

**«ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННОЙ
СИСТЕМЫ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ»**

Авторы: Карнышов Александр Александрович,
ученик 10 класса МБОУ «СОШ № 61»;
Дмитриев Дмитрий Витальевич,
ученик 10 класса МБОУ «СОШ № 61».

Научный руководитель: Квасов Виктор Алексеевич,
учитель информатики МБОУ «СОШ № 61».

Кемерово, 2016 г.

ВВЕДЕНИЕ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Технологические процессы, связанные с переработкой сыпучих материалов (транспортировка, перемешивание, сушка) используются в различных областях промышленности. Моделирование таких процессов является актуальной задачей при внедрении новых конструктивных решений и энергосберегающих технологий. При решении задач обеспечения необходимого теплового состояния исследуемого полифункционального электромеханического преобразователя (ПЭМП), представленного на рисунке 1, предусматривающего полное использование выделяемой тепловой энергии и совмещение несколько функций в одном устройстве [1], необходимо подробное знание механизма теплообмена в замкнутом пространстве между твердыми телами (активными элементами) и омывающим их воздухом, а также гидродинамических и теплофизических свойств перерабатываемого материала.

Анализ исследований и публикаций.

В работе [2] представлен расчет тепловых полей в электрической машине с независимой аксиальной системой вентиляции методом конечных элементов (МКЭ), для поперечного сечения активной зоны двигателя. Известна также комплексная математическая модель [1], позволяющая вести исследование в расчетном поперечном сечении активной части ПЭМП электромагнитных и тепловых полей. Также в работах [3-5] проведено численное моделирование теплообменной системы ПЭМП шнекового типа в двумерной постановке. Однако эти модели, так как рассчитывались плоская задача, не учитывают всех особенностей системы вентиляции, скорость и характер движения охлаждающего воздуха в характерных каналах. С помощью них невозможно в достаточной степени проанализировать процесс передачи тепловой энергии в технологическую зону переработки сырья.

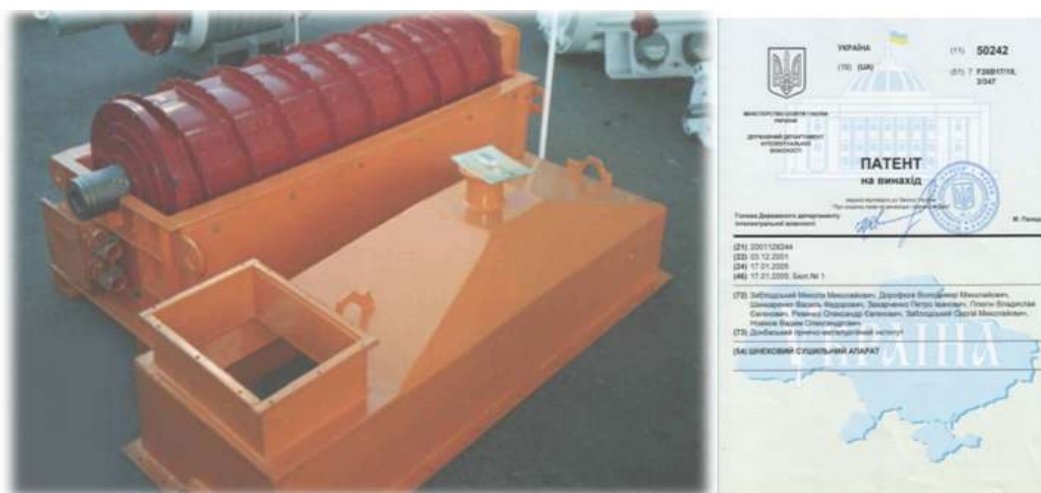


Рисунок 1 – Полифункциональный электромеханический преобразователь шнекового типа.

Для правильного решения уравнения теплопроводности должны быть определены условия теплообмена с охлаждающей средой на границе твердых тел. Это означает, что, по меньшей мере, должна быть известна скорость движения охлаждающей среды во всех каналах тракта охлаждения.

Таким образом, результаты вентиляционного и гидравлического расчетов определяют граничные условия для уравнения теплопереноса [2].

Сложность описания вентиляционных, гидродинамических и теплообменных процессов, необходимость координации потоков энергии, а также нетрадиционная для современных асинхронных машин конфигурация вентиляционного тракта и режимы работы устройства нуждается в глубоких теоретических и экспериментальных исследованиях с применением численных методов расчета.

Постановка задачи.

В работе приводится трехмерное численное моделирование теплообменной системы полифункционального электромеханического преобразователя для энергосберегающих технологий.

Изложение материала и его результаты.

ПЭМП представляет собой сложную систему с внутренними источниками тепла [1]. Расчет переходных тепловых процессов в конструкциях такого рода даже в тех случаях, когда нас интересует не подробное распределение температурного поля, а только интегральная числовая характеристика тепловой инерционности требует точного учета геометрии расчетной области и не может проводиться с использованием идеализированных моделей.

Применительно к рассматриваемым в данной работе процессам вентиляции и теплообмена важным недостатком инженерных методов является то, что они не дают практически никакой информации о локальных характеристиках этих процессов (полях скорости, температуры и концентрации примеси). В результате, даже в том случае, когда спроектированная на основе таких методов система в среднем удовлетворяет заложенным при проектировании требованиям, нет никакой гарантии, что она обеспечивает достаточное охлаждение отдельных частей охлаждаемого узла. Применение стандартных инженерных методик расчета для таких объектов часто приводит к существенным ошибкам в оценке эффективности тех или иных конструктивных решений, а иногда и к качественно неверным выводам об их относительных преимуществах или недостатках, что в свою очередь, оборачиваются большими материальными потерями.

Среди численных методов решения задач в различных областях, получивших наибольшее распространение, ведущее положение занимает метод конечных элементов (МКЭ), который рассматривается сегодня, как способ решения задач, описываемых уравнениями математической физики в частных производных.

Для решения поставленной задачи было выбрано среду физического моделирования Comsol Multiphysics, использующую МКЭ.

COMSOL Multiphysics предназначен для моделирования и расчетов задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных. В основу программного пакета COMSOL Multiphysics заложен численный метод решения задач прикладной физики - метод конечных элементов. Программное обеспечение пакета позволяет осуществлять адаптивное построение сетки и контроль ошибок при работе с различными численными решателями.

Схему применения МКЭ в данной программе можно кратко описать следующими пунктами:

1. Задача формулируется на языке дифференциальных уравнений.
2. Дифференциальные уравнения заменяются соответствующими функционалами, задача сводится к поиску минимумов функционалов.
3. Вся модель разбивается на элементы (так называемой конечно-элементной сеткой).
4. Для каждого элемента выбираются пробные функции, чаще всего полиномы, и для них записываются граничные условия (например, известные температуры, скорости, давления в модели), функционал представляется как сумма интегралов пробных функций по элементам.
5. Путем решения систем линейных алгебраических уравнений ищутся минимумы функций.
6. Результатом считается совокупность результатов вычислений для всех элементов [6].

После решения задачи по приведенному выше алгоритму (пункты 4-6) результаты сохраняются и передаются в качестве граничных условий на следующий шаг. Так продолжается до тех пор, пока либо не будет достигнута нужная сходимость решения (т.е. разность результатов по температуре, скорости или давлению на соседних шагах меньше заданного числа), либо не исчерпается лимит итераций.

Задача моделировалась в трехмерной геометрии.

Для получения трехмерного температурного поля ПЭМП необходимо было решить задачу нестационарного сопряженного теплообмена с вынужденной конвекцией. Для этого необходимо было сначала получить поля течения воздуха, а потом рассчитывать поле температур.

Математическая модель для потока охлаждающего воздуха где учтена к-ε модель турбулентности, использующая осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса подробно описана в [4].

Для режима теплопереноса граничные условия имеют следующий вид:

- граничное условие Неймана на внутренних поверхностях:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -q_i ; \quad (1)$$

- температура на входе в полый вал:

$$T = T_0 \quad ; \quad (2)$$

- конвективный поток на выходе:

$$q \cdot n = (\rho \cdot C_p \cdot u \cdot T) \cdot n \quad ; \quad n \cdot (-k \nabla T) = 0 \quad ; \quad (3)$$

- для внутренних границ:

$$n_u = (-k_u \nabla T_u + \rho_u C_{p,u} u_u T_u) - n_d (-k_d \nabla T_d + \rho_d C_{p,d} u_d T_d) = 0 \quad . \quad (4)$$

В данной статье рассматривается один из этапов трехмерного численного моделирования ПЭМП – при неподвижном роторе и без перерабатываемого материала.

Вычислительный эксперимент проводился при следующих заданных параметрах охлаждающего воздуха: $v_{\max} = 32$ м/с (расход нагнетающего вентилятора $G = 1200$ м³ / час) – скорость на входе в полый вал; $\eta = 1,79 \cdot 10^{-5}$ Па · сек – динамическая вязкость; $\rho = 1,205$ кг/м³ – плотность.

В качестве исходных данных принято:

- сердечник статора двигательного модуля длиной $L_1 = 500$ мм имеет 14 аксиальных каналов диаметром $D_{с.д.} = 30$ мм;

- сердечник статора тормозного модуля длиной $L_1 = 450$ мм имеет 14 аксиальных каналов диаметром $D_{с.т.} = 30$ мм;

- общий для обоих модулей полый внешний ротор длиной 1436мм и диаметром $D = 398$ мм выполнен из стали марки Ст.3, имеет 6 аксиальных каналов, в виде равносторонних треугольников с размером стенки $a = 50$ мм, и 30 отверстий в аксиальных каналах форсуночного типа диаметром 5мм. Винтовая навивка ПФР имеет 16 витков с высотой лопатки 80мм;

-воздушный зазор между статором и ротором для каждого модуля $\delta = 2$ мм;

- общий для обоих модулей полый вал имеет длину $L=1832$ мм и внутренний диаметр $D = 120$ мм;

- выходной патрубков для паровоздушной смеси имеет диаметр $D_{в.п.}=250$ мм.

На рисунке 2 изображена модель ПЭМП шнекового типа в разобранном виде, созданная в Comsol Multiphysics.

Изображенная на рисунке 3 сетка конечных элементов сгенерирована с помощью сеточного генератора, который автоматически сгущает конечные элементы (уменьшает их размеры) на участках области с повышенным градиентом полевой функции. И, наоборот, на участках с однородным характером распределения поля размеры элементов автоматически увеличиваются [7].

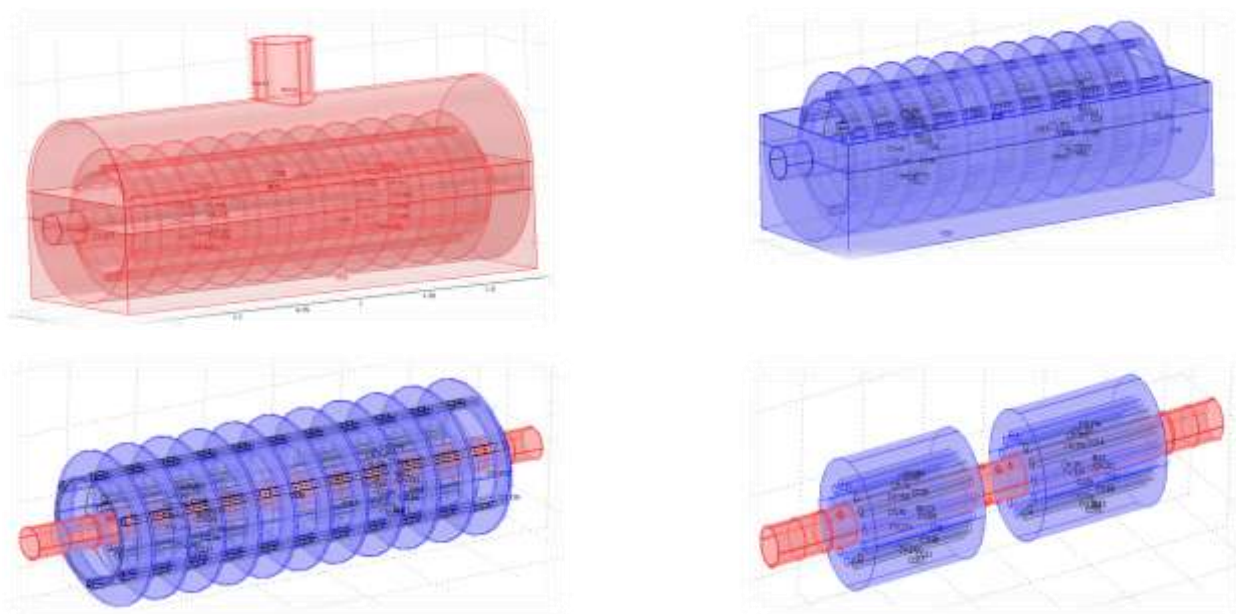


Рисунок 2 – Элементы конструкции ПЭМП шнекового типа, построенные в среде Comsol Multichysics.

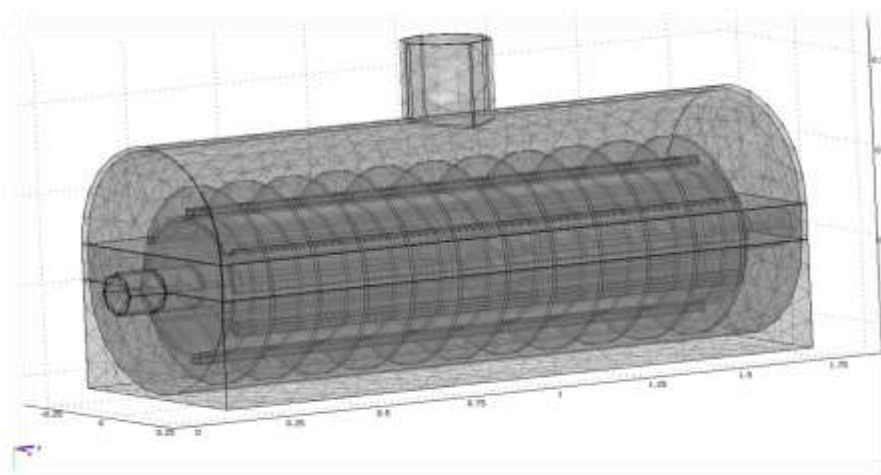


Рисунок 3 – Расчетная сетка конечных элементов

На рисунке 4 представлена, полученная в результате моделирования картина распределения воздушных потоков в вентиляционном тракте ПЭМП.

Анализ картины распределения параметров воздушных потоков (скорости, давления, плотности и др.) в различных сечениях устройства позволяет определить оптимальное давление для эффективного охлаждения активных частей и тем самым снизить расход сжатого воздуха и энергоёмкость устройства. После расчета параметров воздуха в различных точках вентиляционного тракта устройства можно построить кривые распределения давления и скорости возду-

ха, его плотности и других характеристик. Например, на рисунке 5 представлен график изменения скорости воздуха вдоль полого вала ПЭМП.

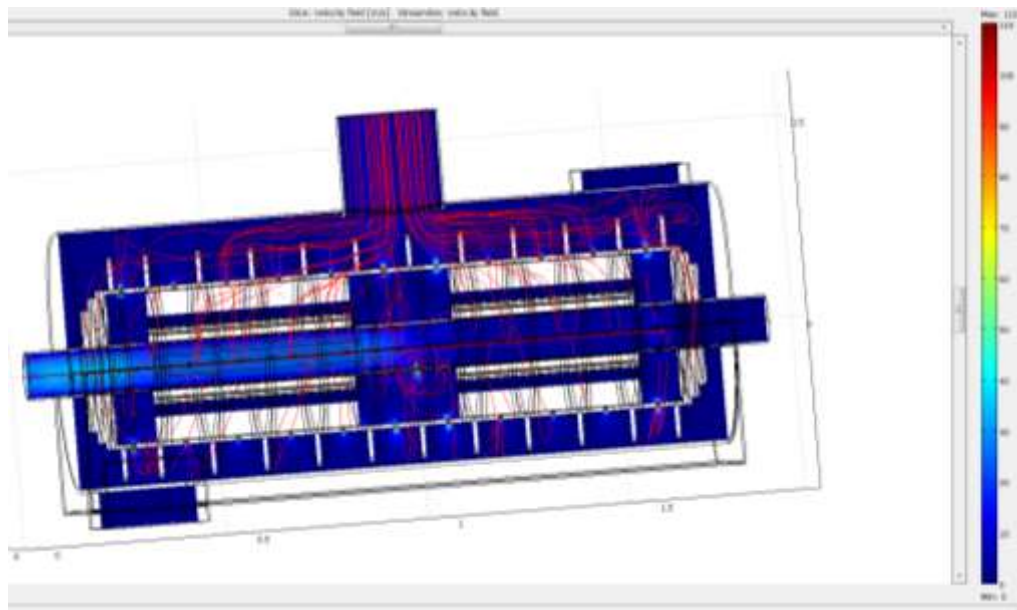


Рисунок 4 – Картина распределения воздушных потоков в ПЭМП

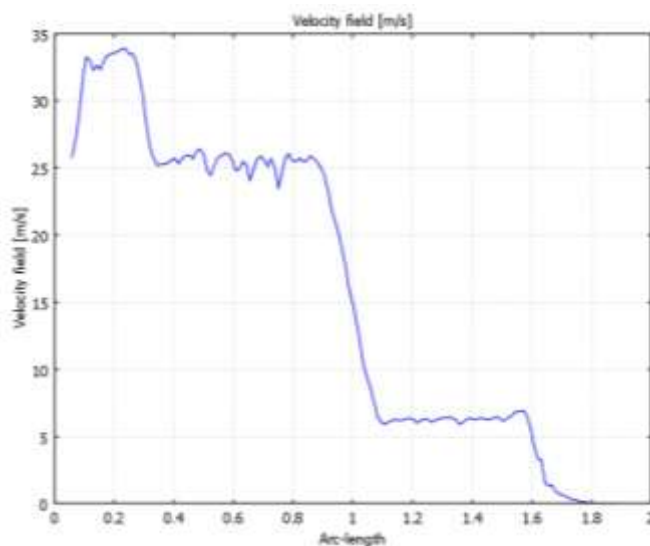


Рисунок 5 – Распределение скорости воздуха по длине полого вала ПЭМП

Периодическая пульсация возникает при срыве потока с поверхности плохо обтекаемого тела в области гидравлического прыжка, на участке резкого расширения трубы или канала. Что четко прослеживается на рисунках 6-8 – прерывистое изменение по амплитуде и по величине скорости потока воздуха при выходе из форсуночных отверстий ротора на различном расстоянии.

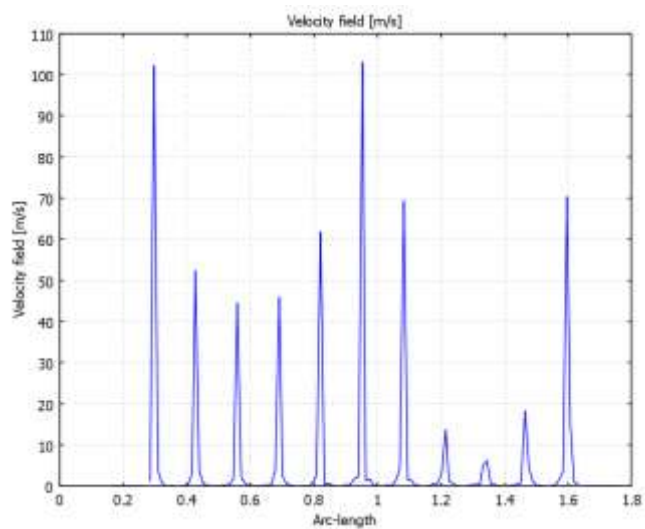


Рисунок 6 – Пульсации скорости воздуха вдоль ротора ПЭМП (расстояние от поверхности – 5 мм).

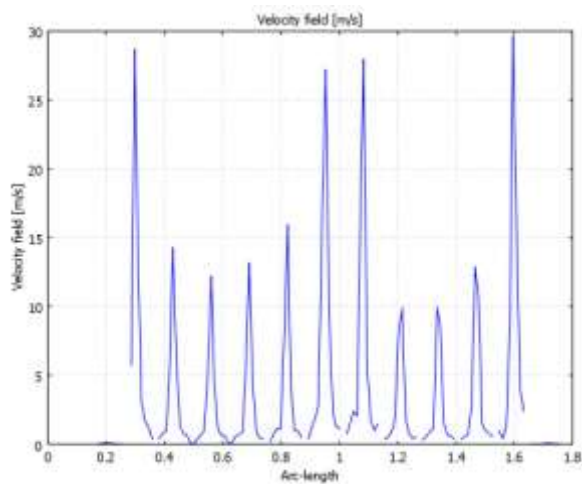


Рисунок 7 – Пульсации скорости воздуха вдоль ротора ПЭМП (расстояние от поверхности – 50 мм)

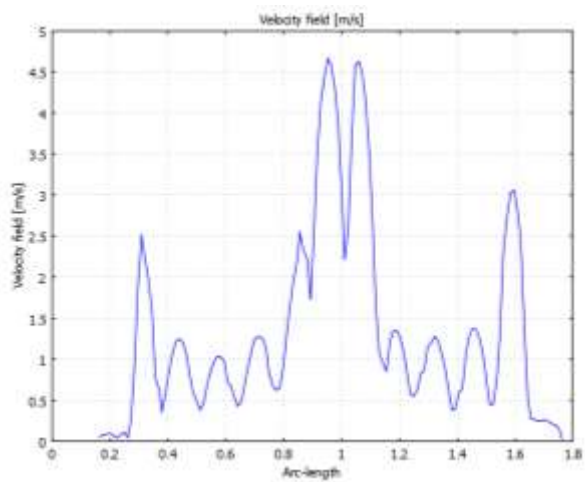


Рисунок 8 – Пульсации скорости воздуха вдоль ротора ПЭМП (расстояние от поверхности – 200 мм)

Пульсация силы давления может вызывать вибрацию элементов при протекании воздуха через них. Чем меньше масса характерного элемента, тем больше его вибрационные колебания, обусловленных силой давления потока. В нашем случае подобные вибрации оказывают положительное влияние на процесс сушки материала, обеспечивая его дополнительное перемешивание.

Амплитуда пульсационных колебаний давления и силы давления пропорциональна квадрату скорости потока, ввиду чего значение динамичности нагрузки от воздушного потока быстро возрастает с увеличением скорости этого потока.

Течение воздушного потока, охлаждающего детали ПЭМП, происходит с учетом турбулентного перемешивания, что позволяет увеличить скорость и общий объем охлаждающего воздуха, а также оптимизировать его поток.

Как описано в [6], в подавляющем большинстве случаев потоки воздуха от вентиляторов через охлаждающие каналы двигателя существенно турбулентны, то есть воздух протекает хаотично с множеством завихрений. Турбулентность является дополнительным инструментом для интенсификации теплообмена, т.к. она обуславливает проникновение пульсаций внешнего течения в пограничный слой обтекаемых тел и взаимодействие вихревых структур основного потока и зон отрывного течения.

Увеличение скорости оборотов и воздухопотока собственно вентилятора не может обеспечить оптимальный температурный режим двигателя, так как это неизбежно приводит к увеличению и турбулентности воздухопотока через тракт охлаждения, то есть реальный прирост воздухопотока сквозь систему будет существенно меньше прироста числа оборотов вентилятора. Но добиться ламинарного течения потока воздуха в такой системе в принципе невозможно, поэтому был подобран самый оптимальный режим воздухопотока, при котором происходит максимальный теплоотвод в технологическую зону переработки сырья.

На рисунке 9 изображена, полученная в результате моделирования, картина распределения тепловых потоков в ПЭМП, мощностью 75 кВт, где объемная цветовая шкала соответствует значению температуры, а стрелками показано распространение тепловых потоков.

Чем выше скорость вентилятора и потока воздуха, тем больше его турбулентность и, следовательно, вихревые турбулентные микропотоки вблизи поверхностей охлаждения лучше всего отводят от него тепло. Однако, с другой стороны, турбулентность существенно снижает эффективность (скорость) протекания воздуха сквозь тракт охлаждения. Теплый воздух там задерживается, вновь и вновь соприкасаясь с поверхностью характерного канала, что ухудшает теплоотвод в целом.

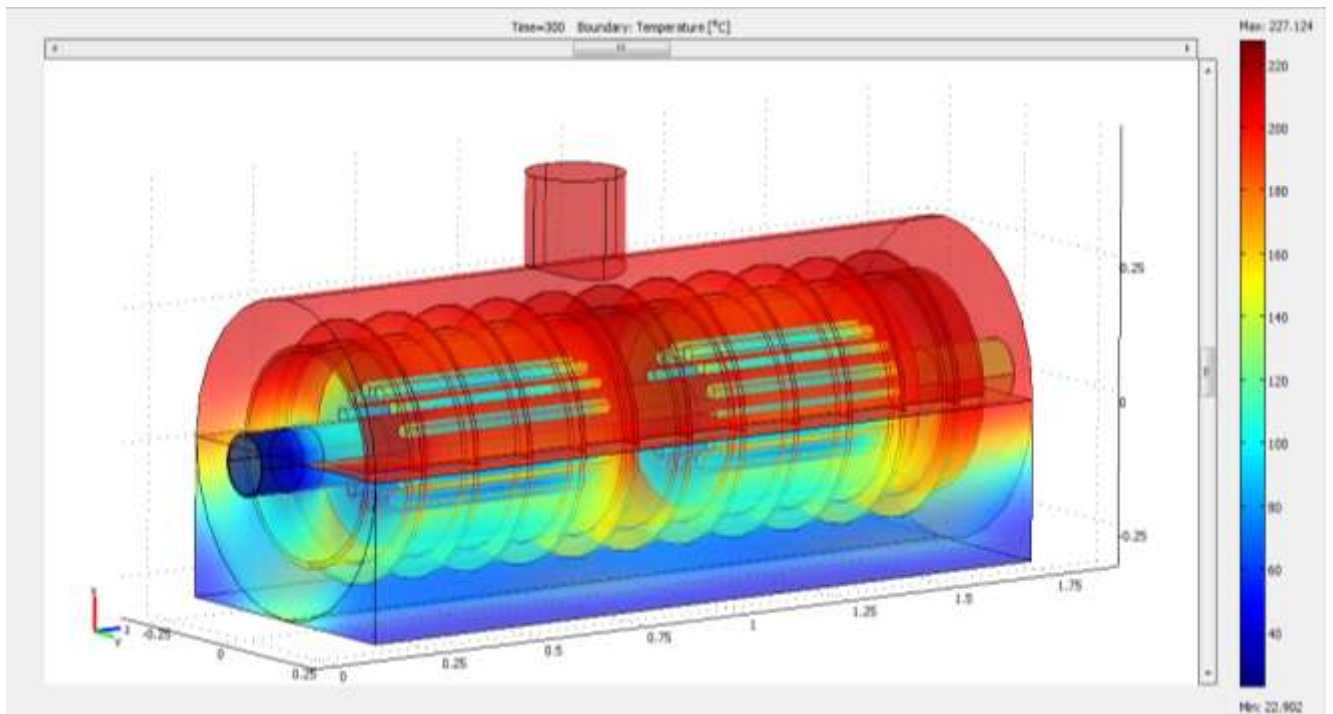


Рисунок 9 – Распределение тепловых потоков во внутреннем объеме ПЭМП

Анализируя картину распределения тепловых потоков, можно отследить динамическое распределение тепловых потоков в каждой точке теплообменной системы ПЭМП. Причем, температура верхней части ротора в обоих случаях остается практически одинаковой, около 225°C . Отсутствие перерабатываемого материала и неподвижность массивного ротора приводит к тому, что температура в нижней части ПЭМП достигает значения порядка 140°C . Это свидетельствует о том, что система вентиляции, осуществляет качественный отбор тепловой энергии и реализует работу системы охлаждения так, что рабочая температура обмоток статоров остается минимально возможной для заданного режима работы – «Стоянка под током».

ВЫВОДЫ

В результате исследования была решена задача нестационарного теплопереноса внутри ПЭМП шнекового типа в трехмерной постановке. Результаты моделирования показывают, что при нагреве активных элементов ПЭМП тепловыделения распределяются неравномерно по всему внутреннему объему и подлежат тщательному анализу как при оптимизации конструкции ПЭМП, так и при построении системы управления нагревом.

В будущем анализ полученной графической информации, локальных и интегральных характеристик тепловых потоков, а также серии расчетов в совокупности с решением оптимизационных задач позволит правильно выбрать, как оптимальный режим передачи тепловой энергии в зону переработки сырья, так и конструктивные решения при проектировании теплообменных систем подобных технологических агрегатов.

На наш взгляд, актуальность проблемы эффективности использования энергии является бесспорным аргументом при разработке внедрении и дальнейшем исследовании новых теплогенерирующих устройств – полифункциональных электромеханических преобразователей (ПЭМП) технологического назначения, которые служат для переработки сыпучих и легкоплавких материалов. С особым интересом к экономичным и высокоэффективным решениям по энергоресурсосбережению относятся нефтехимическая, горнодобывающая, деревообрабатывающая и другие отрасли промышленности, которые в Кузбассе хорошо развиты и новые эффективные технологии на базе ПЭМП могут быть хорошим подспорьем существующим.

ПЕРЕЧЕНЬ ССЫЛОК

1. Заблодский Н.Н. Полифункциональные электромеханические преобразователи технологического назначения: монография. / Н.Н. Заблодский – Алчевск: ДонГТУ. – 2008. – 340 с.
2. Гайденко Ю.А. Расчет тепловых полей в электрических машинах с независимой аксиальной системой охлаждения/ Ю.А. Гайденко, В.В. Чумак, А.Л. Никитюк // Вісник Кременчуцького держ. політехн. ун-ту: Наукові праці КДПУ, 2008. – Вип. 4/2010 (63). Ч. 1. – С. 64 – 68.
3. Заблодский Н.Н. Моделирование теплообменной системы полифункционального электромеханического преобразователя для энергоресурсосберегающих технологий / Н.Н. Заблодский, В.А. Квасов // Проблемы недропользования: Сборник науч. трудов. Часть II / Санкт-Петербургский горный институт (технический университет). СПб 2010 – С. 210-212.
4. Квасов В.А.. Численное моделирование теплообменной системы полифункционального электромеханического преобразователя с учетом нагрузочно-охлаждающей среды // Сб. научн. Тр. Дон ГТУ, 2009. – вып. №29. – С. 329-335.
5. Заблодский Н.Н. Расчетные модели при исследованиях тепловых процессов в полифункциональных электромеханических преобразователях технологического назначения/ Н.Н. Заблодский, В.Е. Плюгин, В.А. Квасов, Лупанов А.В. // Техн. електродинаміка.-К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2008. Тем. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». Частина 2.-С.57-62.
6. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J, Turbulence Modeling Validation, Testing and Development // NASA reports – April 1997.
7. Васьковський Ю.М. Польовий аналіз електричних машин: Навч. посіб. – К.:НТУУ «КПІ», 2007. – 192 с.