Кольрауша для расчета нагрева контактных пятен в условиях теплообмена с окружающей средой, асимметрии тепловых нагрузок и разной длительности нагрева. Метод позволяет рассчитывать температуру КП с погрешностью до 10% в случае рассмотрения нестационарного нагрева при длительности импульса тока более 10 мс. Метод оказался применим при теплообмене с окружающей средой (воздушное охлаждение и излучение) и асимметрии контактов с погрешностью до 10%.

Было показано, что при рассмотрении нагрева ТВС токами термической стойкости можно не моделировать контактные пятна, а заменить их условием эквивалентного тепловыделения на кажущейся контактной поверхности. Получаемые тепловые поля в обоих случаях отличаются не более, чем на 2% на сравнительно небольшом расстоянии от контактной поверхности. Такое приближение позволяет существенно упростить задачу о нагреве ТВС, если контактная поверхность не является областью интереса. Элементы ТВС, не содержащие электрических контактов возможно моделировать с использованием квазиодномерного приближения.

Также, немаловажным оказалось рассмотрение процессов, происходящих после окончания импульса нагревающего тока. За счет того, что различные элементы ТВС нагреты по-разному в момент выключения тока, происходит перераспределение тепловой энергии в системе. Часть тепла перераспределяется на изоляцию ТВС, которая имеет большую чувствительность к термическим воздействиям. Поэтому, при расчете нагрева токами термической стойкости необходимо уделять внимание перераспределению тепловой энергии и нагреву изоляции.

Список литературы

1. Хольм, Р. Электрические контакты. – М.:Иностр.литература, 1961. – 464 с.
2. Родштейн, Л.А. Электрические аппараты. – Л.: Энергоатомиздат, 1989. – 303 с.
3. Буль, Б.К., Буткевич, Г.В. Основы теории электрических аппаратов. – М.:Высшая школа, 1970. – 600 с.
4. Афанасьев, В.В. Справочник по расчету и конструированию контактных частей сильноточных электрических аппаратов. – Л.:Энергоатомиздат, 1988. – 384 с.
5. Электрические и электронные аппараты. В 2 т. Т. 1. Электромеханические аппараты: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Е. Г. Акимов и др.; под ред. А.Г.Годжелло, Ю.К.Розанова. — М. : Издательский центр «Академия», 2010. — 352 с.
6. Беляев, В. Л. Особенности работы и конструкций многоамперных электрических аппаратов: Учебное пособие / В. Л. Беляев – СПб. : Северо-Западный государственный заочный технический университет, 2005.
7. ГОСТ Р 52565-2006. Выключатели переменного тока на напряжения от 3 до 750 кВ. – М.: Стандартиформ, 2007. – 91 с.
8. ГОСТ 8024-90 Аппараты и электротехнические устройства переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Норма нагрева при продолжительном режиме работы и методы испытаний. – М.: Издательство стандартов, 1990. – 19 с.
9. ГОСТ 687-78 Выключатели переменного тока на напряжение свыше 1000 В. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 67 с.
10. Павлейно, О.М. Физические особенности нагрева сильноточных контактов, дис... канд.тех.наук.: 01.04.13. – СПб.: СПбГУ, 2015. – 148 с.
11. Павлейно, М.А. Расчетная методика ОТУ № «Нагрев номинальным током»: метод. пособие/ М.А. Павлейно, И.А. Елагин. – СПб.: СПбГУ. – 59 с.
12. Чалый А.М., Николаев П.О., Павлейно М.А. «Численное моделирование стационарных тепловых полей в токонесущих конструкциях», 3-я Всероссийская научная конференция «Проектирование инженерных и научных приложений в среде Matlab», СПб, октябрь 2007 г., стр. 308 – 319.
13. Slade, P.G., Electrical contacts: principles and applications. – N.Y.: CRC Press, 2014.

14. Мышкин, Н.К. Электрические контакты / Н.К. Мышкин, М. Браунович, В.В. Кончиц. – М.:Интеллект, 2008. – 560 с.