

Работа выполнена в Московском Энергетическом Институте (Техническом Университете)  
E-mail: [kurneshoaa@mail.ru](mailto:kurneshoaa@mail.ru)

В настоящее время все большее развитие получают установки изостатического прессования, рассчитанные на работу при давлении до 2000 атм и температуре до 2000 °С [1]. Их достоинствами являются:

- весьма высокие физико-механические характеристики получаемых материалов: равномерные, легко регулируемые плотность, структура, химический состав, текстура;
- сколь угодно сложная форма получаемых изделий, требующих минимальной механической обработки после прессования либо вообще обходящихся без такой обработки;
- возможность 100%-ного уплотнения порошков при значительно более низких температурах, облегчающая процесс управления структурой и свойствами изделий;
- малые потери и экономичность, что особенно важно для обработки дорогостоящих, токсичных и радиоактивных материалов;
- возможность получения уникальных композиционных и составных конструкций, в том числе с внутренними полостями и из разных материалов;
- возможность залечивания внутренних дефектов, диффузионной сварки и др.

Возможности изостатических методов столь уникальны, что в ряде случаев они оказываются вне конкуренции с другими технологиями получения материалов. В настоящий момент во всем мире более 1000 единиц подобного оборудования находятся в промышленной эксплуатации. В России наибольшее распространение получили прессы горячие изостатические (газостаты) и прессы для компактирования порошковых материалов. Многие из них находятся в эксплуатации на протяжении последних 25 лет, что подчеркивает их надежность и ремонтпригодность.

Одним из важнейших элементов газостата является система электронагрева. Резистивные нагреватели, применяемые в газостатах высокого давления, размещаются по боковым стенкам и в нижней части рабочей камеры. Боковой нагреватель выполняется наиболее часто из углерод-углеродного композита в виде цилиндра, свернутого из плоского листа с



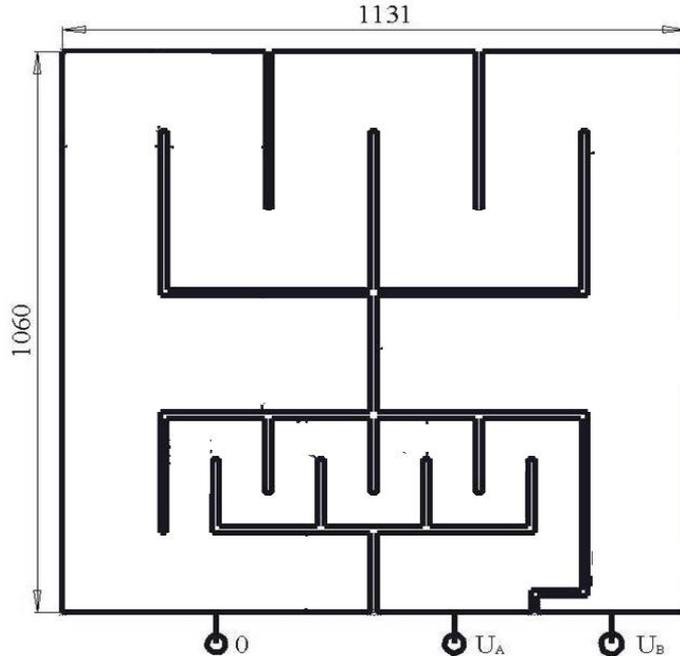
прорезями, так как именно этот материал наименее требователен к рабочей среде, в частности, к газам, выделяющимся во время процесса. Нижний плоский нагреватель изготавливается из того же материала, что и боковой. Типичная конструкция газостатов высокого давления с резистивной нагревательной системой показана на рис. 1. Подвод электроэнергии к боковому нагревателю осуществляется через верхнюю запирающую крышку, а к донному нагревателю - через нижнюю крышку.

**Рис. 1. Конструкция газостата высокого давления и температуры с резистивной нагревательной системой**

Нагреватели являются основными элементами установки, поэтому возникает задача увеличения ресурса их работы. Наиболее важным фактором при проектировании нагревателя является его геометрия, за счет которой обеспечивается многозонность нагрева и требуемое распределение температуры. При этом недопустим локальный перегрев нагревателя, обусловленный распределением плотности тока в нем [2].

Цель данной работы заключается в разработке метода моделирования распределения плотности тока в нагревателях и получении рекомендаций по уменьшению неравномерности температурного поля в нагревателе. Наиболее эффективным способом решения двухмерной задачи расчета распределения плотности тока в плоских нагревателях является использование современных программных пакетов, основанных на использовании метода конечных элементов [3, 4,5].

Метод конечных элементов успешно применяется в тех случаях, когда проблема не поддается решению аналитическими способами и невозможно прямое экспериментальное измерение. На этом методе основываются многие современные пакеты моделирующих программ в данной области: Elcut (разработка г. Санкт-Петербург), PROMETHEUS, Faraday и

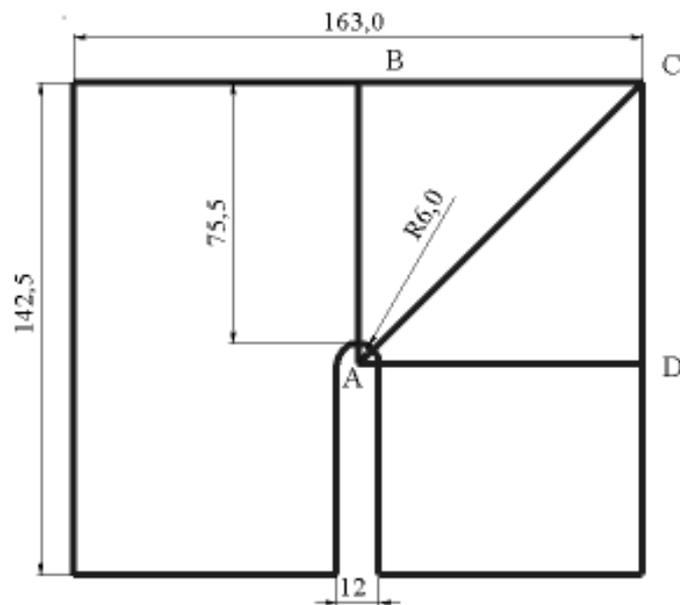


Oersted (разработка кафедры электротермии технического университета Ильменау, Германия), Ansys (США) и т.п. По сравнению с другими пакетами возможности Elcut ограничены [5]. Однако основные ограничения довольно легко преодолеваются. Например, Elcut не позволяет моделировать трехмерные объекты, однако тепловой узел газостата, с точки зрения геометрии, является обычно телом вращения, а осесимметричные задачи с помощью Elcut могут решаться. Композитный нагреватель является двухмерной структурой, а это значит, что он может быть представлен в виде плоской задачи.

**Рис. 2. Плоская развертка нагревателя из углерод-углеродного композиционного материала**

В данной работе проведено исследование нагревателя из углерод-углеродного композиционного материала с размерами: наружный диаметр - 734 мм, толщина стенки - 12 мм, высота - 1050 мм.

Ввиду того, что нагреватель имеет большой наружный диаметр по сравнению с толщиной, его можно представить в виде плоской двухмерной модели рис. 2. Питание нагревателя осуществляется через нижнюю его часть, которая находится в холодной зоне, что позволяет осуществить подвод питания. Питание разделено на две зоны: нижний контур и верхний контур. Контур образован путем выпиливания фрезой в теле нагревателя (тонкостенной трубы из УУКМ) пропилов шириной 12 мм. Каждый контур отвечает за свою зону нагрева и управляется независимо. Благодаря этому можно добиться малого градиента температур по высоте загрузки, что особенно важно при горячей изостатической обработке изделий из тугоплавких металлов, например, турбинных лопаток двигателей для летательных аппаратов. Плоская модель нагревателя представляет собой набор довольно простых элементов имеющих общую геометрию рис. 2, а значит и схожие особенности.



**Рис. 3. Расчетная схема П-образного элемента**

Наиболее характерным элементом является П-образный элемент нижнего контура нагревателя: рис. 3, так как он содержит в себе все необходимое для составления представления об особенностях плоского нагревателя. Причем основным фактором, влияющим на долговечность нагревателя, является его температура, которая напрямую зависит от плотности тока в каждой точке нагревателя. Если среднее значение плотности тока ( $J_{cp}$ ) является допустимым, то максимальные значения ( $J_{max}$ ) на некоторых участках нагревателя приводят к значительному увеличению выделяющейся мощности, перегреву и преждевременному износу нагревателя в этих местах.

Для анализа результатов предлагается рассмотреть распределение плотности токов в П-образном элементе по заданным направлениям АВ, АС, АД, см. рис. 3.

Моделирование в среде Elcut дает следующее распределение плотности токов по данным направлениям, показанное на рис. 4. Как видно из графика, плотность тока сильно снижается в углах П-образного элемента. Поэтому данную область целесообразно исключить из рассмотрения и перейти к модели элемента со скругленными краями (рис. 5), учитывающей только активную область распределения плотностей токов. Решая данную задачу, были получено распределение плотностей токов по сечениям, показанное на рис. 6. Отметим, что переход от модели рис. 3 к модели рис. 5 практически не изменяет кривую распределения плотности токов  $J$ , погрешность вычисления при переходе не превышает 2 %.

**Рис. 4. Распределение плотности тока  $J$  по направлениям АВ – АС П-образного элемента нижнего контура нагревателя**

Таким образом, рассмотрение возможности улучшения характеристик нагревателя сводится к изучению влияния ширины пропила модели со скругленными углами (рис. 5) на рас-

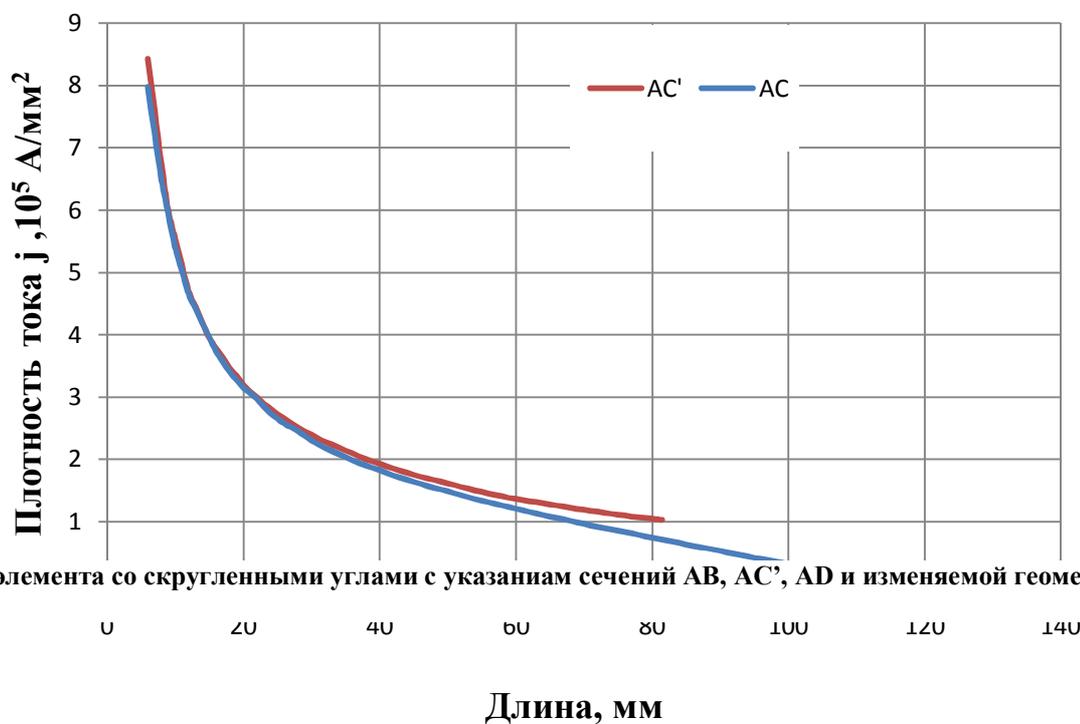


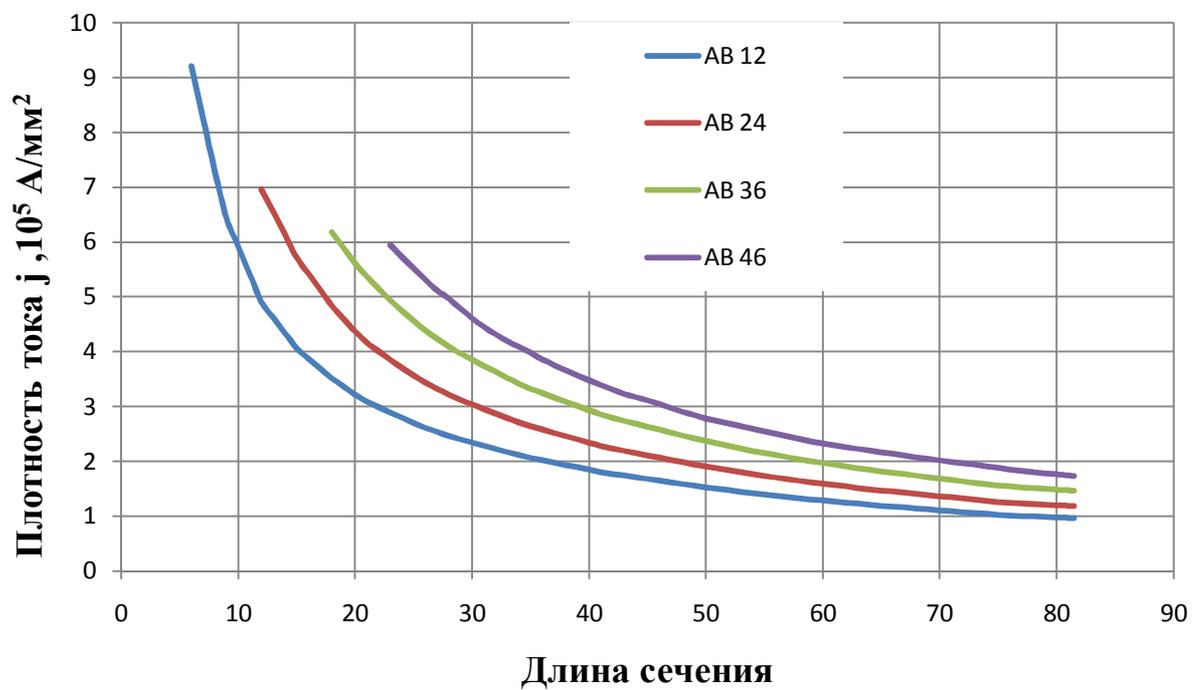
Рис. 5. Расчетная схема элемента со скругленными углами с указанием сечений АВ, АС', АД и изменяемой геометрией сечения

пределение плотности тока. Ширину пропила целесообразно изменять в пределах от 12 до 46 мм, так как при ее дальнейшем увеличении возникает риск существенного снижения прочности нагревателя и увеличения среднего значения плотности токов выше допустимого. Причем, лучше изменять ширину не всего пропила, а только его скругления, так это не повлечет сильных изменений параметров нагревателя в целом и позволит оставить без изменений систему питания и управления.

Для выявления тенденции в исследовании рассматривались значения радиуса пропила 6, 12, 18 и 23 мм. Как наиболее характерное взято сечение АС' рис.5, охватывающее область наименьшего и наибольшего значения плотностей токов. Полученные характеристики отражены на рис. 7. Видно, что увеличение радиуса пропила ведет к сглаживанию неравномерности распределения плотности токов, при котором мы не получаем новых зон локального перегрева тела нагревателя. Такой раскрой можно рекомендовать как оптимальный для данного элемента.

Рис. 6. Распределение плотности тока в П-образном и С-образном элементах по направлению АС

Для реального нагревателя значение пропила составляет 12 мм, он разделен на две зоны, имеющие независимый подвод питания и общий ноль (рис 2). Для получения электрических и энергетических характеристик был взят П-образный элемент нижнего контура, т.к.



именно нижней контур несет на себе основную нагрузку по нагреву и поддержанию заданной температуры рабочей камеры газостата, верхний же контур обеспечивает необходимый градиент температур по высоте. Для рассмотренных моделей граничные условия заданы с таким расчетом, что ток, протекающий по телу нагревателя, равнялся 300 А. Распределение плотности токов по направлению АВ для скругленного элемента представлено на рис. 6. При этом видно неравномерность в распределении плотности существенно уменьшается.

Рис. 7. Распределение плотности тока в сечении АВ для различных значений радиуса пропила 6, 12, 18 и 23 мм (кривые 1 – 4 соответственно)

Проверка адекватности и правильности представленных моделей основана на решении задачи для цельного плоского нагревателя с его электрическими и энергетическими характеристиками проведено сравнение с экспериментальными данными. При анализе задач электрического поля переменных токов рассчитывается электрическое поле, токи утечки и потери в проводниках в переменном электрическом поле. Формулировка задачи основана на уравнении Пуассона, описывающего электростатическое поле ( $\nabla \varepsilon \mathbf{E} = \rho$ ), и уравнении растекания токов в проводящей среде ( $\nabla \mathbf{j} = -i\omega \rho$ ) при учете закона Ома,  $\mathbf{j} = g\mathbf{E}$ . В уравнение для электрического потенциала  $U$  имеет вид:

$$\nabla * \left( \left[ \varepsilon - \frac{ig}{\omega} \right] * \nabla U \right) = 0$$

где электропроводность  $g$  и компоненты тензора диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_z$

и  $\varepsilon$ , постоянны внутри каждого блока модели.

Условие Дирихле задает известное значение электрического потенциала  $U_0$  на рёбрах или в вершинах модели. Значение  $U_0$  на ребре может быть задано в виде функции от координат. Параметры задающей линейной функции могут варьироваться от ребра к ребру, но должны быть подобраны так, чтобы избежать разрывов функции  $U_0$  в точках соприкосновения границ. Условие Дирихле задает известное значение электрического потенциала  $U_0$  на ребрах или в вершинах модели.

Чтобы задача была сформулирована корректно, необходимо задать условие Дирихле хотя бы в одной точке расчетной области. Если область представляет собой набор физически не связанных подобластей (компонент связности), то условие Дирихле должно быть задано хотя бы в одной точке каждой такой подобласти.

Условие Неймана:

$$j_n = j \quad - \text{ на внешних границах,}$$

$$j_n^+ - j_n^- = j \quad - \text{ на внутренних границах,}$$

где  $j_n$  – нормальная составляющая компонента плотности тока, индексы “+” и “-” означают “слева от границы” и “справа от границы” соответственно, и  $j$  в правой части уравнения – плотность внешнего тока. Если  $j$  равно нулю, граничное условие называется однородным. Однородное условие Неймана является естественным, оно устанавливается по умолчанию на всех тех сторонах, составляющих внешнюю границу, где явно не указано иное граничное условие.

Для рассмотренных моделей граничные условия заданы с таким расчетом, что ток, протекающий по телу нагревателя, ровнялся 300 А. Распределение плотности токов по направлению АВ для скругленного элемента представлено на рис. 6.

Проведен анализ точности численных решений в зависимости от разбиения на конечные элементы.

После определения оптимальной геометрической формы предложено сравнение изменения от данного параметра электрических характеристик нагревателя в целом.

Для составления общей картины распределения плотности токов было проведено моделирование нижнего и верхнего контуров нагревателя в целом. Это позволило проверить адекватность модели путем сравнения результатов расчета и эксперимента.

Основные данные для расчета по программе ELCUT: тип задачи – электрическое поле переменных токов; класс модели – плоская  $L_z = 12$  мм; частота – 50 Гц; электропроводность – 27320 См/м (соответствует температуре 180-270<sup>0</sup>С); значение пропила – 12 мм.

Результаты электрического расчета по программе ELCUT для нижнего и верхнего контуров данного нагревателя представлены ниже:

	Напряжение, В	Ток, А	Активная мощность, Вт
Нижний контур	26,1	485,87	22127
Верхний контур	25,3	432,21	20036

Экспериментальные данные исследования нагревателя были получены на промышленном газостате Г6501 они приведены в табд.1, где  $T_A$ ,  $T_B$  - показания термопар нижней и верхней зон нагрева соответственно;  $U_A$ ,  $U_B$  – напряжение нижнего и верхнего контуров нагревателя;  $I_A$ ,  $I_B$  - ток нижнего и верхнего контуров нагревателя

Таблицы 1. Данные экспериментальных исследований нагревателя

Время, мин	$T_A$ , °C	$T_B$ , °C	$U_A$ , В	$U_B$ , В	$I_A$ , А	$I_B$ , А
15	46	132	26,4	21,6	420	420
30	138	227	26,4	25,3	433	438
45	178	274	26,1	25,3	482	442

Сравнение данных эксперимента при выходе на стационарный температурный режим (время 45 мин) и данных моделирования показывает их хорошее совпадение. При расчетных значениях напряжений на нижнем и верхнем контурах нагревателя, равных экспериментальным значениям, расхождение токов минимальны, а именно для нижнего контура: расчет – 485,87 А и эксперимент – 482 А, для верхнего контура: расчет – 432,21А и эксперимент – 442 А, что доказывает адекватность модели.

#### Выводы

Результаты, полученные в ходе моделирования в среде Elcut, наглядно отображают процессы растекания плотности токов и распределения выделяющейся мощности в нагревателе. По результатам моделирования можно дать рекомендации по конструированию нагревателя из углерод-углеродного композиционного материала, в частности по значению ширины пропила. Сравнение результатов расчетов, полученных при моделировании в программной среде Elcut, с экспериментальными данными подтверждает адекватность разработанных моделей.

По предварительной оценке, в результате использования данных рекомендаций по совершенствованию конструкции нагревателя возможно увеличение ресурса его работы на 10 %.

Литература:

1. **Процессы изостатического прессования**/ Под ред. Джеймса П.ДЖ.: Пер. с англ. Под ред. Папирова И.И. и Пахомова Я.Д.// Сборник статей – Москва: Металлургия, 1990, 192с
2. **А.Д. Свенчанский.** Электрические промышленные печи. Учебник для вузов. В 2-х ч. - Ч.1.. Электрические печи сопротивления – М.: «Энергия», - 1975 384с.
3. **Михлин С.Г.** Вариационные методы в математической физике./ Михлин С.Г. – М.: «Наука», 1970 512с.
4. **Лунин В.П.** Метод конечных элементов в задачах прикладной электротехники. - 1996. - Учебное пособие
5. ELCUT. Комплекс программ моделирования двумерных физических полей с помощью метода конечных элементов. Версия 5.5. Руководство пользователя. СПб.: НПКК “ТОР”, 1995. 212 с