

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ И.С.
ТУРГЕНЕВА»

ИНСТИТУТ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ, АВТОМАТИЗАЦИИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Кафедра электрооборудования и энергосбережения

ОТЧЁТ

об использовании программного продукта ELCUT в 2022 / 2023 учебном
году

Орёл 2023

Содержание

Использование ELCUT в учебном процессе.....	3
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	4
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	16
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	23
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	28

Использование ELCUT в учебном процессе

Основные сведения о направлениях использования программного продукта ELCUT в учебном процессе ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева» представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Использование программного продукта Elcut в учебном процессе

Наименование дисциплины	Специальность подготовки (код, наименование), количество обучаемых студентов	Кафедра, ведущая занятия	Дата начала использования	Семестр/ курс проведения занятий по дисциплине	Форма занятий
ТОЭ ч.2	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 7 студ.	Кафедра электрооборудования и энергосбережения	С 01.09.2022 г.	2 курс, 4 сем.	Практические работы
Моделирование электротехнических задач на ЭВМ	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», 7 студ.	Кафедра электрооборудования и энергосбережения	С 01.09.2022 г.	2 курс, 4 сем.	Практические занятия
Научно-исследовательская работа	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», 1 студ.	Кафедра электрооборудования и энергосбережения	С 01.09.2022 г.	Магистры 1 курс	Производственная практика
Практика по получению первичных навыков научно-исследовательской работы	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», 1 студ.	Кафедра электрооборудования и энергосбережения	С 01.09.2022 г.	Магистры 2 курс	Учебная практика
Научно-исследовательская работа студентов	13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», 2 студ.	Кафедра электрооборудования и энергосбережения	С 01.09.2022 г.	Магистры 1, 2 курс	НИРС

При изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» студенты выполняют проверку решаемых задач по анализу электрических цепей с помощью модуля «Магнитное поле переменных токов».

При проведении практических занятий по дисциплине «Моделирование электротехнических задач на ЭВМ» с использованием ELCUT рассматриваются следующие задачи: электростатика,

магнитостатика, теплостатика и нестационарная теплопередача. Задания приведены в Приложении А.

В рамках учебной и производственной практик магистранты исследуют полевые электротехнические объекты в соответствии с индивидуальными заданиями. Пример отчета по практике приведен в приложении Б.

По итогам выполняемой магистрантами НИРС, в первом семестре 2022/2023 учебного года опубликованы следующие статьи:

Качанов А.Н., Юрьев Ю.Н., Миронов Е.А. Исследование индукционных устройств с бегущим электромагнитным полем для термообработки рабочих валков прокатных станов // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : материалы XX международной научно-практической конференции (г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, ОГУ имени И.С. Тургенева ; редкол. : А.Н. Качанов [и др.]. – Орёл : ОГУ имени И.С. Тургенева, 2022. – С. 23-28.

Качанов А.Н., Гришин В.А. Исследование электрического и теплового полей при сушке древесины в вакуумно-диэлектрической камере // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. – № 1 (357) 2023 г. (принято к публикации 10.12.2022 г.)

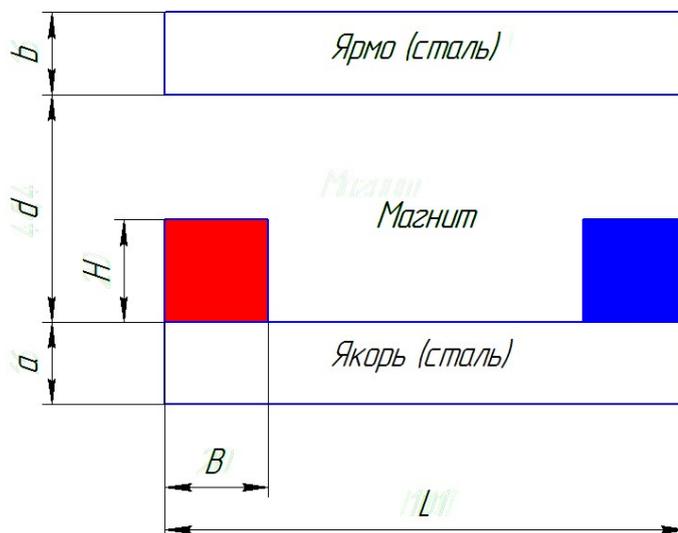
Копии статей в формате pdf прикреплены к отчёту.

На кафедре магистром, инспектором технического контроля ООО «Орловский энергосбыт» Мироновым Е.А. выполняется работа по написанию кандидатской диссертации на тему «Исследование и разработка индукционных устройств для термообработки крупногабаритных машиностроительных деталей». В данной работе исследование электромагнитных процессов при термообработке крупногабаритных машиностроительных деталей планируется выполнять с использованием программы ELCUT.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Практические задания по дисциплине
 Моделирование электротехнических задач на ЭВМ

ELCUT: МАГНИТОСТАТИКА



Определить силу, с которой притягивается ярмо к якорю, если заданы геометрические параметры системы, относительная магнитная проницаемость воздуха $\mu_{\text{в}} = 1$; магнитная проницаемость стали $\mu_{\text{ст}}$, магнитная проницаемость магнита $\mu_{\text{маг}} = 1$ и его коэрцитивная сила H_c . Параметры и свойства приведены в табл. 1 по вариантам.

Таблица 1 – Варианты заданий

Вар.	L, мм	B, мм	H, мм	a, мм	b, мм	d, мм	$\mu_{\text{ст}}$	H_c , кА/м
1	100	20	20	10	15	40	1000	500
2	80	15	15	15	15	35	800	600
3	120	20	25	20	20	55	900	950
4	140	25	20	15	10	45	1100	650
5	60	15	20	20	15	50	700	750
6	160	30	20	10	10	45	850	800
7	100	25	25	20	25	60	1100	750
8	80	20	25	15	20	40	900	550
9	120	20	15	20	10	35	1000	800
10	140	30	25	15	15	60	1300	850

Примечания по выполнению

1. Толщину всей системы принять равной 2 см.

2. Для ограничения расчётной области следует задать границу квадратной формы размером $6L$ и указать нулевой магнитный потенциал.
3. Для задания полюсов магнита в окне свойств блока следует установить значение «Направление», равное $+90$ и (-90) соответственно для южного и северного полюсов.
4. Для определения силы, действующей на ярмо, необходимо провести вокруг него замкнутый контур и воспользоваться интегральным калькулятором.

ELCUT: ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Задача 1. Металлическая круглая заряженная пластина толщиной d и радиусом R помещена в центре диэлектрического кольца, внутренний и внешний радиусы которого равны соответственно R_2 и R_3 , а относительная диэлектрическая проницаемость которого равна ε . Пластина заряжена до потенциала φ , кольцо не заряжено. Построить в программе Elcut график зависимости напряженности и потенциала электрического поля от радиуса системы в диапазоне от центра пластины до границы зоны вычисления. Границу зоны вычисления задать квадратной формы с центром на оси пластины. Сторону квадрата принять равной $5R_3$.

Задачу решить в осесимметричной и плоской постановках.

Вариант	d , мм	R , мм	R_2 , мм	R_3 , мм	ε	φ , В
1	5	15	35	55	3	20
2	10	20	40	70	4	10
3	15	30	60	85	5	15
4	20	40	80	100	6	40
5	5	10	25	40	5	15
6	10	25	50	65	9	35
7	15	35	70	85	7	45
8	20	50	70	90	4	25
9	5	20	30	45	5	30
10	10	30	60	75	6	15

Задача 2.

Задан плоский конденсатор. Длина пластины равна L , ширина – B . Расстояние между обкладками – d . На обкладках находятся заряды $+q$ и $-q$ соответственно. Построить картины электрического потенциала и напряженности электрического поля конденсатора. Определить емкость конденсатора, заполненного диэлектриком с проницаемостью ε .

Примечание 1. Конденсатор считаем неидеальным. Также, как и в предыдущей задаче необходимо задать границы вычисления. Границы принимаем круглой формы с радиусом $5L$.

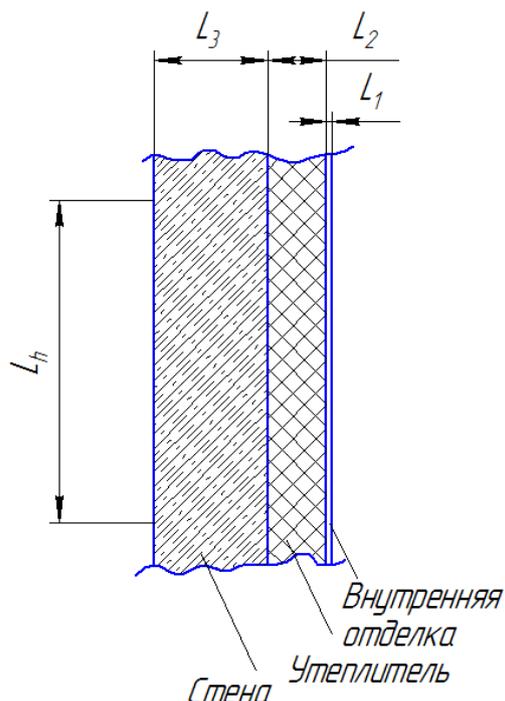
Примечание 2. Емкость определяем по формуле: $C=q/U$, где U – разность потенциалов обкладок. Для определения U используется интегральный калькулятор.

Примечание 3. Для корректного вычисления необходимо задать точку в пространстве с известным потенциалом. В качестве такой точки можно использовать любую точку на оси симметрии конденсатора, при этом её потенциал равен 0.

Вариант	d, мм	L, мм	B, мм	ϵ	q, нКл
1	5	60	35	3	20
2	10	100	60	1	10
3	15	90	60	5	15
4	20	150	100	6	40
5	5	50	40	5	15
6	10	70	50	1	35
7	15	80	70	7	45
8	20	120	100	4	25
9	5	40	30	1	30
10	10	110	90	6	15

ELCUT: СТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Задание 1



На рис. 1 показана ограждающая конструкция здания, состоящая из стены, теплоизоляции и внутренней отделки заданных толщин и материалов. Также заданы температуры внутри T_1 и снаружи T_2 помещения. Построить график распределения температуры по толщине конструкции, а также тепловой поток, который проходит через ограждающую конструкцию в окружающую среду. Условия задачи заданы в таблице 1. Параметры материалов указаны в таблице 3. Ширину стены принять равной 2 м.

Рис. 1 – Ограждающая конструкция

Таблица 1 – Варианты заданий

Вариант	L_1 , мм	L_2 , см	L_3 , см	L_h , м	Материал стены	Материал утеплителя	Материал внутренней отделки	T_1 , °C	T_2 , °C
1	20	10	50	1,5	Обыкновенный кирпич	Минвата 100	ДСП	20	0
2	10	5	25	1,0	Силикатный кирпич	Пенопласт	Фанера	18	-15
3	10	12	25	1,2	Красный глиняный кирпич	Древесные опилки	Гипсокартон	19	-5
4	20	6	15	1,3	Бетон	Пенопласт	Фанера	22	-8
5	10	20	20	1,4	Железобетон	Минвата 200	ДСП	20	-2
6	10	5	25	1,0	Пенобетон 300	Пенопласт	Гипсокартон	19	-20
7	20	6	30	1,1	Пенобетон 1000	Минвата 100	ДСП	21	-10
8	10	10	50	1,0	Силикатный кирпич	Древесные опилки	Фанера	25	-6
9	20	15	10	1,3	Бетон	Минвата 50	ДСП	16	-12
10	20	4	15	1,2	Железобетон	Пенопласт	Гипсокартон	17	-5

Задание 2

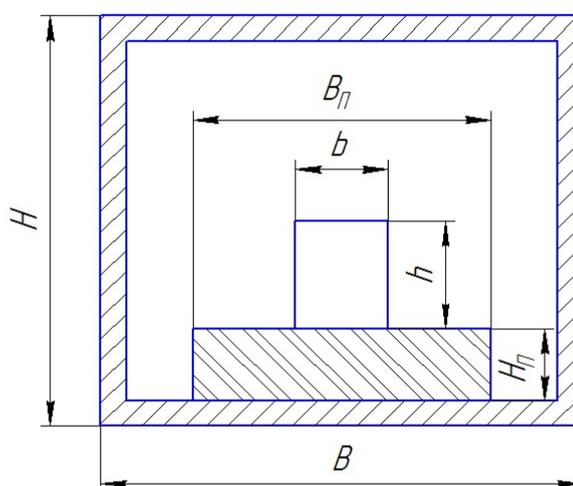


Рис. 2 – Система «печь-загрузка»

В печи, корпус которой сделан из стали толщиной d , на подложке размещён нагретый объект, температура поверхности которого равна T (рис. 2). Геометрические размеры печи, подложки и нагретого объекта, а также материал подложки приведены в табл. 2. Коэффициент теплопроводности среды внутри печи принять равным $8 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$. Ширину печи принять равной 40 см .

Требуется: построить картину температурного поля системы «Печь-загрузка» и определить максимальную температуру кожуха печи. Если данная температура превышает 60 °С, подобрать толщину и материал теплоизолирующего слоя для устранения опасности получения ожога.

Таблица 2 – Варианты заданий

Вариант	H см	B, см	H _п , см	B _п , см	h, см	b, см	d, мм	Материал подложки	T, °C
1	50	45	10	20	15	15	20	Асбест	400
2	30	30	5	15	4	8	15	Асбесто- цемент	200
3	70	50	15	26	20	22	20	Огнеупорный кирпич	500
4	45	40	8	17	17	15	15	Асбесто- цемент	250
5	35	35	4	15	8	13	10	Асбест	220
6	55	50	12	20	8	18	15	Кирпич силикатный	350
7	65	50	15	30	20	25	20	Огнеупорный кирпич	450
8	60	60	13	27	10	20	20	Кирпич силикатный	420
9	40	45	10	20	20	15	15	Асбесто- цемент	300
10	50	50	15	25	20	22	10	Асбест	280

Примечание: в качестве граничных условий на наружной стенке печи использовать условия конвекции. Коэффициент теплоотдачи принять равным 10 Вт/(м²·К). Температуру среды принять равной 20 °С.

ELCUT НЕСТАЦИОНАРНАЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧА

Задание

Пластина из конструкционного материала с заданными геометрическими и теплофизическими параметрами на участке *BC* подвергается воздействию высокотемпературной высокоскоростной струи с заданными параметрами. На участках *CD*, *DE* и *AE* происходит конвективный теплообмен со средой. На участке *AB* заданы симметричные граничные условия.

Требуется построить картины распределения температуры через 30, 60 и 300 сек после начала процесса, а также построить график распределения температуры на линии *AE* чрез 120 сек после начала процесса.

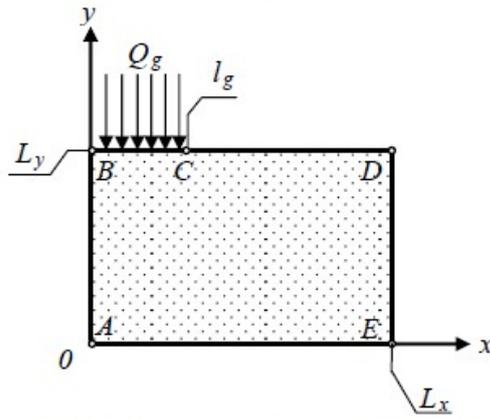


Рис. 1. Область решения задачи: x, y – декартовы координаты; L_x – ширина пластины; L_y – толщина пластины; l_g – протяженность области воздействия струи; Q_g – высокотемпературный поток; A, B, C, D, E – граничные точки

$$L_x = 0,1 \text{ м}; L_y = 0,15 \text{ м}; l_g = 0,05 \text{ м};$$

$$\rho_s = 1800 \text{ кг/м}^3; C_p = 840 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°K)}; \lambda_s = 1,2 \text{ Вт/(м} \cdot \text{°K)};$$

$$T_0 = 300 \text{ °K}; T_g = 3000 \text{ °K}; T_{cp} = 300 \text{ °K}, \alpha_g = 2500 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)},$$

$$\alpha_{cp} = 30 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}.$$

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени И.С. ТУРГЕНЕВА»

Институт приборостроения автоматизации и информационных технологий
Кафедра электрооборудования и энергосбережения

О Т Ч Е Т

о прохождении производственной практики
кафедры электрооборудования и энергосбережения

Студент	Еремеев В.Д.
Группа	11-ЭЭм
Институт/факультет	ИПАИТ
Направление/специальность	13.04.02. Электроэнергетика и электротехника
Руководитель практики от университета, к.т.н., доцент кафедры ЭиЭ	Коренков Д.А.
Начало практики: 22.09.2022	
Окончание практики: 21.12.2022	
Оценка защиты дата сдачи 21.12.2022	_____

Орел, 2022

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«ОРЛОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ И.С. ТУРГЕНЕВА»
Институт приборостроения, автоматизации и информационных технологий
Кафедра электрооборудования и энергосбережения

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой,
профессор
_____ А.Н. Качанов
«22» сентября 2022 г.

**ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ
производственной практики (научно-исследовательскую работу)**

для обучающегося Еремеева Владислава Дмитриевича
2 курса очной формы обучения, группы 11ЭЭ-м
Направление подготовки: 13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Место прохождения практики: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», кафедра электрооборудования и энергосбережения

Срок прохождения практики: с 22.09.2022 по 05.10.2022 г.; с 20.10.2022 по 26.10.2022 г.; с 17.11.2022 по 23.11.2022 г.; с 08.12.2022 по 21.12.2022 г.

Содержание (вопросы, подлежащие изучению):

Компьютерное имитационное моделирование электромагнитных процессов в рабочих камерах для сушки деревянных опор.

- анализ пакетов прикладных программ для моделирования электромагнитных явлений;
- разработка и анализ компьютерных моделей электромагнитных процессов в рабочих камерах для сушки деревянных опор при разных конфигурациях электродов и способах заполнения.

Планируемые результаты:

При выполнении задания на практику получить теоретические и практические знания, умения и опыт работы в электроэнергетике, которые необходимы как для изучения специальных дисциплин и написания ВКР, так и в дальнейшей профессиональной деятельности.

Руководитель практики,
к.т.н., доцент

В.А. Чернышов

Задание принял:

(подпись обучающегося)

В.Д. Еремеев

«22» сентября 2022 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	15
1 Анализ пакетов прикладных программ для моделирования электромагнитных явлений	16
2. Разработка и анализ компьютерных моделей электромагнитных процессов в рабочих камерах для сушки деревянных опор при разных конфигурациях электродов и способах заполнения	19
2.1 Расчет задачи с вертикальными электродами	21
2.2 Расчет задачи с горизонтальными электродами	23
2.3 Расчет задачи для вариантов рабочего конденсатора с электродами в виде секторов окружности	26
2.4 Расчет задачи с хаотичной укладкой заготовок	31
Заключение	34
Список используемой литературы	35

ВВЕДЕНИЕ

Вариантов укладки заготовок в рабочий конденсатор существует большое количество, но не каждая с технико-экономической точки зрения может рационально подходить для наиболее эффективной сушки. В варианте предлагаются следующие варианты. Каждая заготовка может быть высушена по отдельности в рабочем конденсаторе, образованном двумя электродами, имеющими форму вогнутой пластины, повторяющей очертания поверхности заготовки. В этом случае ориентация вектора напряженности электрического поля будет совпадать с радиальным направлением годовых колец, при котором диэлектрические свойства древесины относительно стабильны. При этом достижима высокая равномерность распределения параметров электромагнитного поля в поперечном сечении загрузки, но существенно снижается производительность процесса в целом, так как становится затруднительной одновременная сушка партии заготовок.

С другой стороны, заготовки можно уложить между вертикальными электродами, так как это обычно делается при сушке пиломатериалов прямоугольного сечения. Тогда производительность процесса многократно возрастает, но высокой равномерности электромагнитного поля ожидать не приходится из-за наличия в рабочем конденсаторе воздушных промежутков, а также из-за переменной ориентации вектора напряженности электрического поля относительно годовых слоев древесины.

Задачей этого исследования является разработка, анализ и поиск оптимальной конфигурации рабочего конденсатора и формы электродов, обеспечивающих достаточную равномерность распределения параметров электромагнитного поля в загрузке.

1 АНАЛИЗ ПАКЕТОВ ПРИКЛАДНЫХ ПРОГРАММ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЯВЛЕНИЙ

Существует много конечно-элементных пакетов прикладных программ (ППП), в которых расчеты магнитных систем доведены до совершенства. Рассмотрим такие программы, как ANSYS Multiphysics, Maxwell, COMSOL Multiphysics, ELCUT, Elmer [1,2].

Расчет в таких программах проводится обычно в интерактивном режиме. Программа сама разбивает моделируемое пространство на конечные элементы (треугольники, прямоугольники, тетраэдры, параллелепипеды и пр.). Необходимо только построить модель, ввести свойства материалов и граничные условия, запустить расчет и вывести его результаты в числовом и графическом виде. Весь процесс анализа достаточно нагляден и сопровождается графическими, выводимыми на экран монитора.

Все конечно-элементные программы можно разбить на две группы: программы, специально предназначенные для расчета магнитных полей, и программы общего назначения, в которых метод конечных элементов используется для решения многих научно-технических задач. Программы первой группы, например, ELCUT просты в управлении.

ANSYS Multiphysics – наиболее полная комплектация расчетного комплекса ANSYS, включающая в себя все существующие физические дисциплины: расчет напряженно-деформированного состояния конструкции, теплообмен, гидрогазодинамику, электромагнетизм и т.д. Комплекс содержит специальные многодисциплинарные элементы, которые позволяют напрямую решать связанные задачи.

Одним из элементов, входящих в ANSYS Multiphysics является ANSYS Emag. Этот пакет ориентирован на решение задач низкочастотных электромагнитных приложений и др. Обеспечивает всесторонний анализ различных электромагнитных явлений на всех этапах проектирования.

Основные недостатки: высокая стоимость, сложность в освоении. Но эти стороны компенсируются наличием учебных материалов на русском языке, широкими возможностями использования, а также большая точность расчетов.

Пакет COMSOL Multiphysics позволяет моделировать практически все физические процессы, которые описываются частными дифференциальными уравнениями. Программа содержит различные решатели, которые помогут справиться даже с самыми сложными задачами, а простая структура приложения обеспечивает простоту и гибкость использования. Пакет COMSOL Multiphysics, обладает почти такими же возможностями, как и пакет ANSYS, кроме этого, по сути, является инструментом пакета MATLAB и работает под его управлением, т.е. все возможности программирования, доступные в MATLAB, могут быть использованы и в COMSOL Multiphysics, например при обработке результатов расчета. COMSOL Multiphysics

обеспечивает возможность экспорта конечно-элементной модели в Simulink пакета MATLAB. Это позволяет моделировать работу объекта управления совместно с преобразователями электрической энергии, системами управления; исследовать частотные характеристики и устойчивость электротехнического комплекса. Основные недостатки: высокая стоимость, отсутствие литературы на русском языке, труден в освоении.

ELCUT – это комплекс программ для инженерного моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач методом конечных элементов. Основные плюсы данного программного комплекса: дружественный пользовательский интерфейс, простота описания моделей, широкие аналитические возможности комплекса и высокая степень автоматизации всех операций. ELCUT это полноценное Windows приложение, которое было разработано специально для этой платформы.

Maxwell – специализированный программный комплекс для моделирования электромагнитных полей. Ключевые возможности: моделирование низкочастотных двумерных и трехмерных электромагнитных полей методом конечных элементов; переходный нелинейный анализ (при движении (вращение, поступательное движение, вращение по произвольной траектории) компонентов; стыковка с внешней электрической схемой; анализ размагничивания постоянного магнита; вычисление магнитных потерь); гармонический электромагнитный анализ: анализ вихревых токов с учётом скин-эффекта.

Elmer – проект рассчитанный на решение задач из разных областей физики: теплопроводности, гидродинамики, механики твёрдого тела, акустики, электромагнетизма, квантовой механики; задачи описываются в виде легко читаемых текстовых файлов, есть неплохой графический интерфейс, поддерживает распараллеливание по MPI, лицензия GPL. Недостатки: отсутствие учебных материалов на русском языке, сложно в освоении.

В настоящее время на кафедре «Электрооборудования и энергосбережения» проектирование осуществляется в программной среде ELCUT.

ELCUT представляет собой интегрированную диалоговую систему программ позволяющую решать следующие плоские и осесимметричные задачи:

- Линейная и нелинейная магнитостатика.
- Магнитное поле переменных токов (с учетом вихревых токов).
- Нестационарное магнитное поле.
- Электростатика.
- Электрическое поле переменных токов в неидеальном диэлектрике.
- Растекание токов в проводящей среде.
- Линейная и нелинейная, стационарная и нестационарная теплопередача.
- Линейный анализ напряженно-деформированного состояния.

– Связанные задачи.

С помощью ELCUT возможно в течение одного сеанса описать задачу - ее геометрию, свойства сред, источники поля, граничные и другие условия, решить ее с высокой точностью и проанализировать решение с помощью средств цветной графики. ELCUT позволяет решать сложные задачи расчета полей на персональных компьютерах, не прибегая к помощи больших ЭВМ или рабочих станций.

С помощью ELCUT решаются двумерные краевые задачи математической физики, описываемые эллиптическими дифференциальными уравнениями в частных производных относительно скалярной (потенциальной) или однокомпонентной векторной функции.

Рассматриваются плоские (плоскопараллельные) и осесимметричные классы двумерных задач. В плоскопараллельной постановке обычно используют декартову систему координат x y z , причем предполагается, что геометрия расчетных областей, свойства сред и параметры, характеризующие источники поля, неизменны в направлении оси z . Вследствие этого описание геометрии, задание свойств, граничных условий и источников, а также обработку результатов можно проводить в плоскости x y , называемой плоскостью модели. Принято, что ось x направлена слева направо, а ось y - снизу вверх. Вместо декартовой может быть использована и полярная система координат.

Осесимметричные задачи решаются в цилиндрической системе координат, порядок следования осей выбран по аналогии с плоскопараллельными задачами. Физические свойства и источники поля предполагаются не зависящими от угловой координаты.

Геометрическая модель содержит полное описание геометрии задачи, метки различных её частей и расчетную сетку конечных элементов. Разные задачи могут использовать общую модель.

Геометрическая конфигурация задачи определяется как набор подобластей, представляющих собой одно- и многосвязные криволинейные многоугольники в плоскости модели, не пересекающиеся между собой иначе как по границе. Каждой подобласти приписан определенный набор физических свойств.

Задача может ссылаться на два документа физических свойств одновременно: один из них, называемый справочник свойств, содержит свойства часто используемых материалов (библиотека материалов), а другой документ содержит данные, специфичные для данной задачи или группы задач.

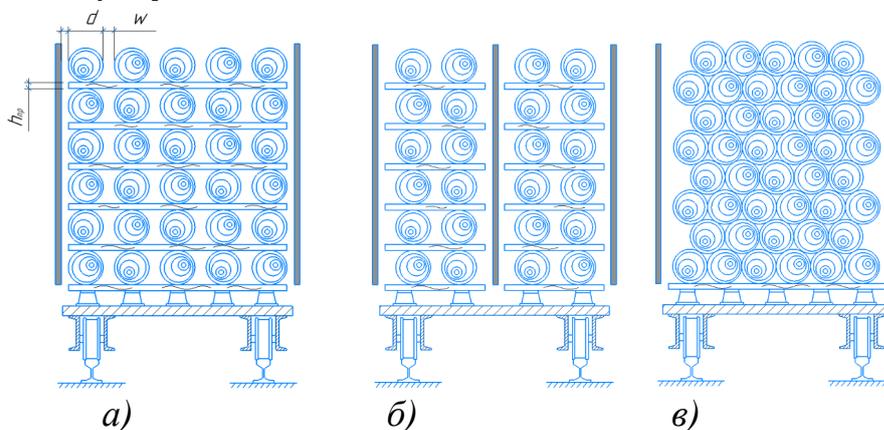
2. РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ В РАБОЧИХ КАМЕРАХ ДЛЯ СУШКИ ДЕРЕВЯННЫХ ОПОР ПРИ РАЗНЫХ КОНФИГУРАЦИЯХ ЭЛЕКТРОДОВ И СПОСОБАХ ЗАПОЛНЕНИЯ

Рассмотрев ранее факторы, влияющие на распределение параметров ЭМП и способы укладки штабеля, возникает задача поиска оптимальной конфигурации рабочего конденсатора и формы электродов, которые смогут обеспечить достаточную равномерность распределения параметров ЭМП в загрузке при незначительном снижении производительности процесса сушки.

В работе [3] представлена принципиальная возможность сушки заготовок деревянных опор с помощью применения вакуумно-высокочастотной технологии, и в случае обеспечения высокой степени качества этого процесса, это позволит увеличить срок службы соответствующих линий электропередач. На данном этапе установлено, что качество высушенных заготовок во многом определяется правильным распределением внутренних источников теплоты в поперечном сечении, что определяется правильным распределением параметров электромагнитного поля в рабочей камере во время сушки. Последнее условие может быть выполнено только при рациональном расположении заготовки относительно её электродов и оптимальной геометрии самих электродов. Следовательно, целью настоящего исследования является анализ известных методов укладки высушиваемых заготовок и поиск путей для дальнейших исследований.

Особенностью заготовок деревянных опор является, очевидно, их круглая форма, а также неравномерность диаметра в продольном направлении (сбег), что усложняет формирование штабеля по сравнению с обычными пиломатериалами, которые подвергаются вакуумно-высокочастотной сушке с меньшими технологическими проблемами при укладке. Если абстрагироваться от формы заготовок, то анализ следует начать с типовых способов формирования штабелей, а именно с горизонтальной и вертикальной системами электродов [4].

Конструкции рабочей камеры при разных вариантах укладки представлены на рисунке 1.



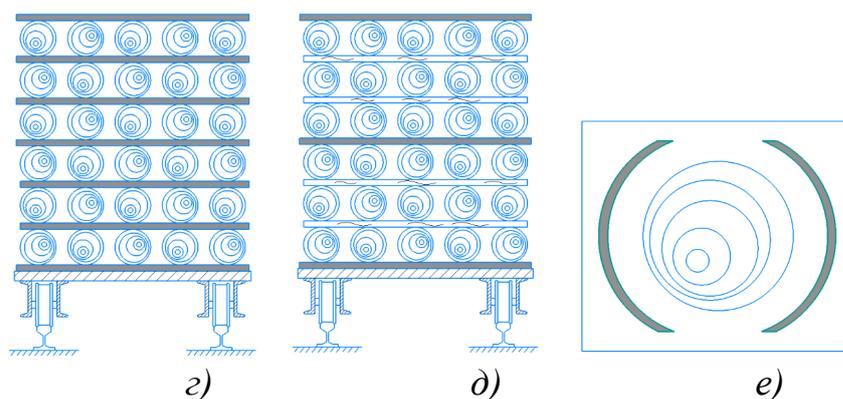


Рисунок 1 – Конфигурации рабочих конденсаторов при ВЧ сушке заготовок
опор

- а) и б) – укладка штабеля с вертикальными электродами; в) – плотная (хаотичная) укладка деревянных опор с вертикальными электродами;
 г) – укладка штабеля с горизонтальными электродами; д) – укладка штабеля через прокладки с горизонтальными электродами;
 е) – рабочий конденсатор с электродами в виде секторов окружности;

1 – низкопотенциальный электрод; 2 – высокопотенциальный электрод;
 3 – деревянная опора; 4 – шпация; 5 – прокладка; 6 – ВЧ генератор;
 7 – тележка; w – ширина шпаций; d – воздушный зазор; h – высота прокладки.

Задача исследования связана с численной реализацией. Для этого был использован пакет «Электрическое поле переменных токов» программного комплекса «Elcut». Для расчета были приняты следующие исходные данные: высота штабеля $H = 100$ см; ширина штабеля $B = 100$ см; высота прокладок $h = 2$ см; диаметр опор по верхней части 16 см и 18 см по нижней части; частота генератора $f = 5$ МГц; амплитуда напряжения генератора $U_m = 10$ кВ. Материал опор – сосна; материал подложки – ель при влажности 0 %. Их диэлектрические проницаемости и электропроводности определены по [5], [6] с учетом формулы электропроводности (1) и указаны в таблице 1.

Электропроводность материала σ , См/м, может быть найдена по его диэлектрическим свойствам и определяется по формуле (1):

$$\sigma = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta. \quad (2.10)$$

Таблица 1 - Значения диэлектрических и электрических параметров

Элемент штабеля	Отн. диэлектрическая проницаемость		Электропроводность, См/м	
	ε_x	ε_y	σ_x	σ_y
Подложка	2	2	0	0
Опора	15	15	0,017	0,017
Воздух	1	1	0	0

2.1 РАСЧЕТ ЗАДАЧИ С ВЕРТИКАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Результат расчета методом конечных элементов для двух вариантов с вертикальными электродами показан на рисунке 2 и рисунке 3. Укладки осуществлена методом чередования большей и меньшей стороны опоры. Первый вариант имеет два вертикальных электрода, второй три вертикальных электрода, один из которых высокопотенциальный и два низкопотенциальных.

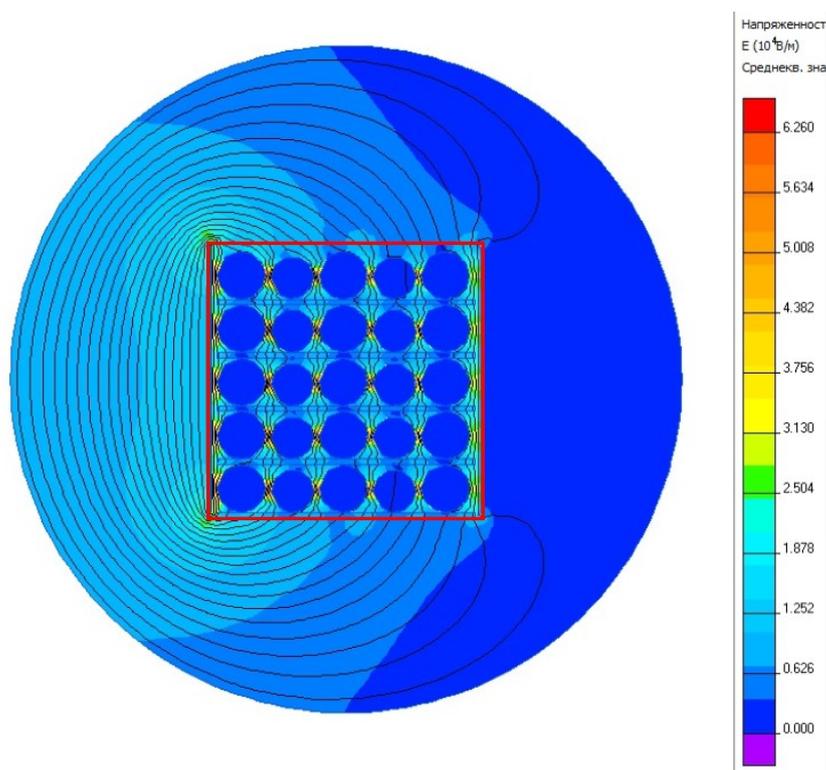


Рисунок 2 - Цветовая картина напряженности электрического поля для первого варианта с вертикальными электродами

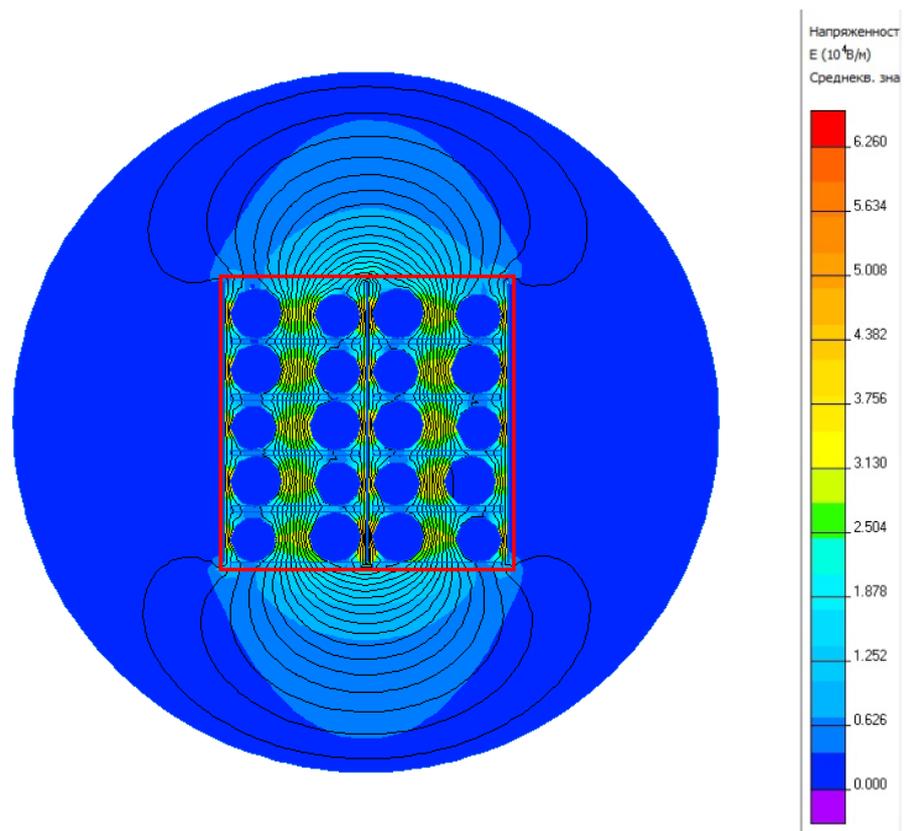


Рисунок 3 - Цветовая картина напряженности электрического поля для второго варианта с тремя вертикальными электродами

Из выделенной красным квадратом области (рис. 2 и рис. 3) экспортированы расчетные данные в виде значений модуля E в узлах прямоугольной сетки с размером ячейки $0,5 \times 0,5 \text{ см}^2$ (массив из 40804 элементов). В программе Excel по определённой методике из этого массива удалены значения напряженности поля в подложке, воздушных зазорах и шпациях. В итоге образован новый массив, состоящий из значений E только в заготовках (опорах), по которому вычислен коэффициент неоднородности $k_{\text{неод}}$, коэффициент заполнения k_z и средняя напряженность $E_{\text{ср}}$. Результаты расчета по двум вариантам приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Расчетные данные

Вариант 1			Вариант 2		
$k_{\text{неод}}$	k_z	$E_{\text{ср}}, \text{ В/м}$	$k_{\text{неод}}$	k_z	$E_{\text{ср}}, \text{ В/м}$
2,15	0,58	635,38	1,66	0,45	775,47

Основываясь на результаты эксперимента, можно сделать вывод, чем плотнее расположены опоры относительно друг друга, тем выше показатель неоднородности. Средняя напряженности зависит не только от расстояния между заготовка, но и от расстояния между электродами, поэтому заметна разница между двумя вариантами. Следовательно, для увеличения эффективности и качества сушки необходимо применить меры по сокращению расстояния между заготовками опор, то есть осуществить плотную укладку и использовать вариант с тремя электродами.

2.2 РАСЧЕТ ЗАДАЧИ С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Результат расчета методом конечных элементов для варианта с горизонтальными электродами представлен на рисунке 4. Вариант укладки осуществлен методом чередования большей и меньшей стороны опоры.

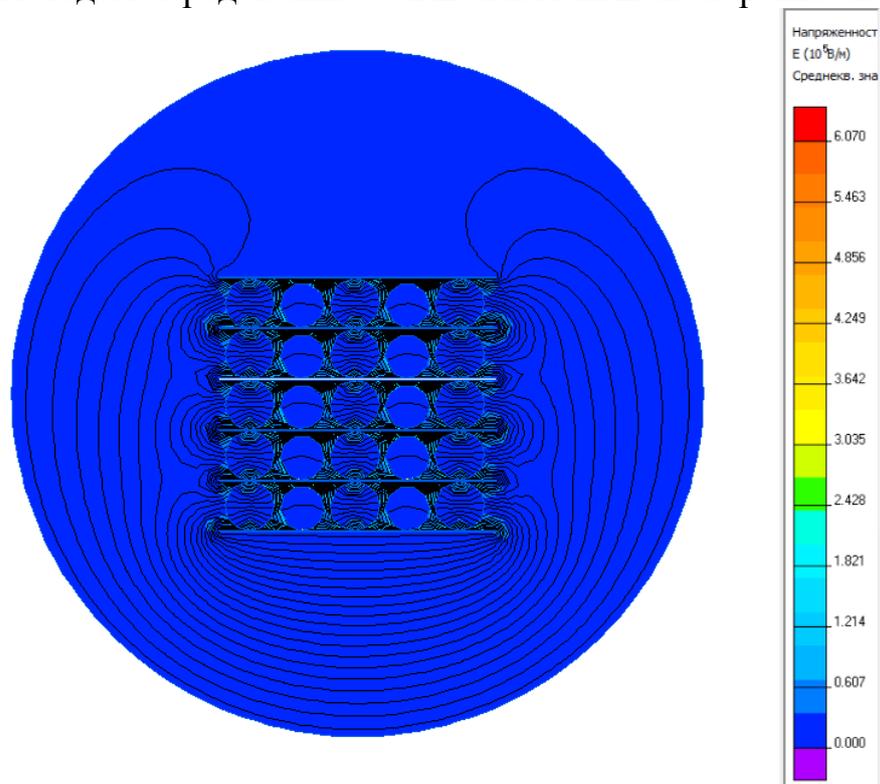


Рисунок 4 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта с горизонтальными электродами без подложек

При данном методе укладки невозможно совершить сортировку данных модуля E из-за одинаковых значений напряженности, как в воздухе, так и в самой опоре. В итоге создать новый массив, состоящий из значений E только в заготовках (опорах), не представляется возможности.

Дальнейший расчет производится с помощью контура внутри заготовки по горизонтальному и вертикальному направлению. Он позволяет в ручном режиме вводить линии (для отображения графика изменения каких-либо параметров поля вдоль них или создания таблицы данных) или выделять контуры (по которым вычисляются интегральные характеристики). Графики распределения напряженности E по длине контура для опор разного диаметра приведены на рисунках 5, 6, 7, 8.

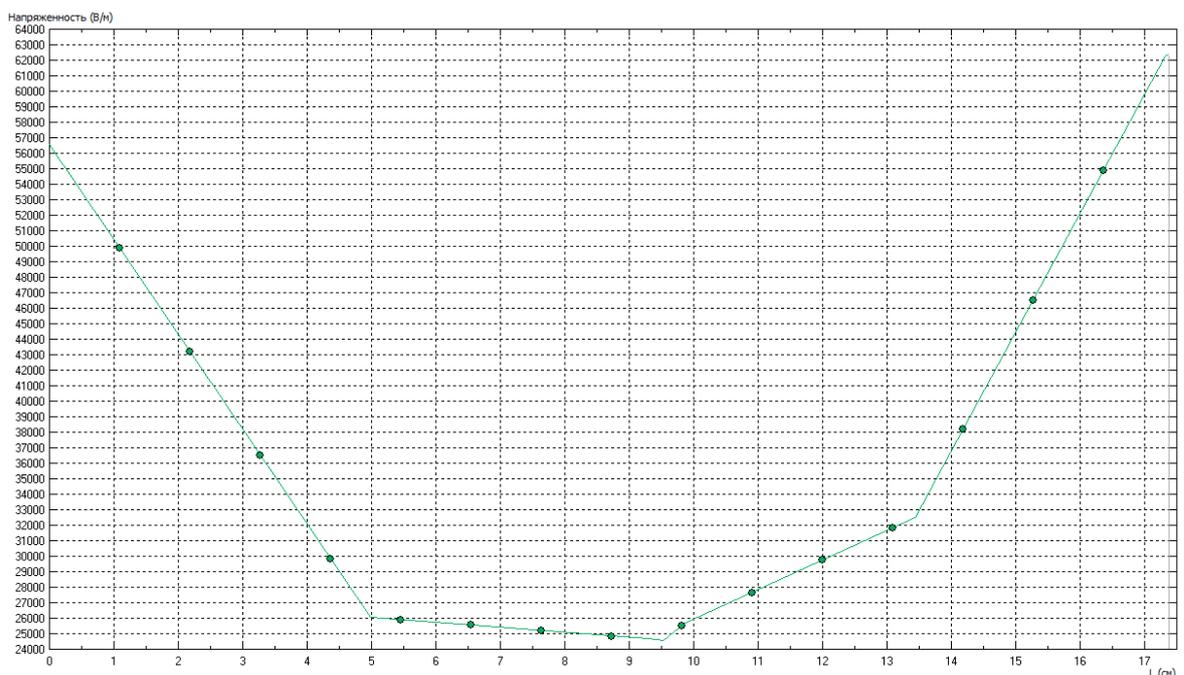


Рисунок 5 – График распределения напряженности E по длине контура в заготовке диаметром 18 см при вертикальном расположении контура

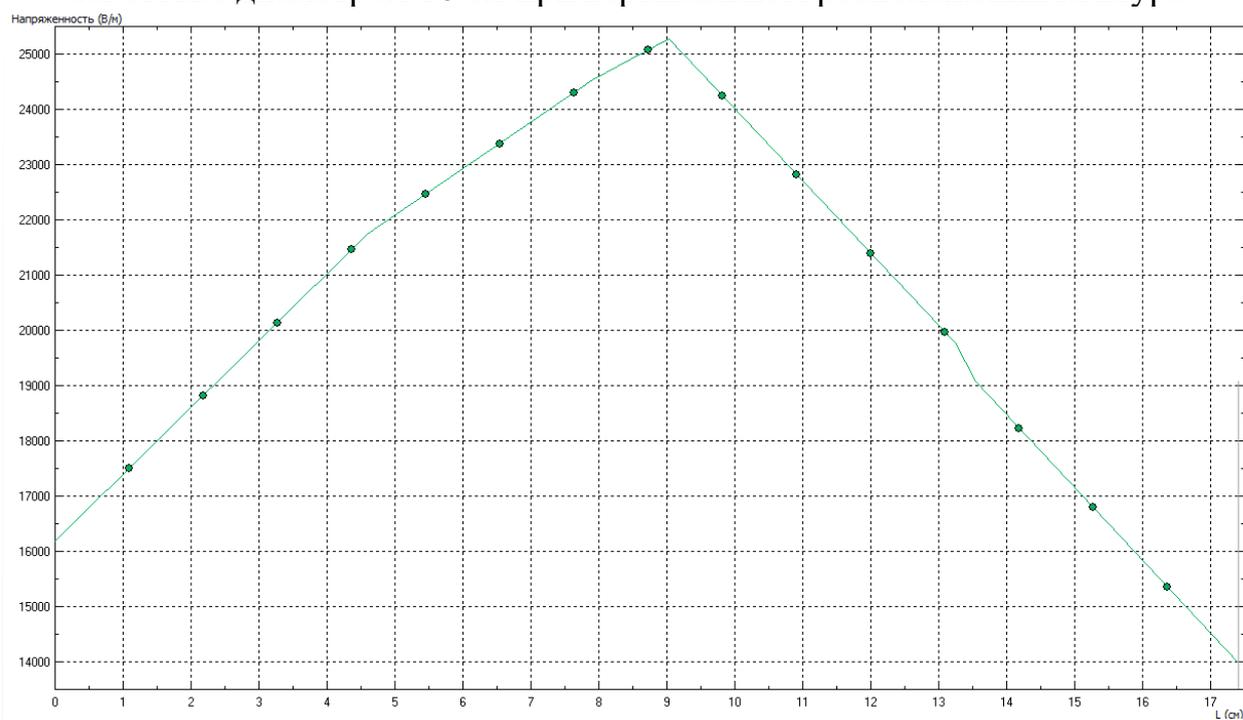


Рисунок 6 – График распределения напряженности E по длине контура в заготовке диаметром 18 см при горизонтальном расположении контура

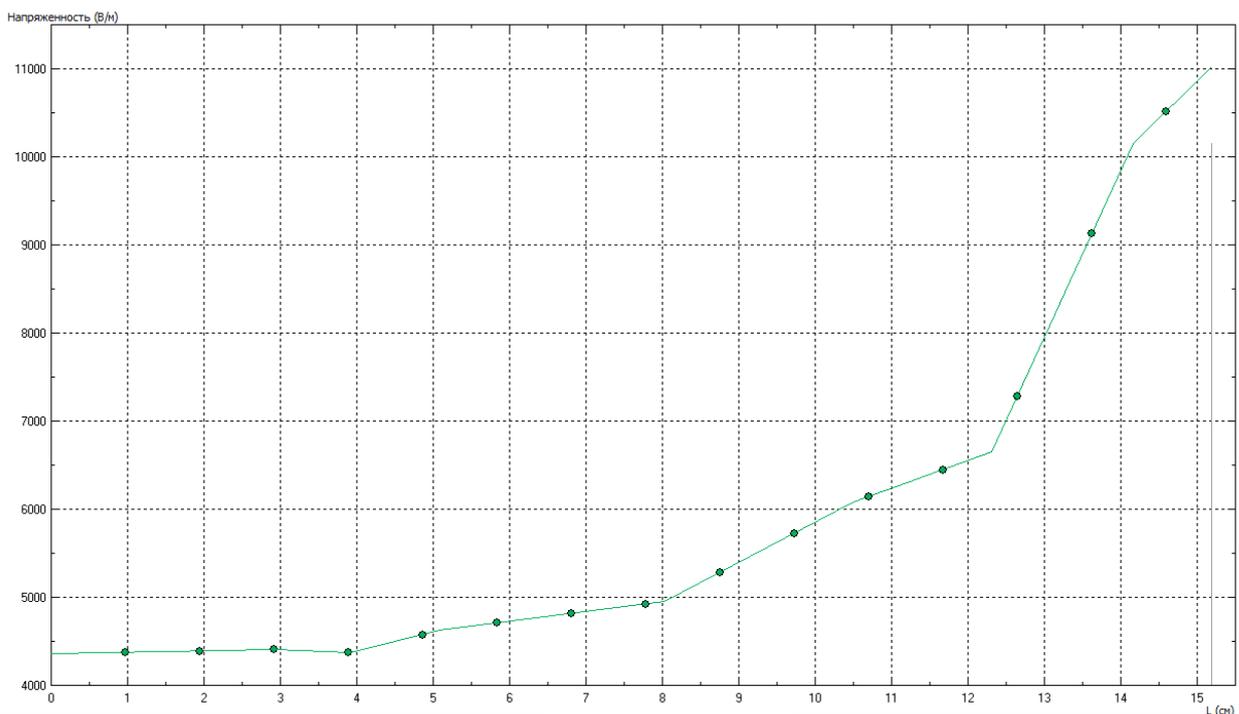


Рисунок 7 – График распределения напряженности E по длине контура в заготовке диаметром 16 см при вертикальном расположении контура

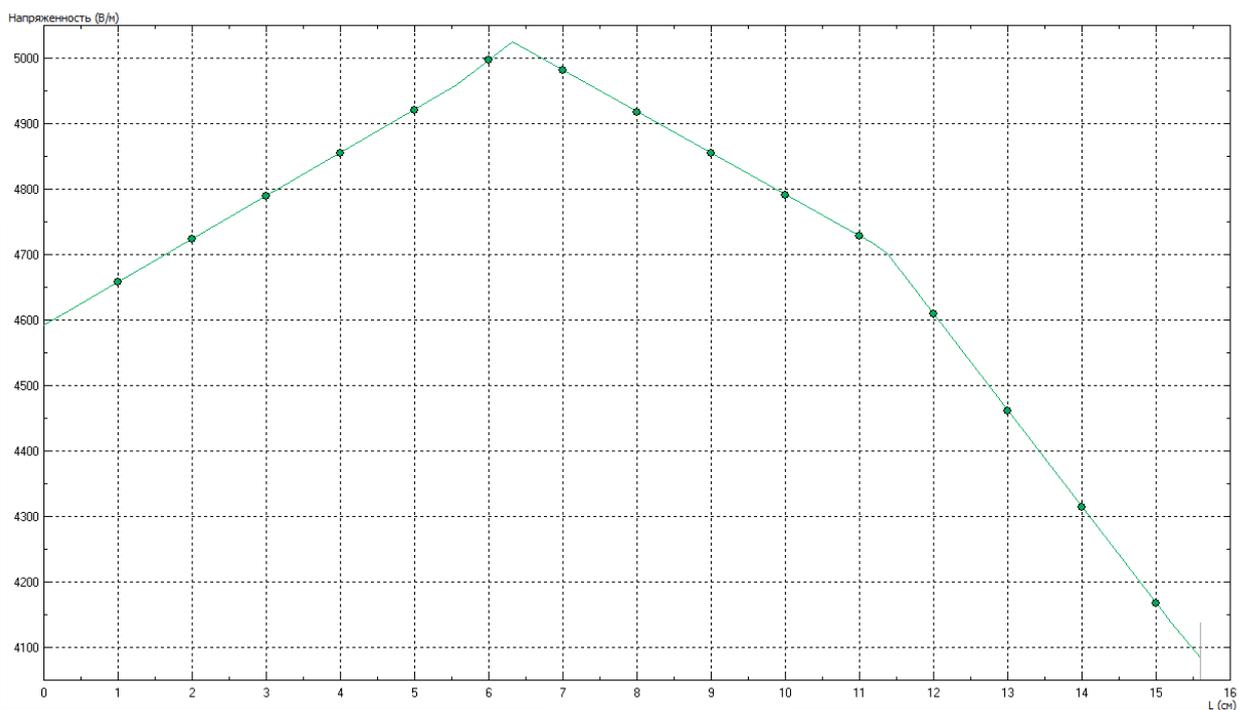


Рисунок 8 – График распределения напряженности E по длине контура в заготовке диаметром 16 см при горизонтальном расположении контура

Принимаем показатели напряженности в остальных заготовках аналогично равными текущим из расчета. Используя полученные данные на графиках, вычислен коэффициент неоднородности $k_{неод}$, и средняя напряженность $E_{ср}$. Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Расчетные данные

Заготовка диаметром 18 см		Заготовка диаметром 16 см	
$k_{\text{неод}}$	$E_{\text{ср}}, \text{В/м}$	$k_{\text{неод}}$	$E_{\text{ср}}, \text{В/м}$
1,99	27593,3	1,99	5256,83

Показания средней напряженности в заготовках большего диаметра в 5 раз выше, чем в заготовках меньшего диаметра. Чтобы выравнять показания напряженности во всех заготовках и высушивать их равномерно, необходимо каждый ряд заполнять заготовками одного диаметра. Для предотвращения перегрева в местах близкого расположения заготовки к электроду, следует увеличить воздушный зазор между заготовкой и электродом и не допускать их соприкосновения.

2.3 РАСЧЕТ ЗАДАЧИ ДЛЯ ВАРИАНТОВ РАБОЧЕГО КОНДЕНСАТОРА С ЭЛЕКТРОДАМИ В ВИДЕ СЕКТОРОВ ОКРУЖНОСТИ

Результаты расчета методом конечных элементов для вариантов рабочего конденсатора с электродами в виде секторов окружности с разным изгибом на рисунке 9, 10, 11, 12

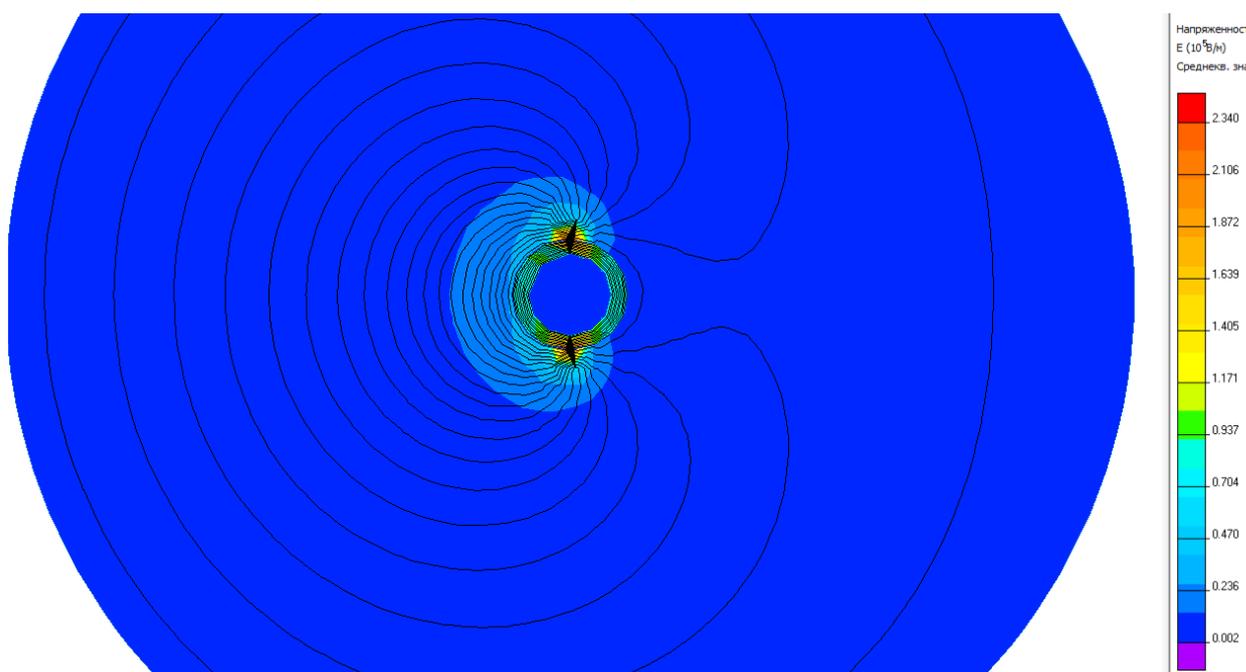


Рисунок 9 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта с сектором окружности 180 градусов и радиусом изгиба $r_{\text{из}} = 12$ см

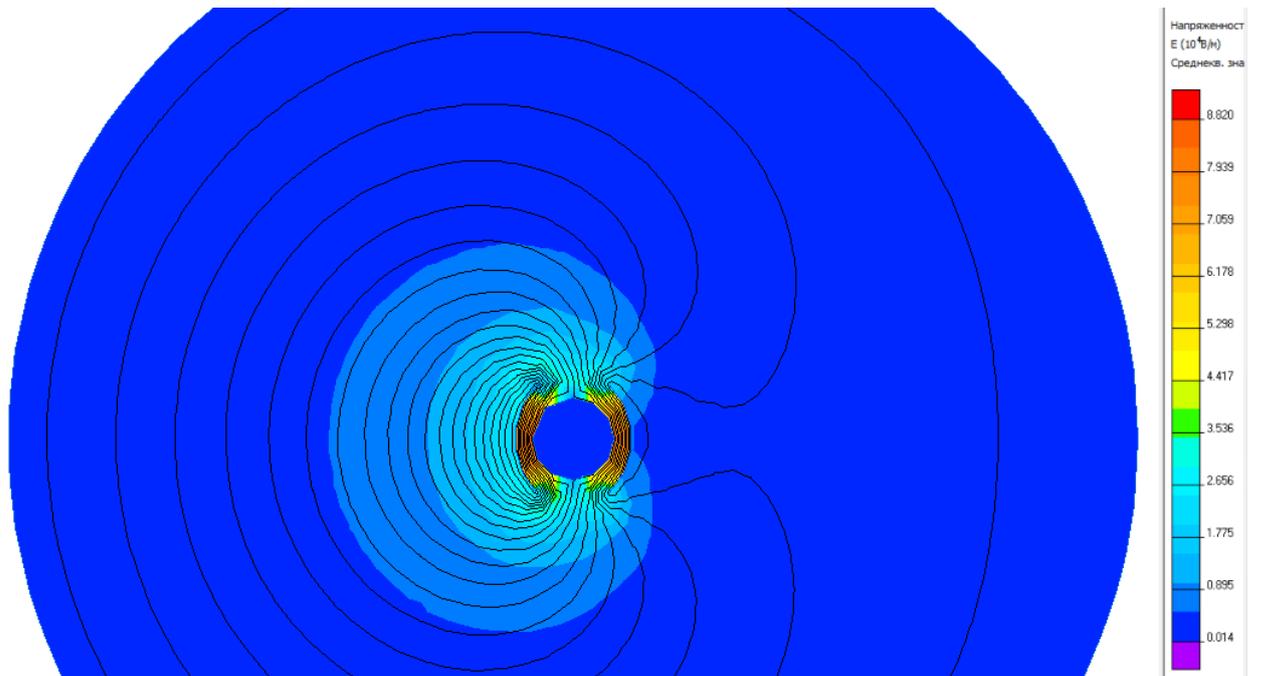


Рисунок 10 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта с сектором окружности 150 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 14,4$ см

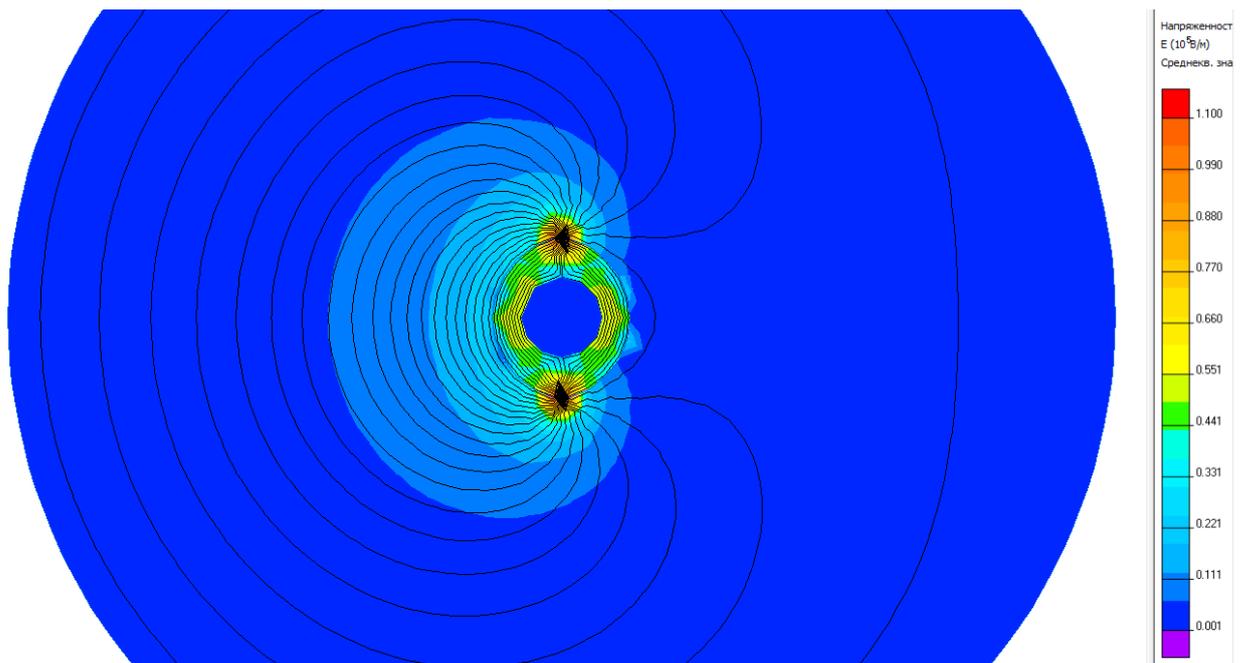


Рисунок 11 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта с сектором окружности 120 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 16,9$ см

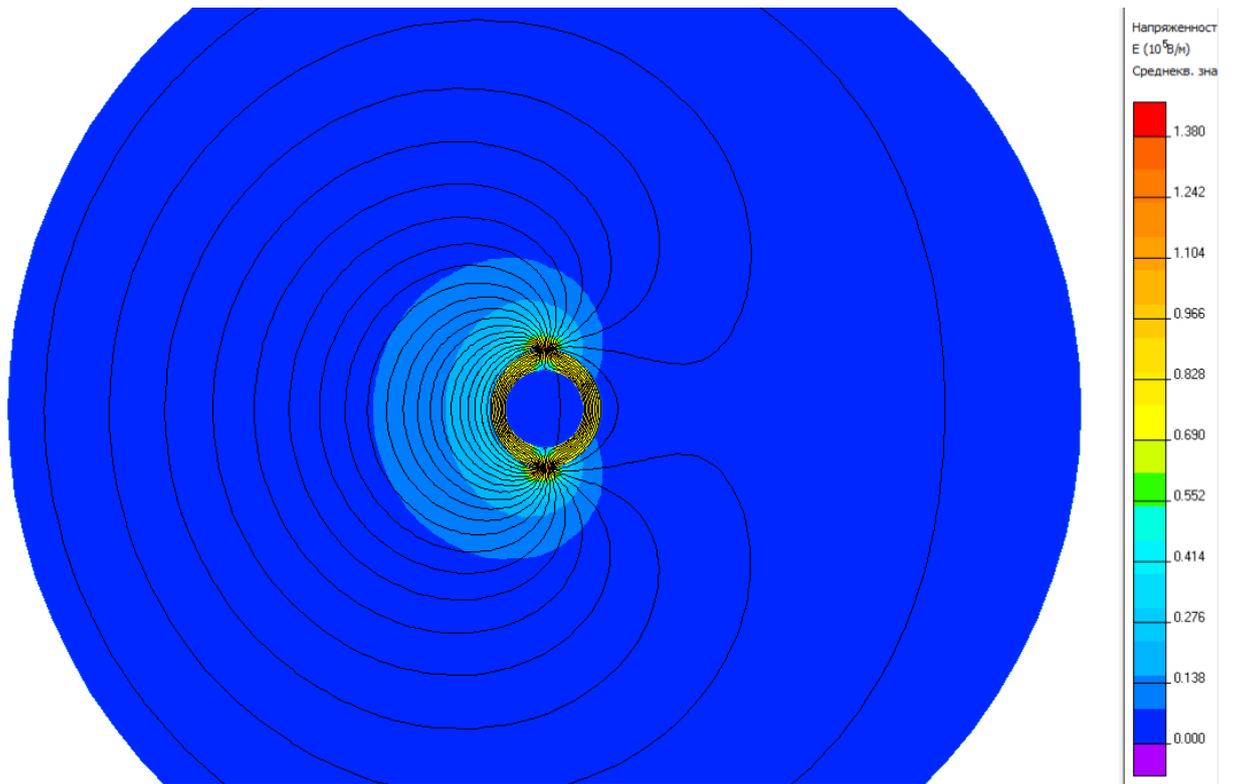


Рисунок 12 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта с сектором окружности 90 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 18,7$ см

Дальнейший расчет производится с помощью контура внутри заготовки по горизонтальному и вертикальному направлению. Пример графиков напряженности E от длины контура для варианта с сектором окружности 90 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 18,7$ см в горизонтальном и вертикальном направлениях приведен на рисунке 13 и 14

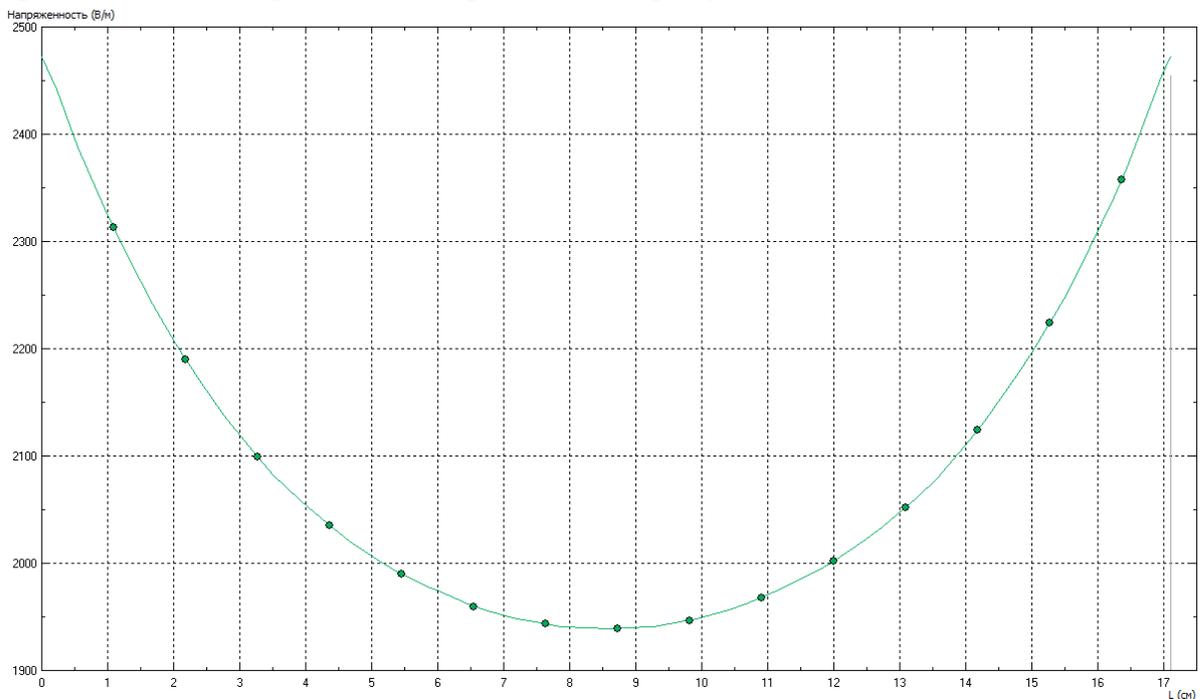


Рисунок 13 – График распределения напряженности E по длине контура для варианта с сектором окружности 90 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 18,7$ см при вертикальном расположении контура

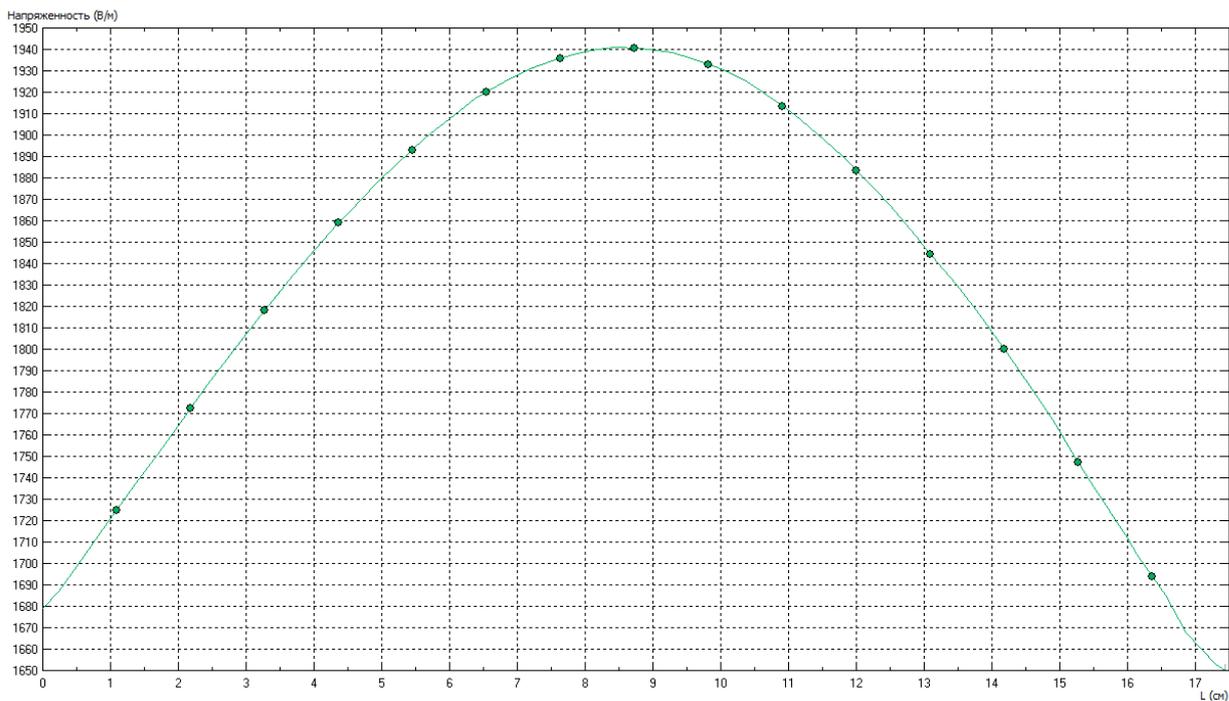


Рисунок 14 – График распределения напряженности E по длине контура для варианта с сектором окружности 90 градусов и радиусом изгиба $r_{из} = 18,7$ см при горизонтальном расположении контура

Используя полученные данные для каждого варианта с разным сектором окружности, вычислен коэффициент неоднородности $k_{неод}$, и средняя напряженность $E_{ср}$. Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Расчетные данные

С изгибом 180 градусов		С изгибом 150 градусов		С изгибом 120 градусов		С изгибом 90 градусов	
$k_{неод}$	$E_{ср}, В/м$	$k_{неод}$	$E_{ср}, В/м$	$k_{неод}$	$E_{ср}, В/м$	$k_{неод}$	$E_{ср}, В/м$
1,19	2282,8	1,2	1961,2	1,07	1326,1	1,03	1873,7

По полученным данным построим графики зависимости радиуса кривизны электродов от коэффициента неоднородности и средней напряженности в заготовка деревянных опор. Графики представлены на рисунках 15 и 16.

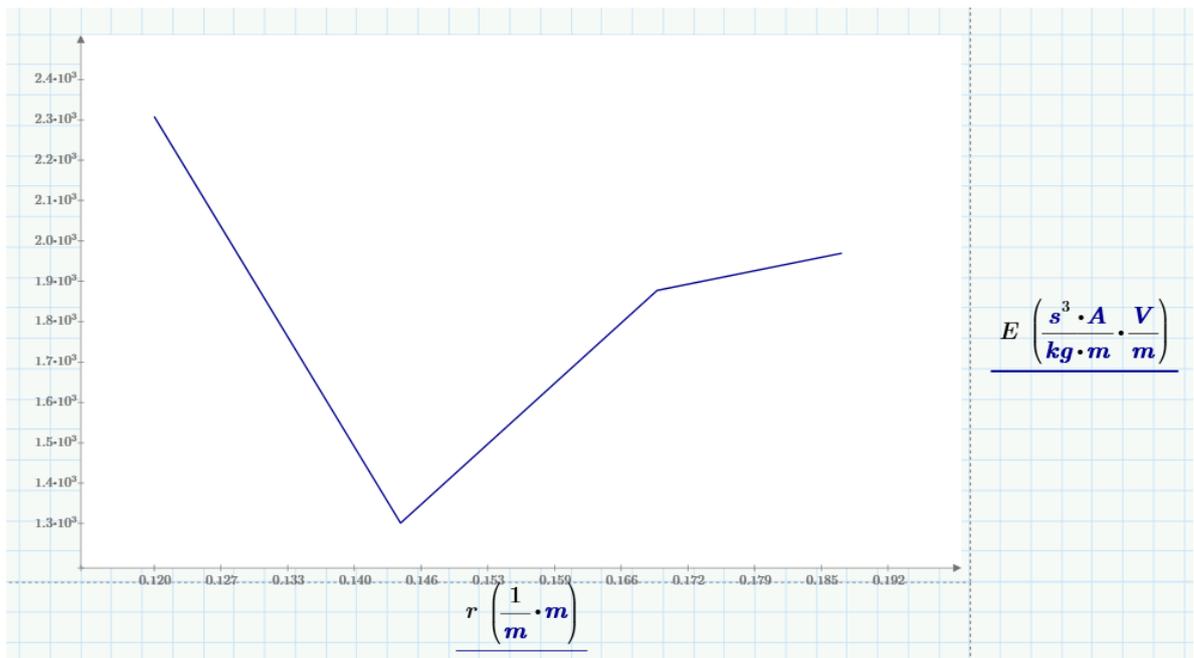


Рисунок 15 – График зависимости радиуса кривизны электродов от средней напряженности в заготовка деревянных опор

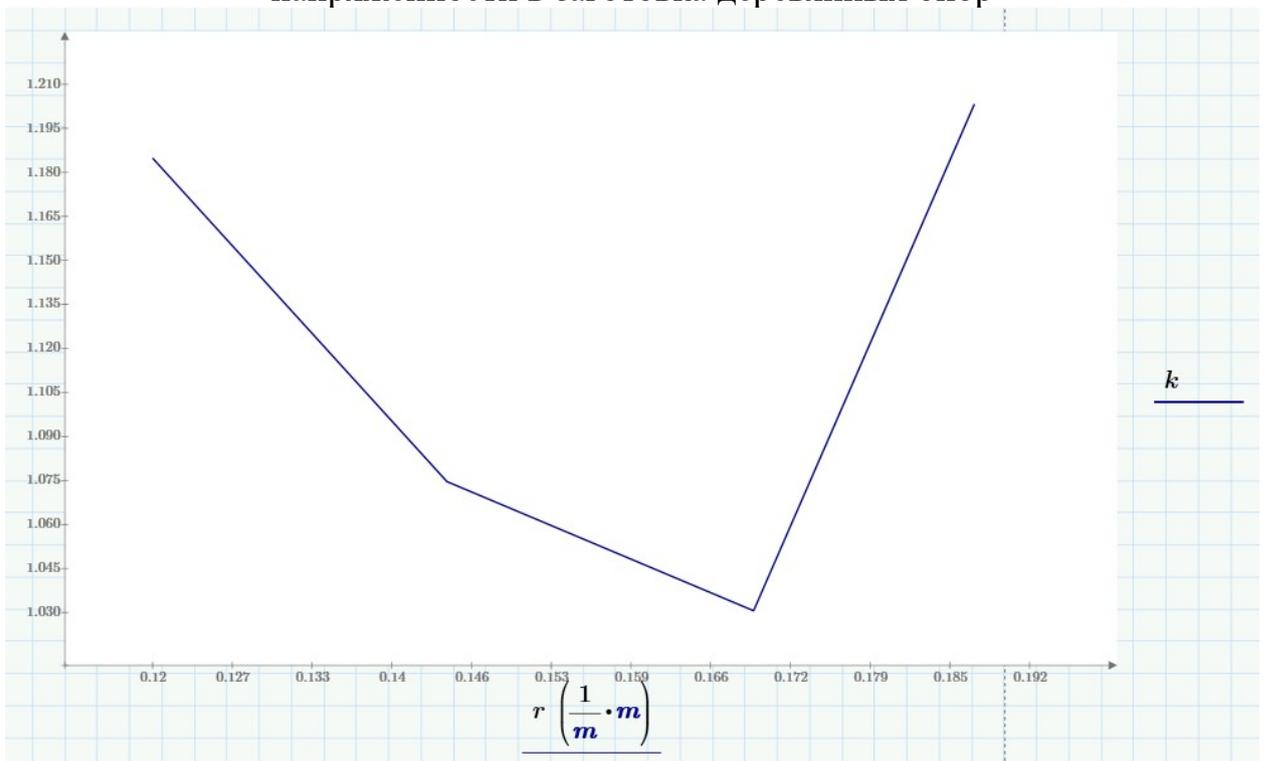


Рисунок 16 – График зависимости радиуса кривизны электродов от коэффициента неоднородности

На основе полученных данных и графиков можно отметить, что для обеспечения наибольшей напряженности в заготовке необходимо увеличить радиус изгиба электродов, либо при меньшем радиусе изгиба создать форму электродов повторяющую форму заготовки.

2.4 РАСЧЕТ ЗАДАЧИ С ХАОТИЧНОЙ УКЛАДКОЙ ЗАГОТОВОК

Результаты расчета методом конечных элементов для варианта с хаотичной укладкой опор на рисунке 17.

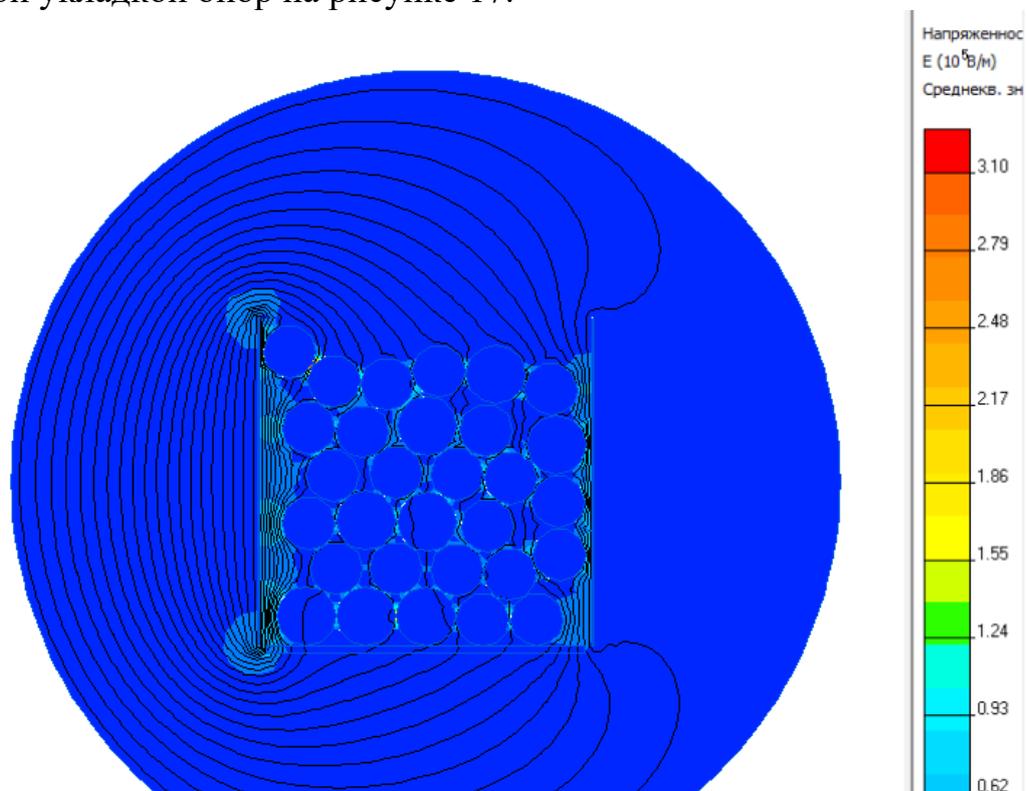


Рисунок 17 - Цветовая картина напряженности электрического поля для варианта хаотичной укладки заготовок

Эксперимент проводился для двадцати различных вариантов укладок. Из заданной заранее зоны по каждому варианту экспортировались данные в виде значений напряженности E в узлах прямоугольной сетки с размером ячейки $0,5 \times 0,5 \text{ см}^2$ (массив из 40804 элементов).

В программе Excel из этого массива вырезаны значения напряженности поля воздушных зазорах. Получили новый массив, который состоит полностью из напряженности E только в заготовках (опорах). По этим данным вычислен коэффициент неоднородности $k_{\text{неод}}$, коэффициент заполнения k_z и средняя напряженность $E_{\text{ср}}$. Результаты расчета приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Расчетные данные

Укладка 1			Укладка 2			Укладка 3		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
2,65	0,71	1131,04	3,01	0,64	995,35	2,66	0,75	938,94
Укладка 4			Укладка 5			Укладка 6		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
2,89	0,70	863,78	3,09	0,70	807,90	4,21	0,62	592,79
Укладка 7			Укладка 8			Укладка 9		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
3,63	0,62	681,65	2,40	0,66	1247,46	2,18	0,71	1378,41
Укладка 10			Укладка 11			Укладка 12		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
2,38	0,69	1262,44	2,83	0,66	1058,38	2,97	0,6685	1007,78
Укладка 13			Укладка 14			Укладка 15		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
2,67	0,66	1122,84	2,87	0,68	1045,00	3,34	0,62	896,89
Укладка 16			Укладка 17			Укладка 18		
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$
3,91	0,60	767,14	3,44	0,62	871,83	2,93	0,65	1022,23
Укладка 19			Укладка 20					
$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$	$k_{неод}$	k_3	$E_{ср}, В/М$			
2,64	0,68	1137,36	2,63	0,67	1138,02			

По полученным данным построим зависимости коэффициента заполнения от коэффициента неоднородности и средней напряженности в заготовках деревянных опор точкам. Зависимости представлены на рисунках 18 и 19.

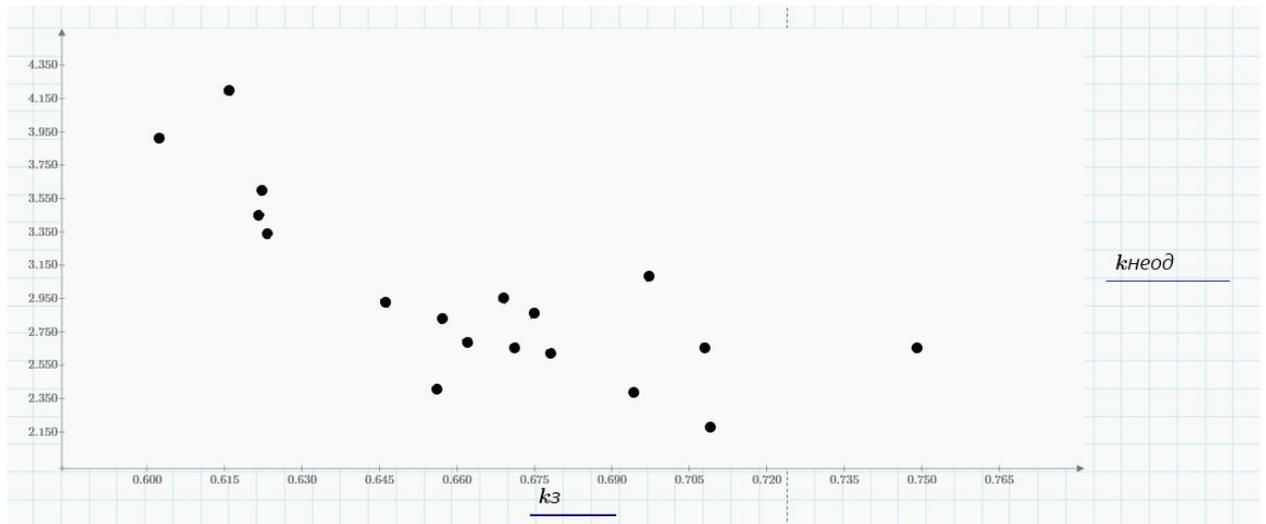


Рисунок 18 – Зависимость коэффициента заполнения от коэффициента неоднородности

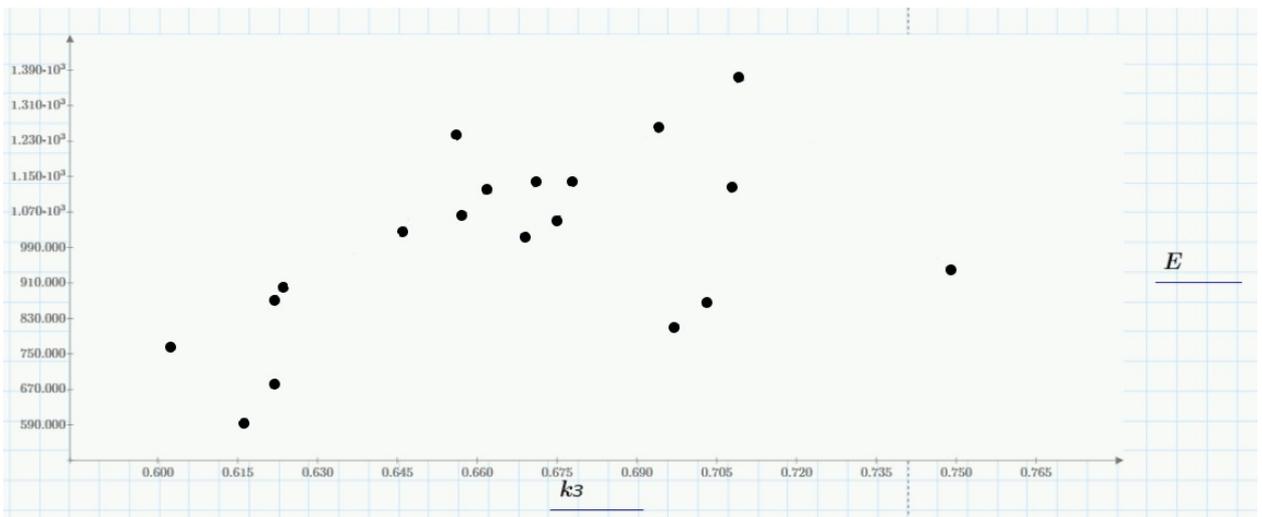


Рисунок 19 – Зависимость коэффициента заполнения от средней напряженности в заготовках деревянных опор

Из-за большого разброса точек нет возможности провести линейную зависимость и отследить динамику изменения коэффициента неоднородности и средней напряженности по разным вариантам хаотичной укладки.

Следующей задачей будет решение метода наименьших квадратов (МНК) для наиболее точного прогнозирования зависимых переменных, то есть найти наиболее приближенную к реальности функцию. Это поможет проследить динамику изменения напряженности при различных вариантах хаотичной укладки заготовок в рабочую камеру.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был проведен анализ электромагнитных процессов в рабочих камерах для сушки деревянных заготовок (опор) при разных конфигурациях электродов и способах укладки штабеля.

Эти данные позволили увидеть разницу в отклонениях напряженности, коэффициентах заполнения и неоднородности при абсолютно разных способах укладки заготовок и выявить причины, которые этому сопутствуют. В варианте с вертикальными электродами видно, что для наиболее однородного распределения необходимо расположить заготовки как можно ближе друг к другу. При конфигурации с горизонтальными электродами выяснили, что очень важно каждый ряд заполнять заготовками одного диаметра, иначе сушка пройдет не эффективно и часть заготовок, находящихся близко к электродам – перегреются.

На основании результатов проведенного анализа, по оставшимся способам укладки, была сформирована цель дальнейших исследований, а именно, исследовать влияние большего числа геометрических параметров модели на уровень и равномерность напряженности электрического поля в штабеле; с помощью корреляционного анализа и метода наименьших квадратов (МНК), найти наиболее приближенную функцию изменения напряженности при различных вариантах хаотичной укладки заготовок в рабочую камеру. Эти результаты решат проблему поиска оптимальной конфигурации рабочего конденсатора и формы электродов, а также будут полезны проектировщикам для оптимизации конструкции ВЧ сушильных камер и эксплуатирующему их персоналу при выборе способа укладки штабеля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буль О.Б. Методы расчета систем электрических аппаратов. Программа ANSYS : учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений / О.Б. Буль. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 288 с.
2. Беззубцева М.М., Волков В.С., Прибытков П.С. Расчет электромагнитного механоактиватора с применением программного комплекса ANSYS // Известия Санкт Петербургского государственного аграрного университета. – 2009. – №15. – С. 150-154. 3.
3. Качанов А.Н., Коренков Д.А., Ревков А.А., Максимов В.В., Воркунов О.В. Моделирование процессов высокочастотной сушки деревянных опор в вакуумной камере // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 6. С. 130-142. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-6-130-142.
4. Коренков Д.А., Еремеев В.Д. анализ возможных конфигураций рабочих камер при высокочастотной сушке заготовок деревянных опор // Энерго- и ресурсосбережение – XXI век : материалы XX международной научнопрактической конференции (г. Орёл, 14 – 16 ноября 2022 г.). – Орёл: ОГУ им. И.С. Тургенева, 2022. – 162 с.
5. Torgovnikov, G.I. Dielectric properties of wood and wood based materials [Text] / G.I. Torgovnikov. – Berlin: Springer Verlag, 1993. – 194 p.
6. Воробьев, Г.И. Лесная энциклопедия [Текст]. В 2 т. Т.1. / Г.И. Воробьев, Н.А. Анучин, В.Г. Атрохин, В.Н. Виноградов. – М.: Сов. энциклопедия, 1985. – 563 с.