

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ МАГНЕТРОННОЙ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

И.Д. Шоничев, Л.Л. Колесник

АННОТАЦИЯ

В статье описано моделирование процессов теплопередачи малогабаритной магнетронной распылительной системы. Приводится описание проблемы эффективного теплоотвода. Представлены результаты моделирования тепловых процессов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

МАГНЕТРОННОЕ РАСПЫЛЕНИЕ, ТЕПЛОПЕРЕДАЧА, МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ, COMSOL MULTIPHYSICS

HEAT TRANSFER MODELING OF MAGNETRON SPUTTERING UNIT

I.D. Shonichev, L.L. Kolesnik

ABSTRACT

The paper describes heat transfer modeling of magnetron sputtering unit. A description of the effective heat removal issue is given. The results of heat transfer modeling are given.

KEYWORDS

MAGNETRON SPUTTERING, HEAT TRANSFER, HEAT TRANSFER MODELING, COMSOL MULTIPHYSICS

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день устройство окружающего нас мира неразрывно связано с такими областями науки и техники как микро и нанoeлектроника. В основе изделий микро и нанoeлектроники лежат многослойные тонкопленочные структуры, формируемые в вакууме различными технологическими методами. Многообразие методов создания тонкопленочных покрытий позволяет получать покрытия с уникальными свойствами, в тоже время существуют методы нанесения, обладающие широким спектром применения. Таким методом является метод магнетронного распыления, позволяющий получать покрытия металлов, оксидов, нитридов, композитные покрытия и другие виды покрытий.

Для нанесения различных покрытий в рамках НИР кафедры МТ11 МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана компактная магнетронная распылительная система – магнетрон с круглой планарной мишенью диаметром 30 мм со сбалансированной конфигурацией магнитного поля. Особенностью конструкции магнетрона является отсутствие электрического контакта между катодом магнетрона и теплоносителем – водой (из системы общего водоснабжения, недистиллированной), охлаждающей магнитную систему магнетрона. Катод магнетрона отделен от теплообменника диэлектриком – пластиной из нитрида алюминия. За счет данной конструктивной особенности повышается безопасность эксплуатации установки, так как исключается риск поражения оператора электрическим током при одновременном контакте с корпусом, являющимся анодом, и теплоносителем или металлическими

элементами системы охлаждения. С другой стороны, данная конструктивная особенность снижает эффективность охлаждения магнитной системы.

В ходе испытаний магнетрона и экспериментов по созданию покрытий с помощью данного магнетрона был выявлен перегрев магнитной системы, проявляющийся как потеря магнитных свойств постоянных магнитов. Для исследования процессов теплопередачи при магнетронном распылении между деталями магнетрона и теплоносителем было принято решение провести моделирование тепловых процессов в среде COMSOL Multiphysics.

ДОПУЩЕНИЕ И ОГРАНИЧЕНИЯ МОДЕЛИ

В исследовании рассматриваются процессы нестационарного теплообмена посредством теплопроводности. Для упрощения модели и ускорения вычислений избавляем САД модель, используемую в расчете, от незначимых элементов: резьбовые элементы, провод катода.

В исследовании не рассматриваются процессы теплообмена излучением, так как градиент температур незначителен, поэтому теплообмен излучением не имеет значимого вклада в общий процесс теплообмена. Также не рассматривается процесс теплообмена теплопроводностью между вакуумной камерой и магнетроном. Контакт между камерой и магнетроном выполняется через резиновое вакуумное уплотнение и через болтовые струбицины, площадь и теплопроводность соединения малы, поэтому тепловой поток между магнетроном и камерой теплопроводностью незначителен.

Также в рамках модели не учитывается действительный процесс контактной теплопередачи, ввиду невозможности или затрудненности оценки реального контактного теплового сопротивления в местах сопряжений деталей. В модели рассматриваются только идеальные контакты всех сопрягаемых деталей модели, соответствующие граничному условию четвертого рода [1].

В моделируемых процессах теплопередачи коэффициенты теплопроводности всех деталей приняты постоянными, так как диапазон изменения температуры незначителен, изменением коэффициента теплопроводности можно пренебречь.

ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ

Внешний вид САД модели магнетрона, используемой в моделировании в среде COMSOL Multiphysics с указанием позиций деталей, приводится на рисунке 1.

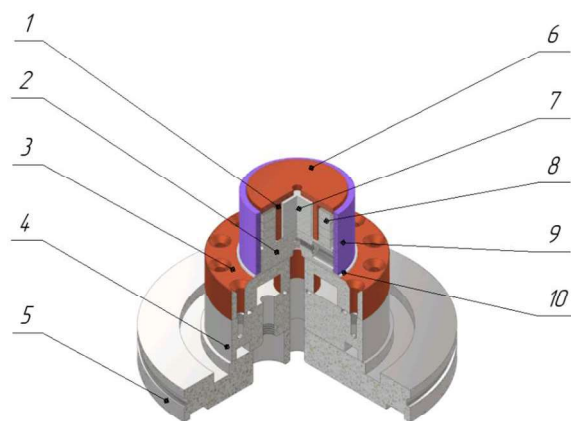


Рис. 1. Внешний вид САД модели магнетрона с указанием позиций деталей

Описание позиций деталей с указанием используемых при моделировании значений физических величин приводится в таблице 1.

Таблица 1

Описание позиций магнетрона и их характеристики, используемые в расчетах

Поз.	Деталь	Материал	$\lambda \left[\frac{Вт}{м \cdot К} \right]$	$c \left[\frac{Дж}{кг \cdot К} \right]$	$\rho \left[\frac{кг}{м^3} \right]$
1	Медный цилиндр	Медь	385 [2]	399 [3]	8930 [3]
2	Стальной диск	Ст3	55 [4]	480 [4]	7850 [4]
3	Медный теплообменник	Медь	385 [2]	399 [3]	8930 [3]
4	Стальной диск	12Х18Н10Т	20 [4]	502 [3]	7900 [3]
5	Фланец ISO63-К	12Х18Н10Т	20 [4]	502 [3]	7900 [3]
6	Медная мишень	Медь	385 [2]	399 [3]	8930 [3]
7	Магнит неодимовый	N35 (НмБ 210/130) (NbFeB)	9 [5]	440 [5]	7450 [5]
8	Магнит неодимовый кольцевой	N35 (НмБ 210/130) (NbFeB)	9 [5]	440 [5]	7450 [5]
9	Трубка защитная	Al ₂ O ₃	40 [6]	886 [6]	3965 [6]
10	Прокладка керамическая	AlN-200	200 [7]	734 [7]	3130 [7]

Для используемых магнитов из сплава N35 предельная температура эксплуатации составляет 80°C, для сплава N35H – 120°C [5].

ЗАДАНИЕ НАЧАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ

Тепловой поток воздействует на поверхность мишени, с которой осуществляется распыление. Вода заполняет весь объем теплообменника (позиция 3 на рисунке 1) магнетрона. Давление потока жидкости на входе в объем принято равным 2 атмосферам. В ходе измерений реального потока жидкости установлено, что реальный расход составляет 5 литров воды в минуту. В качестве начальных условий заданы давления на входе канала и скорость жидкости на выходе из канала. Изображение сечения магнетрона показано на рисунке 2, объем, заполненный водой, выделен голубым цветом.

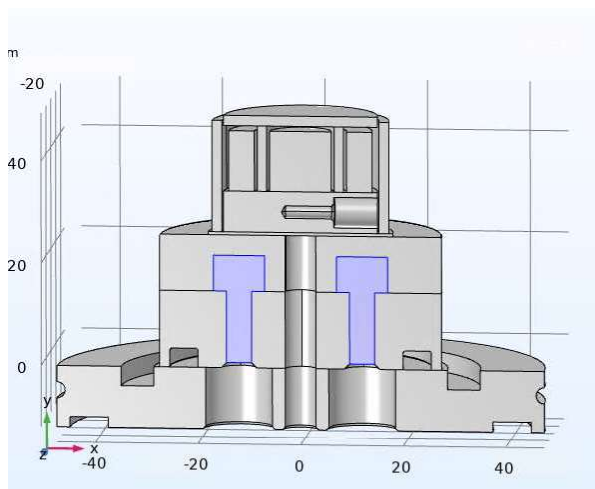


Рис. 2. Изображение САД модели магнетрона в разрезе, а также объема, заполненного водой (выделено голубым цветом)

Рассчитаем потока воды в выходном канале при диаметре выходного канала 4,9 мм:

$$\frac{5 \text{ л/мин}}{\pi \left(\frac{4,9 \text{ мм}}{2}\right)^2} = \frac{0,005 \text{ м}^3/\text{мин}}{\pi \left(\frac{0,0049 \text{ мм}}{2}\right)^2} = 265,147 \text{ м/мин} = 4,419 \text{ м/с}.$$

Рассчитаем число Рейнольдса для входного патрубка по формуле:

$$Re = \frac{v d \rho}{\eta},$$

где Re – значение числа Рейнольдса, v – скорость потока жидкости [м/с], d – диаметр трубопровода в метрах, ρ – плотность жидкости [кг/м^3], η – динамическая вязкость [$\text{Па} \cdot \text{с}$] [8]. Для воды при 15°C плотность принимаем 999 кг/м^3 , динамическая вязкость $1,140 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ [7].

$$Re = \frac{4,419 \text{ м/с} \cdot 0,0049 \text{ м} \cdot 999 \text{ кг/м}^3}{1,140 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}} = 18974 > 10^4 > 2 \cdot 10^3.$$

Следовательно, режим течения в трубопроводе турбулентный.

Поток охлаждающей жидкости (воды) задан как турбулентный поток. Моделирование выполнено по модели k - ϵ , обладающей быстрой сходимостью. В k - ϵ модели заданы два дополнительных уравнения для расчета кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ϵ . Буферный слой жидкости не моделируется, для расчета скорости у стенки используются пристеночные функции.

Мощность теплового потока и температура воды, поступающей в магнетрон заданы как параметры. Задание величин как параметров позволяет производить перебор значений параметров при моделировании – опция Parametric Sweep в настройках решения. Принятые значения параметров: мощность теплового потока в моделировании принимает значения 10, 25, 50, 100, 150, 200, 250 Вт, а температура поступающей жидкости принимает значения 10 и 15°C , при измерениях реальной температуры поступающей воды не обладали воспроизводимостью, также необходимо учесть сезонный характер изменения температуры поступающей жидкости.

Магнетрон симметричен относительно плоскости, проходящей через ось магнетрона и ось отверстие винта крепления провода катода, поэтому для снижения затрат вычислительных ресурсов необходимых для моделирования моделирование проводится для половины изделия с применением настройки Symmetry для расчетной схемы.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

В реальной конструкции магнетрона детали 2, 3 и 10 на рисунке 1 соединены клеевым соединением. На данном этапе расчета клеевое соединение исключено из модели.

Произведен стационарный расчет с помощью решателя Stationary Solver. Изображение распределения скоростей охлаждающей жидкости в сечении канала теплообменника представлено на рисунке 3.

Изображение распределения давлений в сечении канала теплообменника представлено на рисунке 4.

В результате моделирования определены значения установившейся максимальной температуры магнитов, то есть температуры в условиях теплового равновесия. Моделирование проводилось с перебором мощности теплового потока и температуры охлаждающей жидкости. Полученная зависимость представлена на рисунке 5.

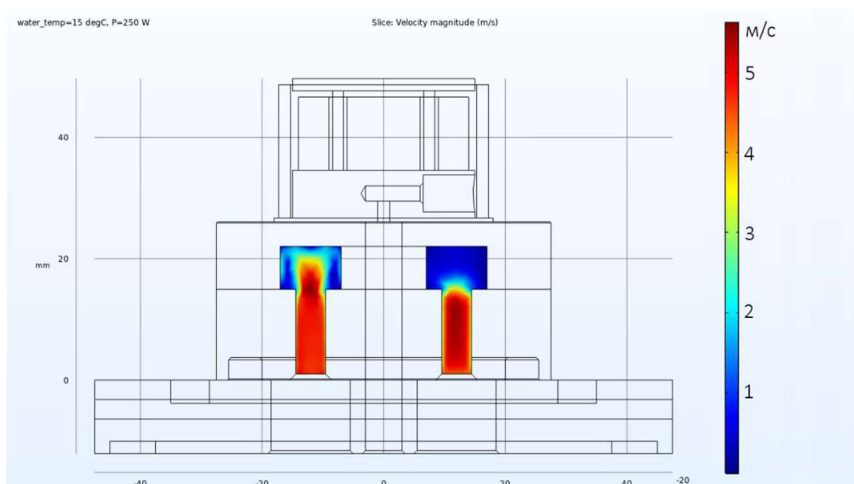


Рис. 3. Распределение скоростей (м/с) охлаждающей жидкости в сечении канала теплообменника

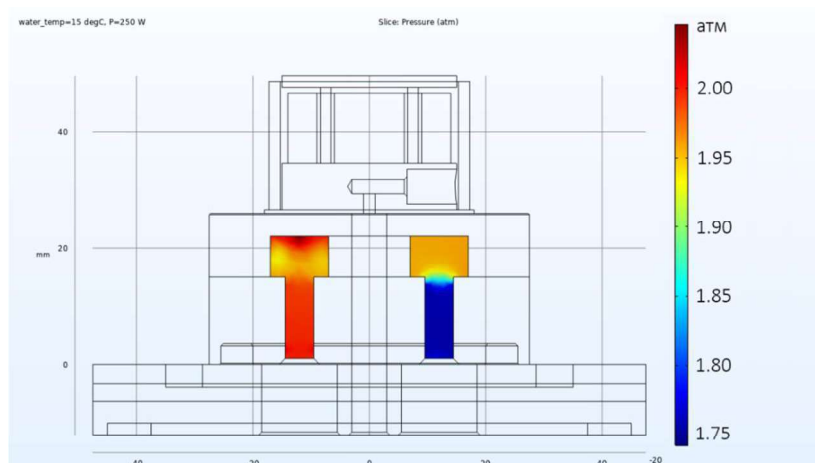


Рис. 4. Изображение распределения давлений (атм) охлаждающей жидкости в сечении канала теплообменника

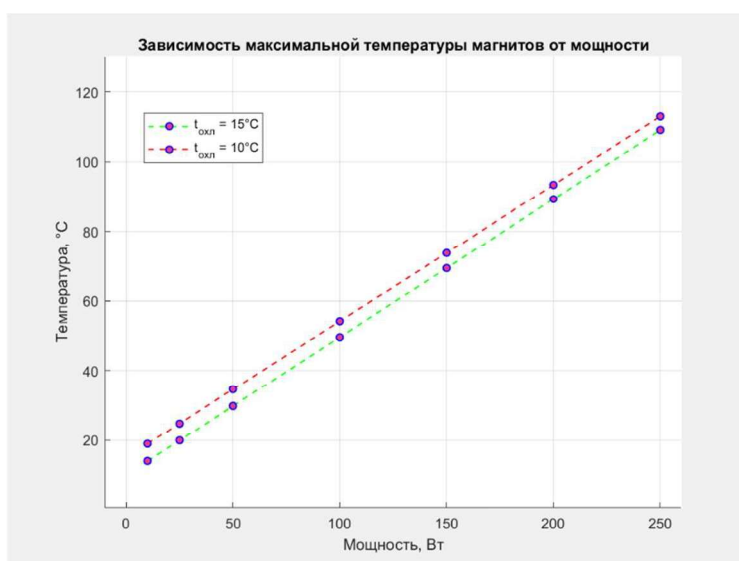


Рис. 5. График зависимости максимальной установившейся температуры магнитов от мощности

Изображение распределения поля температур при состоянии теплового баланса при температуре охлаждающей жидкости 15°C и мощности теплового потока 250 Вт на рисунке 6.

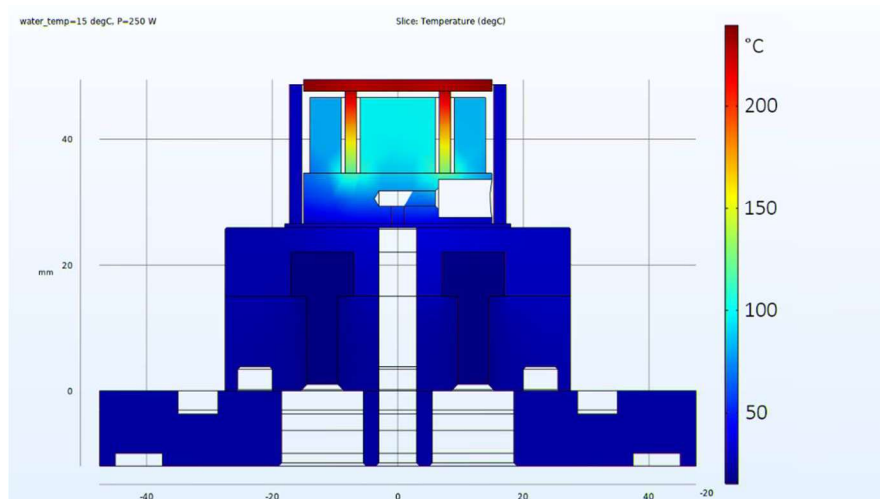


Рис. 6. Поле температур в состоянии теплового баланса при температуре охлаждающей жидкости 15°C и мощности теплового потока 250 Вт

Для оценки длительности нестационарного процесса теплопередачи проведено моделирование с помощью решателя Time-Dependent Solver, расчет производился для диапазона времени 300 секунд с шагом времени 1 секунда. Для упрощения модели и уменьшения времени расчета поток жидкости рассчитывается как ламинарный. Кроме того, при моделировании потока жидкости с учетом турбулентного режима движения в нестационарных процессах требуется расчётная сетка с малым размером элемента, что требует значительного объема памяти и вычислительных ресурсов. Основной задачей нестационарного моделирования является качественная оценка длительности нестационарного процесса, то есть времени, необходимого для установления режима стационарной теплопередачи. Поэтому неточность моделирования теплообмена, обусловленная моделированием потока жидкости в ламинарном режиме, принимается как приемлемая для качественной оценки.

По полученным в результате моделирования значениям поля температур от времени построен график зависимости максимальной температуры магнитов от времени (рис.7).

По графику (Рисунок 7) можно оценить длительности процессов нестационарной теплопередачи – порядка 100 секунд.

В реальной конструкции магнетрона для соединения деталей позиций 2, 3, 10 рисунка 1 использован эпоксидный клей. Теплопроводность эпоксидных клеевых составов не превышает $0,4-1\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ для ненаполненных эпоксидных составов [9]. Также немаловажным фактором является однородность состава, что может влиять на степень конверсии, например, при неоднородности состава в клеевом соединении может возникнуть неотверждённая зона. В расчете принимаем теплопроводность клеевого слоя $0,35\text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, плотность материала клеевого соединения $1200\text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость $1600\text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ [9]. Толщину слоя принимаем $0,1\text{ мм}$. Увеличенное изображение магнетрона с выделенными цветом клеевыми соединениями представлено на рис. 8.

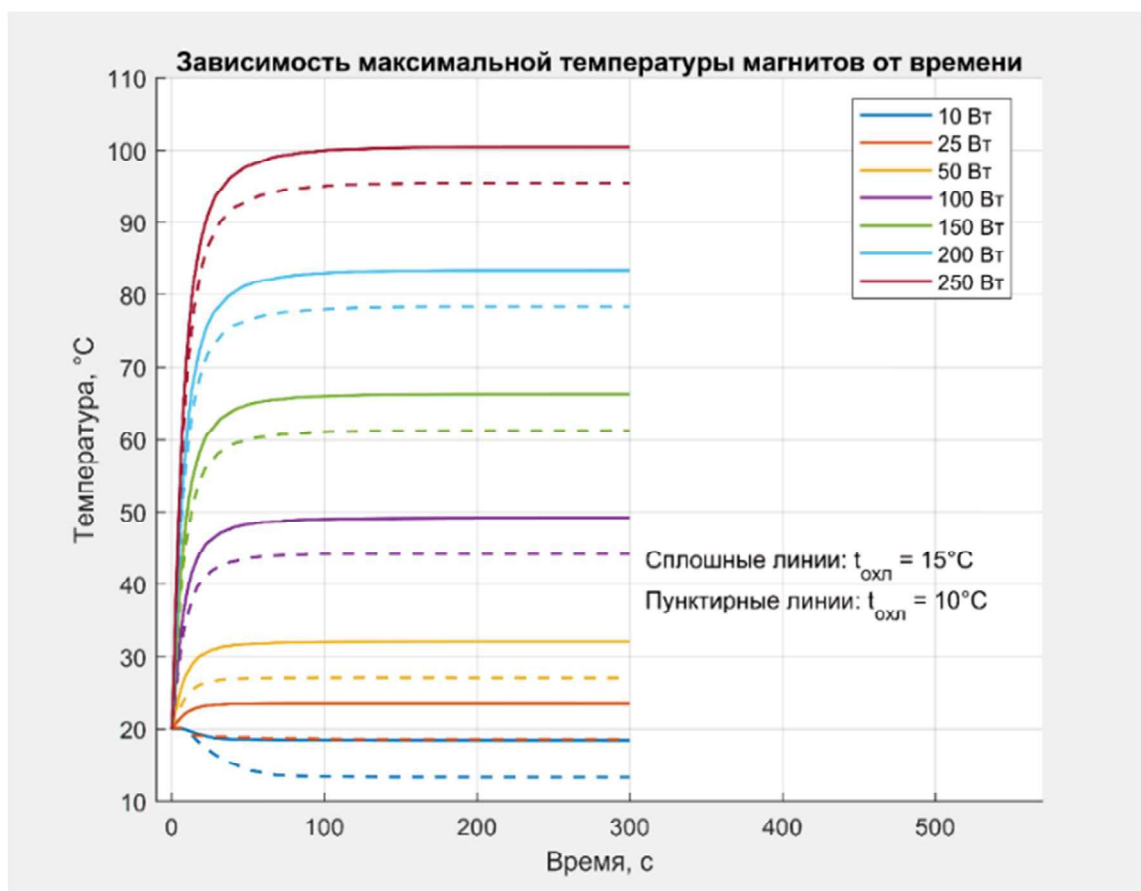


Рис. 7. График зависимости температур магнитов от времени

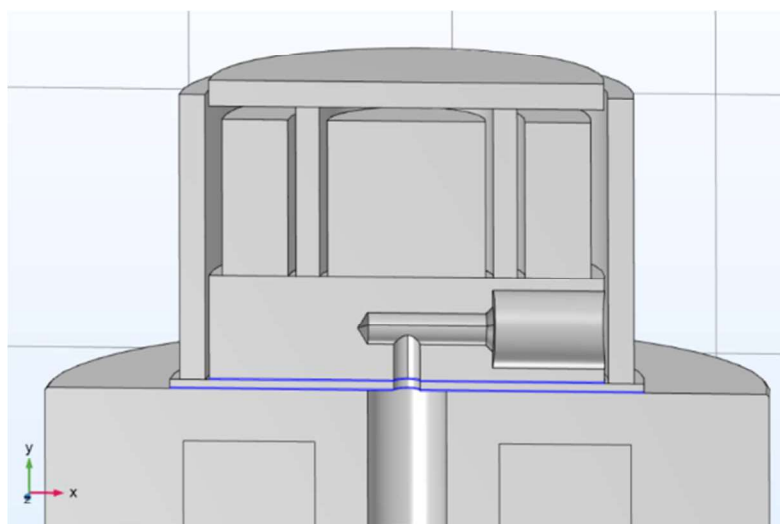


Рис. 8. Схема внутреннего устройства магнетрона, синим цветом выделены клеевые соединения

Моделирование производилось с помощью стационарного расчета с решателем Stationary Solver. В результате моделирования получен график зависимости максимальной установившейся температуры магнитов в зависимости от мощности теплового потока (рис. 9).

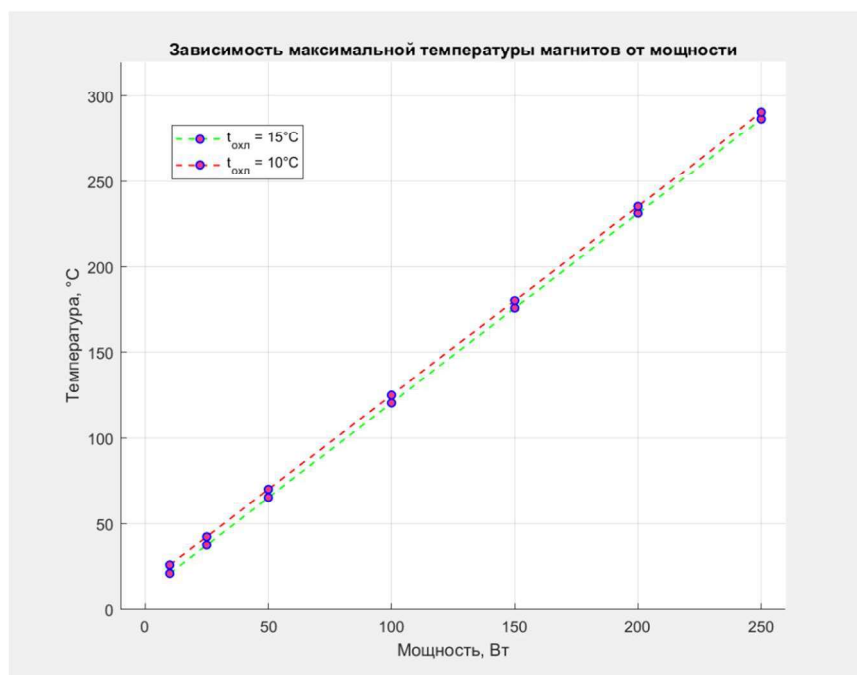


Рис. 9. График зависимости максимальной установившейся температуры магнитов от мощности при учете теплопроводности клеевого соединения

Распределение поля температур при мощности 250 Вт и температуре охлаждающей жидкости 15°C представлено на рис. 10.

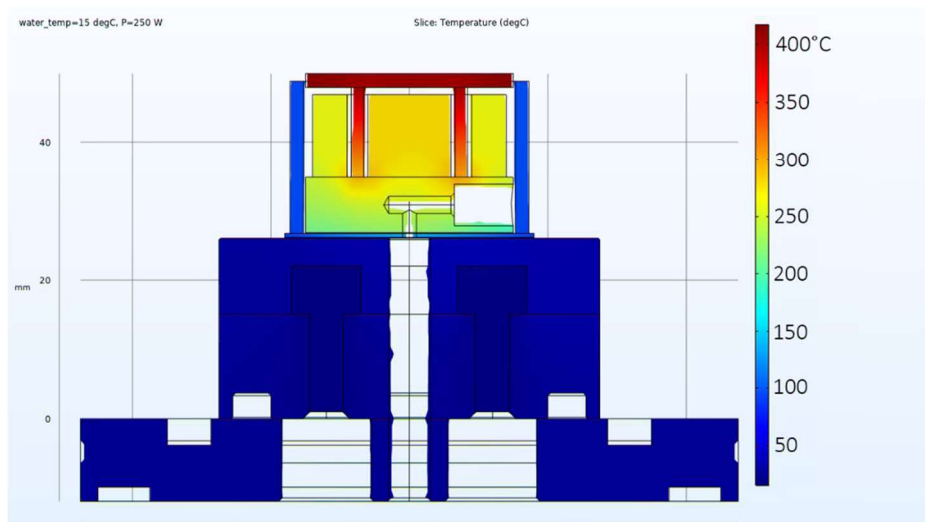


Рис. 10. Поле температур в состоянии теплового баланса при температуре охлаждающей жидкости 15°C и мощности теплового потока 250 Вт с учетом клеевого соединения

ВЫВОДЫ

В результате моделирования определены максимальные значения температур магнитов при принудительном охлаждении с учетом и без учета теплопроводности клеевого соединения. По полученным данным можно подобрать сплав магнитов с необходимым рабочим температурным диапазоном. По результатам моделирования с учетом клеевого соединения определена причина перегрева магнитов – недостаточная теплопроводность клеевого соединения. На основе результатов моделирования можно предложить варианты

соединения деталей магнетрона с большей теплопроводностью, например использование наполненных клеевых составов или соединение деталей с помощью пайки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа, 1967. 600 с.
2. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. 2-е, стереотип.-е изд. М. «Энергия», 1977. 344 с.
3. Чиркин В.С. Тепло-физические свойства материалов ядерной техники. Москва: Атомиздат, 1968.
4. Зубченко А.С., Колосков М.М., Каширский Ю.В. Марочник сталей и сплавов. Москва: Машиностроение, 2003. 784 pp.
5. ГОСТ Р 52956-2008 МАТЕРИАЛЫ МАГНИТОТВЕРДЫЕ, СПЕЧЕННЫЕ НА ОСНОВЕ СПЛАВА НЕОДИМ-ЖЕЛЕЗО-БОР.
6. Агроскин А.А., Глейбман В.Б. Теплофизика твердого топлива. Москва: Недра, 1980. 256 с.
7. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Физические величины: справочник. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
8. Плановский А.Н., Рамм А.Н., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии. 4-е изд. Ленинград. 1967. 848 с.
9. Петрова А.П., Малышева Г.В. Клеи, клеевые связующие и клеевые препреги: учебное пособие / под общ. ред. Е.Н. Каблова. Москва: ВИАМ, 2017. 472 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Шоничев И.Д. – студент кафедры электронных технологий в машиностроении, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; e-mail: id@shonichev.ru

Колесник Л.Л. – кандидат технических наук, доцент кафедры электронных технологий в машиностроении, МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва; генеральный директор ООО «Электровакuumные технологии», г. Москва; e-mail: kolesnik@bmstu.ru; l.kolesnik@m-i.ru