

# Энергетика. Электротехника Energetics. Electrical engineering

Научная статья  
УДК 537.856  
DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28101>

Э.Р. Маннанов<sup>1</sup> ✉, С.А. Галунин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> АО «Силовые машины», Санкт-Петербург, Россия;

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»  
им. В.И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

✉ [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА ИНДУКТОРОВ ДЛЯ НАГРЕВА ДИСКОВ

*Аннотация.* В рамках исследования выполняется поиск универсальной конструкции индуктора для обеспечения возможности проведения процесса локальной термообработки дисков простого и сложного профиля, в частности, для наиболее востребованного ряда типоразмеров демпферных пружин грузовых автомобилей. Получены новые данные исследований различных типоразмеров металлических дисков. Выявлено влияние геометрических, электрических и позиционных параметров на температурное распределение по рассматриваемому изделию при его электромагнитной термообработке, в частности, исследованы зависимости температуры от габаритных размеров нагреваемого объекта, количества и длин пальцев демпферной пружины, влияние зоны отгиба пальцев на конечный температурный профиль. Результаты проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ направлены на сокращение проектных затрат при изготовлении индукторов под каждый типоразмер демпферных пружин грузовых автомобилей и на повышение эффективности процесса нагрева за счет контроля режима работы.

*Ключевые слова:* индукционный нагрев, численное моделирование, индуктор, термообработка, конечно-элементный метод, демпферная пружина.

*Для цитирования:*

Маннанов Э.Р., Галунин С.А. Разработка индукторов для нагрева дисков // *Материаловедение. Энергетика.* 2022. Т. 28, № 1. С. 5–20. DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28101>

Это статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Scientific article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28101>*E.R. Mannanov*<sup>1</sup> ✉, *S.A. Galunin*<sup>2</sup><sup>1</sup> JSC "Power machines", St. Petersburg, Russia;<sup>2</sup> St. Petersburg Electrotechnical University "LETI",  
St. Petersburg, Russia✉ [emil-mannanov@mail.ru](mailto:emil-mannanov@mail.ru)

## DESIGNING INDUCTION COILS FOR DISKS HEATING

*Abstract.* In this study, the authors search for the universal inductor design to provide uniform local heat treatment of simple and complex profile disks, in particular, for the most demanded standard sizes of truck diaphragm springs. New research data have been obtained for various sizes of metal disks. The influence of geometric, electrical and positional parameters on the temperature distribution of the product under consideration during its electromagnetic heat treatment was revealed. The dependence of temperature on the dimensions of the heated object, the number and length of the fingers of the diaphragm spring, the influence of the finger bend zone on the final temperature profile were studied too. The results of the research and development work are aimed at reducing design costs for the manufacture of inductors for each standard size of truck diaphragm springs and at increasing the efficiency of the heating process by controlling the operating mode.

*Keywords:* induction heating, numerical simulation, induction coil, heat treatment, finite element method, diaphragm spring.

*Citation:*

E.R. Mannanov, S.A. Galunin, Designing induction coils for disks heating, *Materials Science. Power Engineering*, 28 (01) (2022) 5–20, DOI: <https://doi.org/10.18721/JEST.28101>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

**Введение.** Разработанные теоретические основы индукционного нагрева и аналитические, математические и численные методы расчета и анализа позволили решить большой объем задач проектирования индукционных установок. Значительный вклад в развитие индукционных систем были сделаны такими учеными, как Вологдин В.П., Слухоцкий А.Е., Немков В.С., Царевский В.В., Зимин Л.С., Рапопорт Э.Я., Шепеляковский К.З., Дзалиев С.В., Лопух Д.Б., Демидович В.Б., Чмиленко Ф.В., Никаноров А.Н., Донской А.В., Васильев А.С., Бодажков В.А., А.В. Лыков, А.М., Самарский А.А., и др. [1–5].

Индукционный нагрев может быть применен на всех закалённых узлах и деталях. Частным примером является индукционный нагрев диска демпферных пружин грузовых автомобилей под отпуск. Демпферная пружина имеет конкретное количество пальцев, которые выполняют роль рычагов выключения сцепления. Упругие свойства пальцев непосредственно влияют на плавность включения сцепления, а изменением формы прорезей можно регулировать жесткость демпферной пружины. При индукционной термообработке важно принимать во внимание назначение и режим нагрева, область термообработки и геометрические параметры обрабатываемого изделия, а также технологию изготовления обрабатываемого конструктивного элемента. Диапазон габаритных размеров демпферных пружин для располагается от 268 до 430 мм и каждый уникальный диск со сложным профилем – демпферной пружины требует индивидуального проектирования конструкции нагревателя и настройки режима термообработки (входные пара-

метры – уровень подводимой мощности, частоты, позиционирование индуктора и изделия, геометрические параметры; выходные параметры – уровень максимальных и усредненных температурных распределений в заданной области нагрева, оценка перепада температур по сечению и вдоль радиуса термообрабатываемого изделия сложного профиля).

Индукционные системы имеют широкое применение, однако в рамках данной работы выполняется периодический режим нагрева под отпуск стального диска со сложным профилем – демпферной пружины, температура нагрева  $450^{\circ}\text{C}$ , рабочая частота от 1 до 10 кГц.

Стандартные требования, предъявляемые к нагревательному оборудованию, в частности, к установкам индукционного нагрева следует отнести стремление обеспечить надежность конструкции, заданный температурный уровень, высокую производительность, высокие энергетические характеристики при минимальных эксплуатационных затратах и оптимизировать систему электропитания и управления. Критериями оценки эффективности используемых индукционных систем служит комплексная работа таких показателей, как достижение равного температурного распределения по радиусу и/или сечению (локально или по всему объему) за минимальное время нагрева при исключении перегревов.

Рапопорт Э.Я., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А. и другие ученые рассматривали вопросы нагрева вращающихся дисков индукционным методом. Как в теории, так и в практике, важное значение имеют краевые эффекты. Ранние работы были сделаны с применением аналитических методов, а более современные уже представляли численные решения.

Нагрев заготовок, обладающих вращательной симметрией широко применяется в различных промышленных технологиях и требует повышенного внимания при проектировании индукторов. Для дисков обычно используется спиральный, кольцевой или петлевой индуктор.

При помещении диска в высокочастотное электромагнитное поле, в диске индуцируются вихревые токи (токи Фуко), под воздействием протекания которых материал диска нагревается. Проникающее в заготовку переменное электромагнитное поле затухает с глубиной. Существенная часть электромагнитной энергии переходит в тепловую. Данное физическое явление называется поверхностным эффектом. Выраженность эффекта повышается с ростом частоты, поэтому нагрев внутренних слоев обеспечивается за счет теплопроводности термообрабатываемого изделия.

В большинстве случаев, при нагреве требуется получить равномерное распределение температуры по всему объему объекта или обеспечить локальное равномерное распределение поле. Температурное распределение в диске необходимое для технологического процесса, главным образом требуется в установившемся режиме, когда устойчивое во времени температурное поле является результатом баланса между источниками тепла и тепловыми потерями с поверхности диска.

Принципиальным значением обладает движение нагревателя или нагреваемого объекта. Широкое распространение имеет внедрение поступательного движения, как в случае нагрева лент, слябов и др. В частности, применяется вращение изделий, которые обладают вращательной симметрией. В таком случае вихревой ток в диске также будет обладать вращательной симметрией.

В связи с постоянным развитием науки и техники, для сокращения проектных затрат при изготовлении индукторов актуальным является определение эффективной концепции индукционного нагрева и исследование электротепловых процессов, поиск универсальной конструкции индуктора для обеспечения возможности проведения процесса локальной термообработки дисков простого и сложного профиля, в частности, для наиболее востребованного ряда типоразмеров демпферных пружин грузовых автомобилей.

Цель данной работы заключается в разработке универсальной конструкции индуктора для локального равномерного нагрева широкого диапазона типоразмеров дисков демпферных пружин.

### Математическая модель решения сопряженных задач

Математическая модель решения связанной электротепловой задачи лежит в основе построения численных моделей при проектировании индукционных систем. В целом, разработка численной модели заключается в преобразовании инженерного описания проблемы в четкую математическую постановку. В работах [6–11] предложены методики моделирования сопряженной задачи и способы реализации процедур вычисления для достижения целевых функций.

Алгоритм, представленный на рис. 1, демонстрирует совместное электротепловое решение задачи с учетом нелинейных свойств.

Процессы, протекающие в металлах при работе индукционной установки, описываются системой уравнений электромагнетизма и теплопроводности с нелинейными коэффициентами. В свою очередь, нелинейные коэффициенты связаны с зависимостью свойств металлических изделий от температуры и напряженности электромагнитного поля, чем собственно и обусловлена связь электромагнитной и тепловой задачи.

Температурное поле определяет величину удельного сопротивления и величину магнитной проницаемости каждого элемента дискретизации. В блоке поиска промежуточных значений величин, по имеющемуся дискретному набору известных значений формируется массив с данными о распределении внутренних источников теплоты, полученного после решения электромагнитной задачи. Полученный набор данных используется в качестве нагрузки в тепловой задаче. При равенстве элементов дискретизации в обеих задачах, соблюдается равенство массивов их внутренних источников теплоты. Далее находится температурное распределение на следующем временном участке, определяемом шагом по времени. При неудовлетворении критериев окончания расчетов выполняется циклический переход к пункту 1.

Важную роль играет величина шага и заданная точность расчета, поскольку данные параметры должны быть согласованы, в частности, в соответствии с построенной сеткой численной модели. Задача требует итерационной адаптации и грамотного описания целевой функции.

Применительно к задаче нагрева в исследовании [7–11], целевая функция рассчитывается по формуле (1) и интерпретируется, как отклонение распределения температуры к заданному уровню 450°С в процентах.

$$f_{\text{опт}} = \min \left( \max [T - T_{\text{max}}] \right). \quad (1)$$

Также может быть включен модуль оптимизации, как в каждый блок расчета, так и в конкретном блоке. Достижению целевой функции может поспособствовать группирование переменных и использование взаимосвязанных или независимых контуров оптимизации для каждой из нижеперечисленных групп переменных: конструктивные, описывающие геометрические размеры индуктора; позиционные, определяющие положение индуктора, заготовки и других объектов системы; электрические, определяющие величину тока в индукторе и частоту; временные, определяющие продолжительность термобработки и охлаждения, скорость перемещения индуктора / заготовки.

#### *Исследования индукционных систем для нагрева дисков простого и сложного профиля*

В работах [6–11] представлены разработанные автором численные 2D и 3D модели, написанные на параметрическом языке программирования на базе пакета ANSYS Mechanical APDL (ANSYS Parametric Design Language) и результаты исследований различных индукционных конфигураций систем для локального нагрева дисков и демпферных пружин индукционным методом.

Создание численных параметрических моделей было обусловлено необходимостью разработки универсальной конструкции индукционного нагревателя способного обеспечить нагрев широкого диапазона типоразмеров демпферных пружин, металлических заготовок в форме дисков и колец и других осесимметричных металлических изделий.

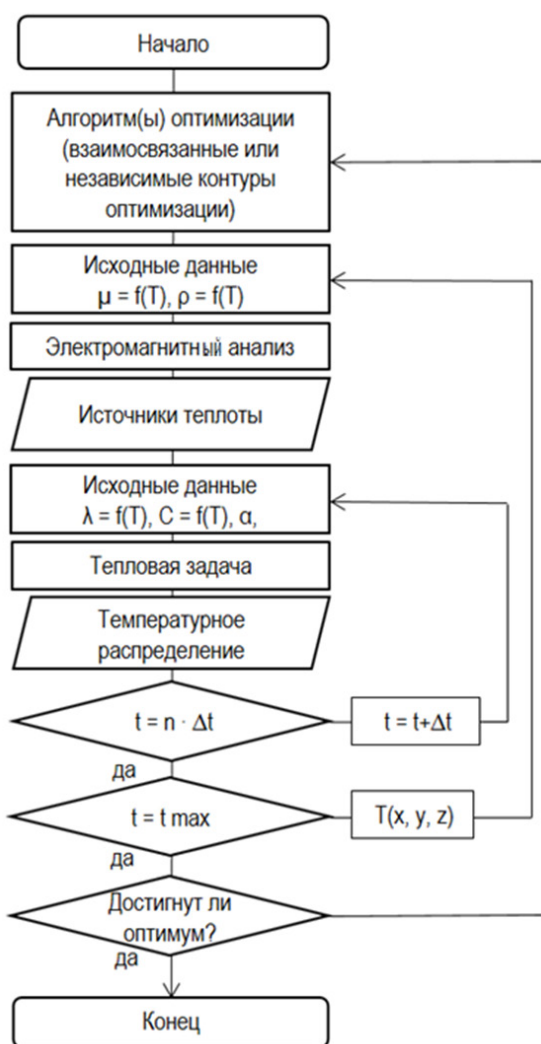


Рис. 1. Алгоритм численного решения связанной электротепловой задачи

Fig. 1. Numerical solution algorithm of a coupled electrothermal problem

В электромагнитной задаче выполняется гармонический анализ. Тип теплового анализа – переходный. В задачах заданы граничные условия III рода, которые характеризуются законом конвективного теплообмена между поверхностью тела и окружающей средой.

С целью упрощения расчетов принято допущение, что нагреваемый диск имеет простой и плоский профиль, а индуктор имеет спиральную форму. Эскиз исследуемой системы представлен на рис. 2, геометрия параметризованной численной модели в 2D постановке представлена на рис. 3.

Параметры оптимизации – ширина витков и толщина стенок медного водоохлаждаемого индуктора, величина воздушного зазора, полюсный шаг витков, рабочая частота тока, действующее значение тока, время нагрева, диаметр и толщина объекта нагрева, электротепловые нелинейные свойства диска.

В качестве рабочей частоты тока установлено 2,5 кГц. Данное значение представляет собой нижнюю границу оптимальных частот. Предполагается наличие сложного профиля образца, поэтому использование частот выше выбранной может повлечь за собой возникновение горячих точек.

Проанализировав результаты моделирования, следует отметить, что наблюдается, нагрев в зоне под индуктором, а максимальные значения температуры зависят преимущественно от данной нагрузки, величины воздушного зазора и концепции нагрева. Один из численных резуль-

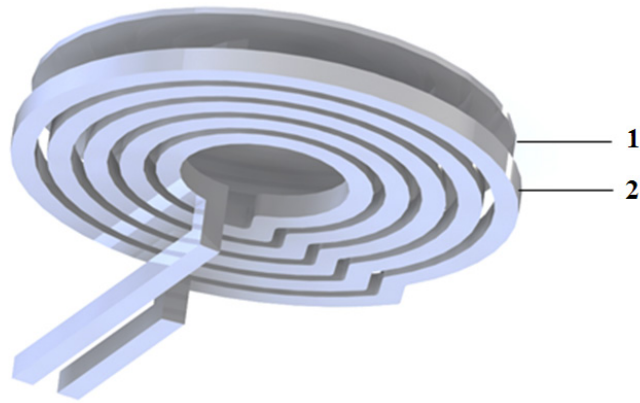


Рис. 2. Эскиз системы: 1 – диск; 2 – индуктор  
 Fig. 2. System sketch: 1 – disk; 2 – inductor

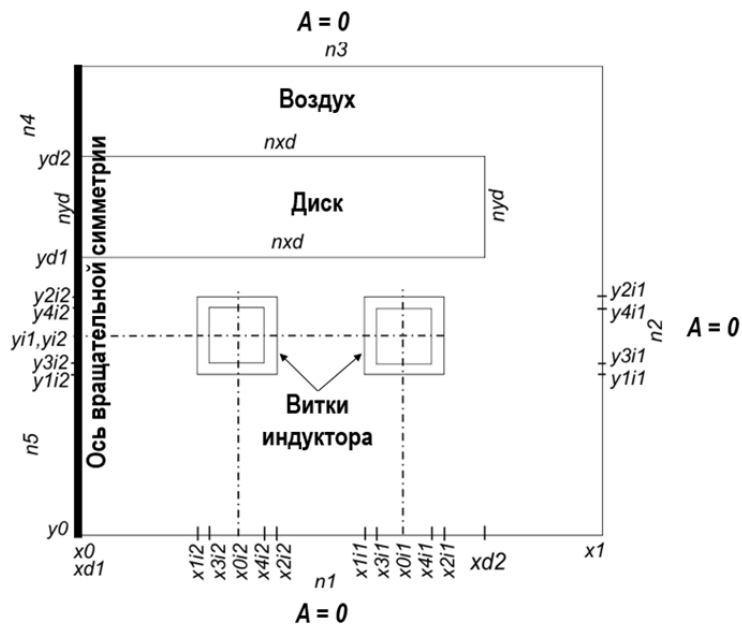


Рис. 3. Геометрия численной системы в 2D постановке  
 Fig. 3. Geometry numerical systems in 2D

татов расчетов представлен на рис. 4, на котором проиллюстрировано  $\frac{3}{4}$  диска для отражения распределения температуры по поверхности и сечению объекта нагрева.

В исследовании [7–11] была разработана расчетная методика моделирования индукционной системы для нагрева диска простого и сложного профиля в 3D постановке. Моделирование геометрии имеет общую черту, связанную с возможностью использования симметрии системы. Вместо того, чтобы моделировать диск целиком, для расчета принята только одиночная секция, используя при этом азимутальную периодичность структуры изделия.

В результате параметрических исследований, получено равномерное распределение температуры в заданной области в диапазоне целевого уровня температур для заготовок диаметром 268 – 420 мм, что соответствует поставленной задаче (рис. 6). На нижеследующем рис. 7 приве-

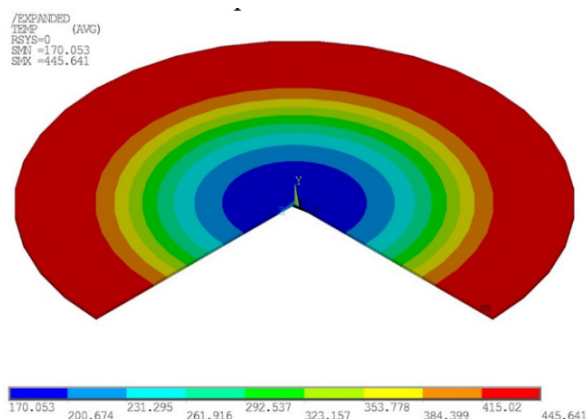


Рис. 4. Температурное распределение в диске

Fig. 4. Temperature distribution in the disk

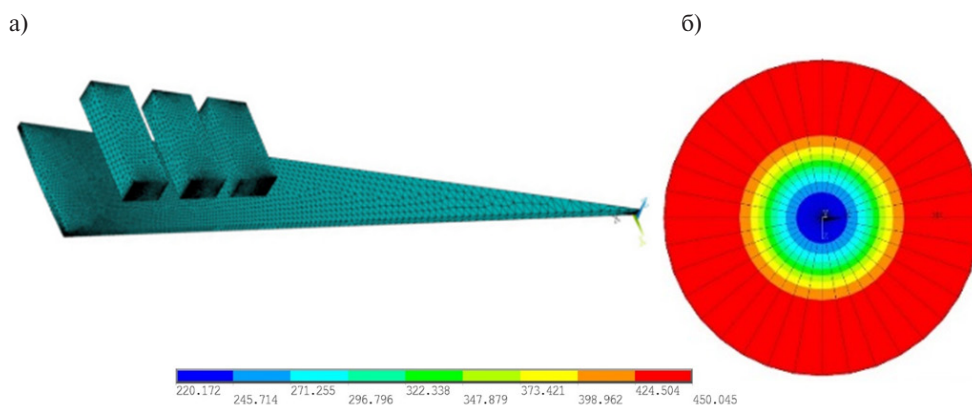


Рис. 5. а) конечно-элементная 3D система "Индуктор – диск". Область моделирования 90;

б) температурное распределение на поверхности диска

Fig. 5. a) finite element 3D system "Inductor – disk". Modeling area 90;

b) temperature distribution on the disk surface

дено семейство зависимостей, демонстрирующее изменение полного КПД индуктора при вариации воздушного зазора и рабочей частоты.

Аналогичная постановка задачи применена и для демпферной пружины, которая имеет сложную форму. Данное решение позволяет регулировать количество пальцев демпферной пружины и сократить время, необходимое на расчеты. Основные геометрические размеры демпферной пружины показаны на рис. 8. На рис. 9 показано схематическое представление постановки задачи в модели, на рис. 10 конечно-элементная 3D – система, а результаты параметрических расчетов представлены на рис. 11.

Известно, что упругие свойства пальцев влияют на плавность включения сцепления, а изменением формы прорезей и количества пальцев можно регулировать жесткость демпферной пружины. Данное исследование учитывало габаритные размеры демпферной пружины, количество и форму пальцев, нагрев в продольном или поперечном (встречное включение токов в витках индуктора) высокочастотном магнитном поле. Исходные данные моделирования демпферной пружины следующие: количество пальцев 12, 18, 20, 24; соответствующие области моделирования, град(мин) 15(0), 10(0), 9(0), 7(30).

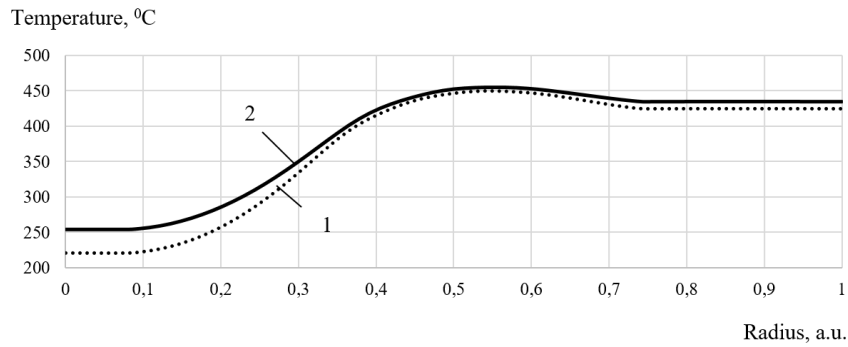


Рис. 6. Температурный профиль на поверхности заготовки вдоль радиуса при нагреве диска: 1 – четырех витковый индуктор и заготовка 350 мм; 2 – пяти витковый индуктор и заготовка 420 мм

Fig. 6. Temperature profiles on workpiece surface along the radius with heated disk: 1 – four-turn inductor and workpiece 350 mm; 2 – five-turn inductor and workpiece 420 mm

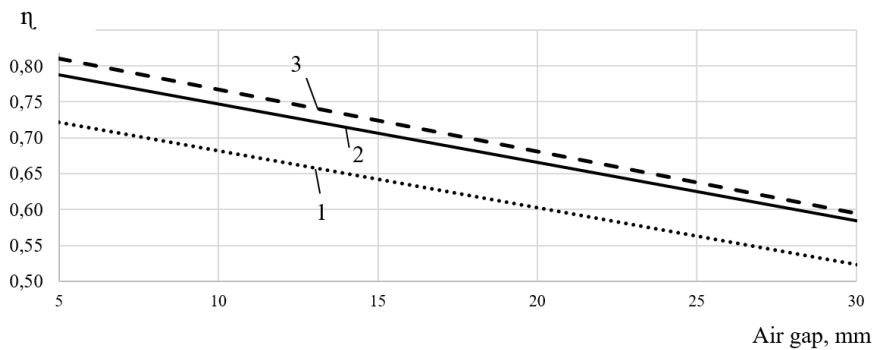


Рис. 7. Влияние воздушного зазора на полный КПД индуктора при различных рабочих частотах тока: 1 – 1 кГц; 2 – 2,5 кГц; 3 – 8 кГц

Fig. 7. Air gap influence on the total inductor efficiency at different operating current frequencies: 1 – 1 kHz; 2 – 2.5 kHz; 3 – 8 kHz

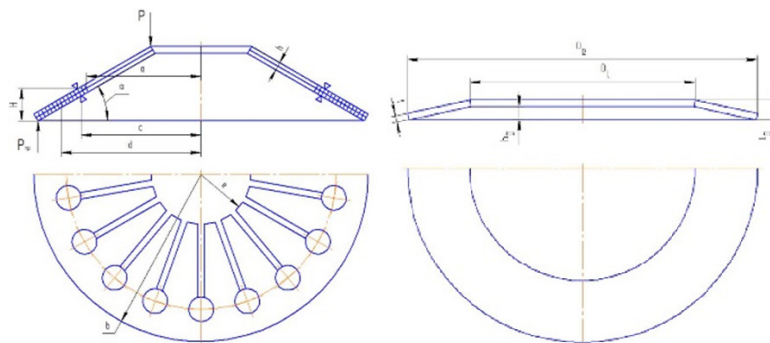


Рис. 8. Основные геометрические размеры демпферной пружины:  $D_e$  – внешний диаметр, мм;  $D_i$  – внутренний диаметр, мм;  $t$  – толщина пружины, мм;  $h_0$  – высота ненагруженной пружины, мм;  $l_0 = h_0 + t$ , где  $l_0$  – общая высота ненагруженной пружины, мм;  $F$  – сила сжатия пружины, N;  $S$  – смещение, мм;  $D_f = D_i \cdot (2 \cdot S \cdot \sin\beta)$ , мм;  $D_f$  – фактический внутренний диаметр, мм

Fig. 8. Basic geometrical dimensions of the damper spring:  $D_e$  – outer diameter, mm;  $D_i$  – inner diameter, mm;  $t$  is the thickness of the spring, mm;  $h_0$  is the height of the unloaded spring, mm;  $l_0 = h_0 + t$ , where  $l_0$  is the total height of the unloaded spring, mm;  $F$  is the compression force of the spring, N;  $S$  – displacement, mm;  $D_f = D_i \cdot (2 \cdot S \cdot \sin\beta)$ , mm;  $D_f$  – actual inner diameter, mm



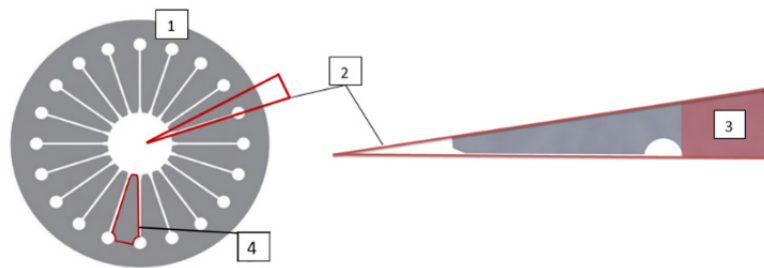


Рис. 9. Схематическое представление постановки задачи: 1 – общий вид изделия; 2 – область моделирования; 3 – зона нагрева; 4 – палец демпферной пружины  
 Fig. 9. Schematic problem statement: general view of workpiece 1; simulation zone 2; heating zone 3; finger 4 of diaphragm spring

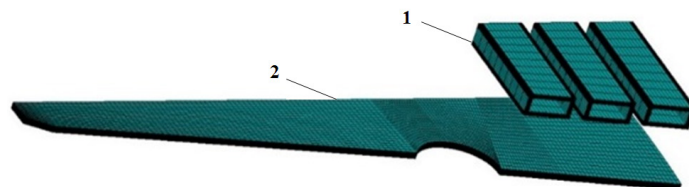


Рис. 10. Конечно-элементная 3D система: 1 – индуктор; 2 – демпферная пружина  
 Fig. 10. Finite-element 3D system: induction coil 1, diaphragm spring 2

По результатам расчетов получено равномерное распределение температуры в заданной области в диапазоне целевого уровня. При максимальном внешнем диаметре демпферной пружины 420 мм, толщине диска 3 мм, частоте нагревающего электромагнитного поля в 2,5 кГц, при воздушном зазоре равном 10 мм требуется 44 кВт, чтобы обеспечить высокоэффективный локальный равномерный нагрев до требуемого температурного уровня; при уменьшении диаметра до 268 мм, достаточно мощности в 15 кВт. В частности, получены температурные поля при вариации количества и длины пальцев демпферной пружины, при регулировании зоны отгиба пальцев с настройкой режима нагрева. Установлены основные связи конечных температурных распределений с геометрией нагреваемого изделия. Нагрев осуществлен с использованием как продольного, так и поперечного магнитных полей [7–11].

В исследовании [6, 7] была разработана расчетная методика моделирования индукционной системы для нагрева диска простого профиля вращением в высокочастотном магнитном поле в 3D постановке. Предлагаемая концепция нагрева дисков заключается в обеспечении локального нагрева вращением в высокочастотном продольном магнитном поле (см. рис. 12). Угловая скорость (Гц, об / сек) описана в глобальной декартовой системе координат заданием постоянных: OMEGAX, OMEGAY, OMEGAZ.

Модели способны дать возможность количественно оценить не только распределение температуры, но и пространственные и временные градиенты температуры в процессе нагрева. Эти данные могут быть использованы для расчета внутренних напряжений и деформаций в диске, а также для технологической оценки режима нагрева.

#### ***Разработка конструкций индукторов и апробация результатов компьютерных исследований***

Конструкции индукторов разрабатываются с учетом физического явления – поверхностного эффекта, на котором основан принцип индукционного нагрева. Поверхностный эффект проявляется как в нагреваемом теле, так и в индуктирующем проводе, в силу вытеснения высокочастотного тока к поверхности.

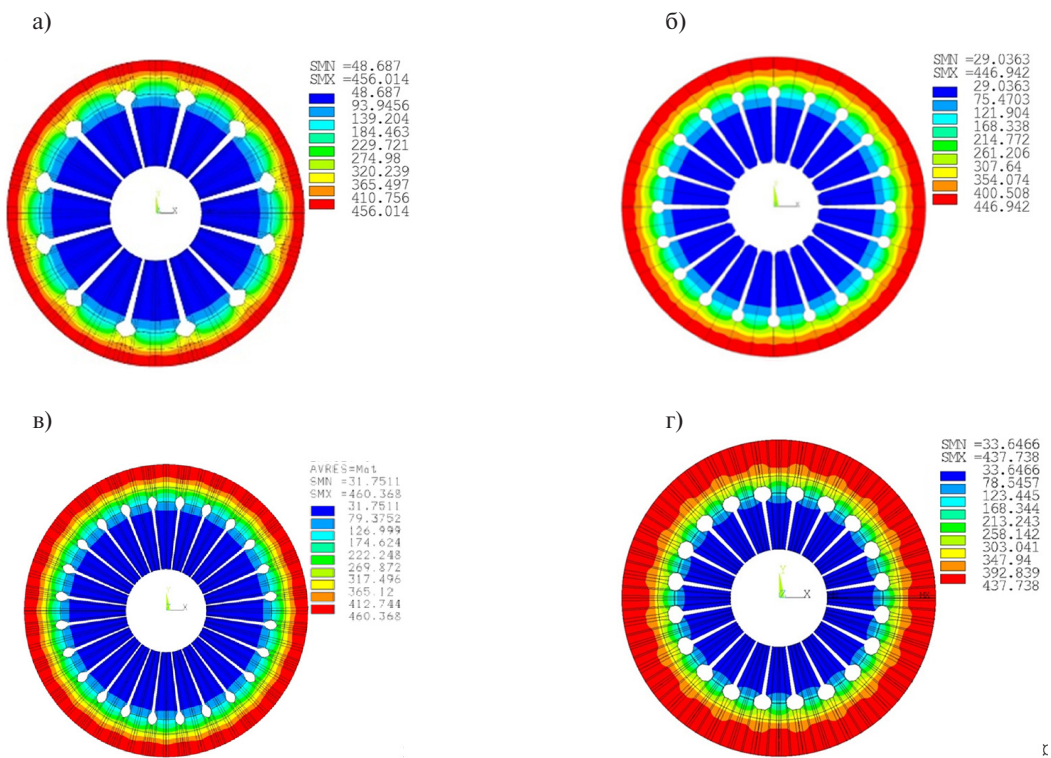


Рис. 11. Конечное температурное распределение при нагреве в продольном а), б), в) или поперечном г) высокочастотном магнитном поле. Количество пальцев: а) 12; б) 20; в) 24; г) 20

Fig. 11. The final temperature distribution after heating in a longitudinal a), b), c) or transverse d) high-frequency magnetic field. Number of fingers: a) 12; b) 20; c) 24; d) 20

стотного тока к поверхности. Поскольку рассматриваемая система имеет более одного нагревательного провода, логичным является ожидать неоднородность распределения плотности тока по поверхности нагревателей в результате физического явления называемым эффектом близости, который в свою очередь является одной из форм поверхностного эффекта.

Следует отметить, что в предлагаемом техническом решении, заготовка вращается с постоянной угловой скоростью. Проведение термообработки обеспечивается за счет того, что на область заготовки, находящейся внутри индуктора, наводятся вихревые токи, что инициирует генерацию источников теплоты. При повороте, на следующем участке диска, оказавшемся в индукторе, происходят аналогичные процессы. Процесс нагрева является непрерывным, поэтому предполагается, что распределение температуры будет постепенно становиться симметричным за счет вращения заготовки. Важную роль играет центрирование заготовки относительно индуктора.

Естественная конструкция индукционной системы для нагрева плоских изделий из ферромагнитной стали предполагает также наличие магнитопровода, однако для нагрева дисков, в частности, имеющих сложный профиль данное решение является не логичным. Перегрев диска является недопустимым, поскольку результатом будет чрезмерное разупрочнение, как в случае отпуска. Магнитопровод же, концентрирует области протекания вихревых токов, тем самым, сужая поля распределения источников теплоты. При нагреве диска со сложным профилем, характер распределения температуры будет значительно отличаться от системы, не включающей в себя магнитопровод. Прогнозирование распределения температуры в объеме диска также будет упрощено.

Разработанная конструкция индуктора представлена на рис. 13 а), в). Толщина стенок водоохлаждаемой медной трубки прямоугольного сечения составляет 1 мм.

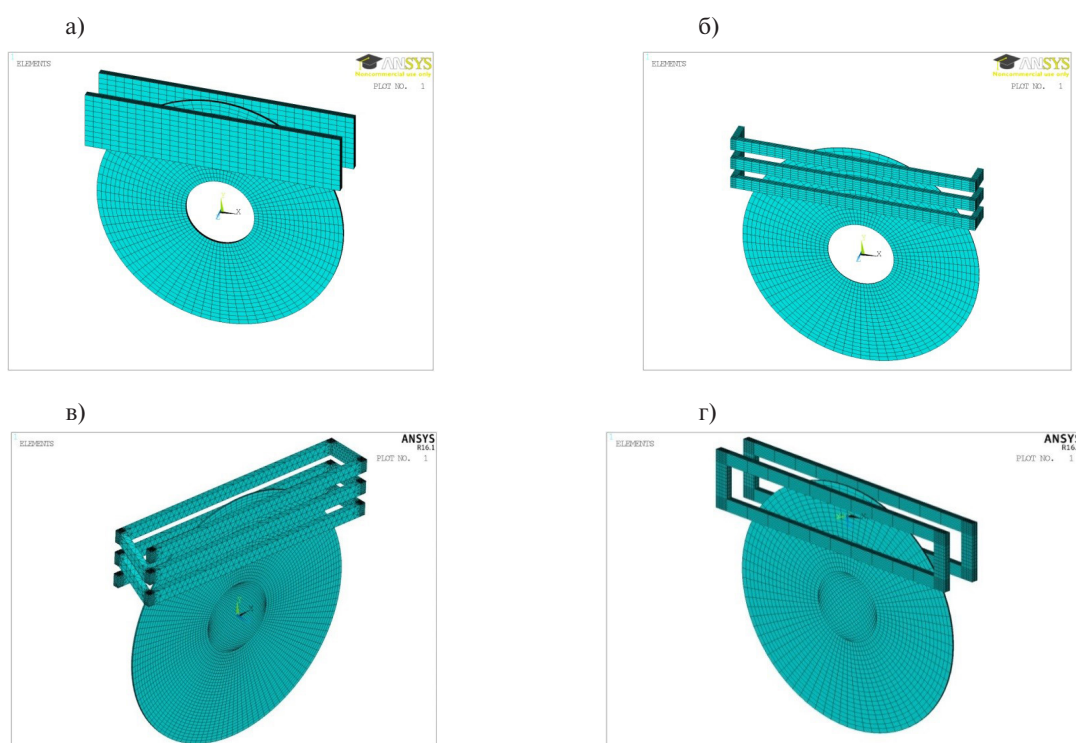


Рис. 12. 3D-модели индукционной системы нагрева в продольном (а, б, в) и попе-речном (г) магнитных полях  
 Fig. 12. Induction heating system 3D models in longitudinal (a, b, c) and transverse (d) magnetic fields

Как известно, индукционные системы нагрева в поперечном магнит-ном поле (ПМП) доста-точно эффективны в целях получения заданных равномерных температурных полей.

Наиболее близкой по характеру протекающих процессов к реальным конструкциям нагрева-телей является индукционная система, состоящая из нагреваемого диска и двух индукторов, к примеру, выполненных в виде прямоугольных рамок с током конечной длины и ширины. В це-лях исследования разработана конструкция индуктора для нагрева изделия вращением в ПМП (рис. 13 б), г)). Лабораторный стенд индукционной системы нагрева в продольном (а) и конструк-ция индукционного нагревателя в поперечном (б) магнитных полях представлена на рис. 14.

Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными представлено на рис. 15. Разработанные модели повторяют спроектированные натурные образцы и реальные условия нагрева [7]. В качестве исходных данных для расчета выступили конструктивные па-раметры разработанных индукторов (рис. 13), электро – теплофизические свойства всех объ-ектов системы и электрические параметры системы. Основные параметры экспериментальной системы отражены в табл. 1 (см. рис. 16).

Таблица 1

### Основные параметры экспериментальной системы

Table 1

### The main parameters of the experimental system

Внешний диаметр, мм	Рабочая частота, кГц	Время нагрева, с	Мощность, кВт	Скорость вращения заготовки, об/мин
268 – 420	2,5	30	15 – 44	18

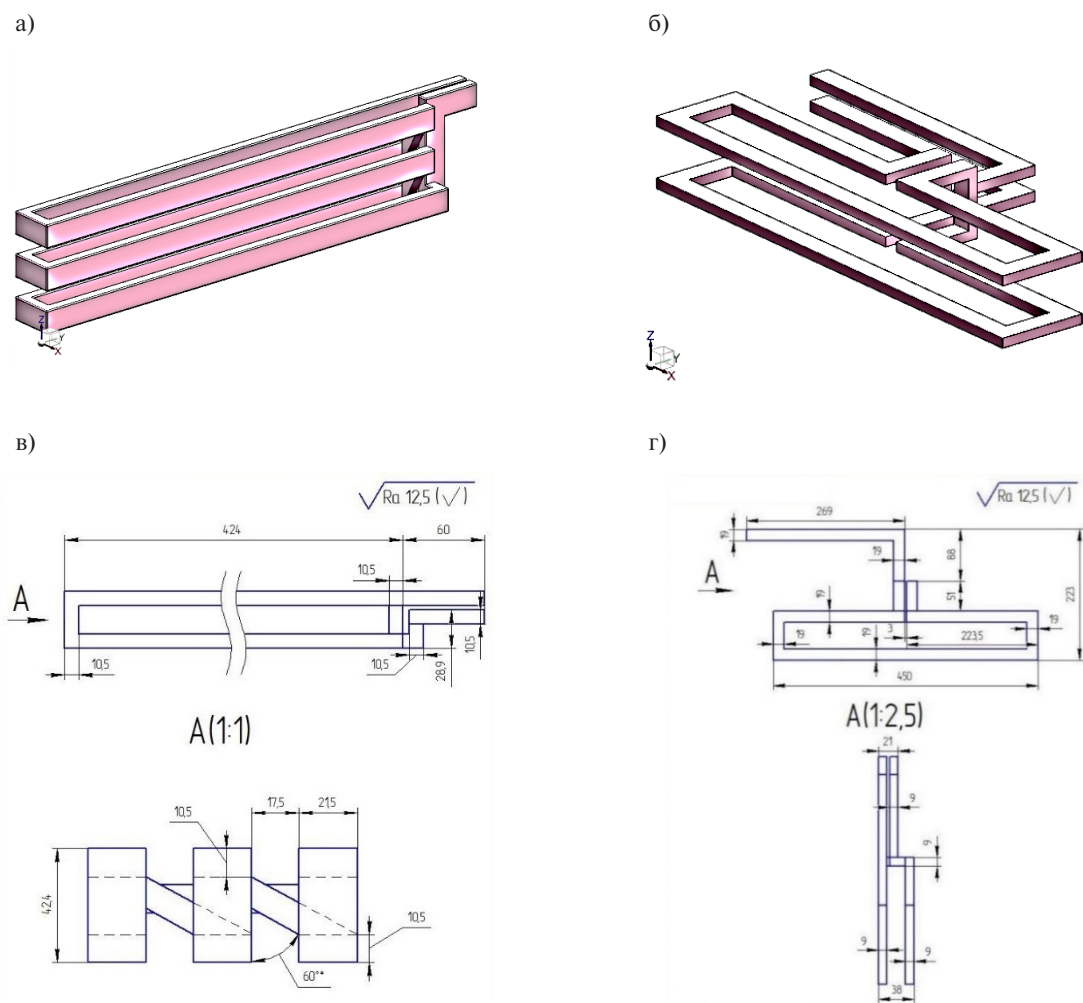


Рис. 13. Конструкции индукторов для обеспечения локального нагрева в а) продольном и б) поперечном магнитном поле

Fig. 13. Designs of inductors to provide local heating in a) longitudinal and b) transverse magnetic field

Как видно из представленных в настоящей работе данных, кромки диска, за счет тепловых потерь через излучение, обладают более низкой температурой относительно требуемого уровня, а максимум температуры по радиусу диска смещен в сторону центра нагреваемого образца.

Ввиду влияния рабочей частоты и конструкции индуктора на конечный температурный профиль металлического диска, автором был смоделирован его сквозной нагрев под отпуск. Это позволило обеспечить минимизацию перепада температур по сечению диска в зоне нагрева. При численном исследовании, однако, не было учтено наличие закаленного слоя.

Наблюдается высокая идентичность результатов расчетов и экспериментальных данных при нагреве в продольном и поперечном магнитном поле. На основе анализа основных концепций нагрева установлено, что нагрев в поперечном магнитном поле является более эффективным, однако нагрев в продольном магнитном поле обладает также высокой эффективностью при нагреве изделий с простым профилем.

### Заключение

1) Освещены научно-технические решения, сопряженных со спецификой термообработки дисков, определены критерии оценки технологической эффективности, выполнена оценка влияния краевых эффектов и вращения диска в процессе нагрева на эффективность нагрева.

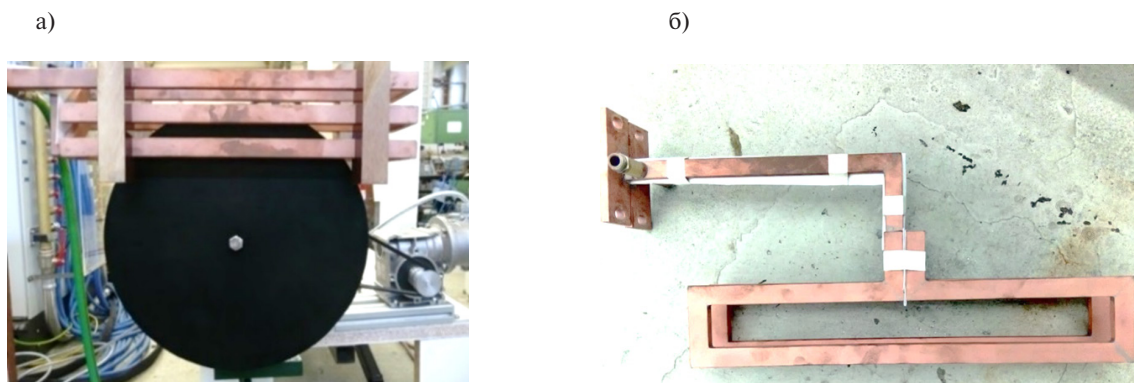


Рис. 14. Лабораторный стенд индукционной системы нагрева в продольном (а) и конструкция индукционного нагревателя в поперечном (б) магнитных полях

Fig.14. Laboratory stand of the induction heating system in the longitudinal (a) and the design of the induction heater in the transverse (b) magnetic fields

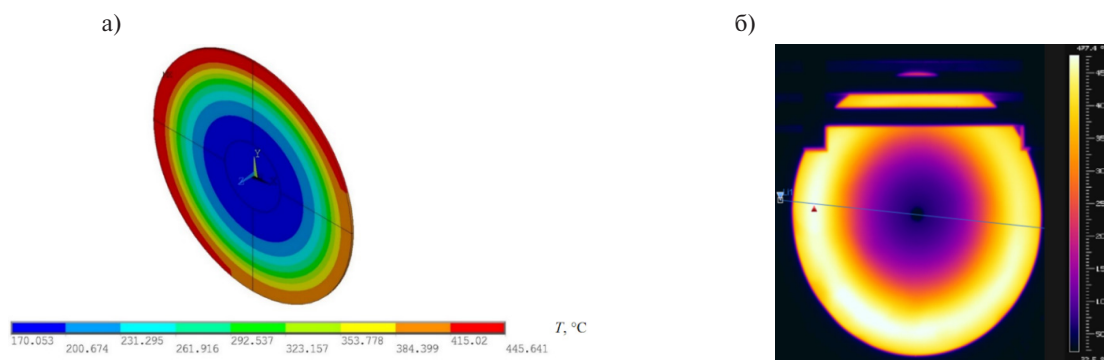


Рис. 15. Сравнение результатов моделирования (а) с экспериментальными данными (б); получены для температурного распределения по поверхности заготовки при нагреве диска вращением в высокочастотном продольном магнитном поле; б – прямая, проходящая от края диска к его центру указывает направление, вдоль которого произведен замер температуры; красный треугольник указывает максимальную температуру на поверхности диска.

Fig.15. Comparison of simulation results (a) with experimental data (b); obtained for temperature distribution over workpiece surface with disk heated by rotation in high-frequency longitudinal magnetic field; b is the straight line passing through the center of the disk indicating the direction along which the temperature was measured; the dark triangle indicates the maximum temperature on the surface of the disk

2) На основе компьютерных исследований выполнена оценка эффективности нагрева различных концепций индукционного нагрева, исследовано влияние конструкций нагревателей на распределение электромагнитных и тепловых полей в диске. Разработанные расчетные методики и численные модели способствовали минимизации затрат на проведении экспериментальной части работ при изготовлении индукторов под каждый тип-размер дисков и демпферных пружин и выполнению термообработки с высокой эффективностью.

3) Спроектированы и изготовлены конструкции индукционных нагревателей дисков.

4) Результаты, полученные методом численного моделирования на базе разработанных программ, полностью согласуются с физическими закономерностями исследуемых процессов, протекающих при индукционном нагреве диска. Полученные данные свидетельствуют о высокой сходимости результатов.

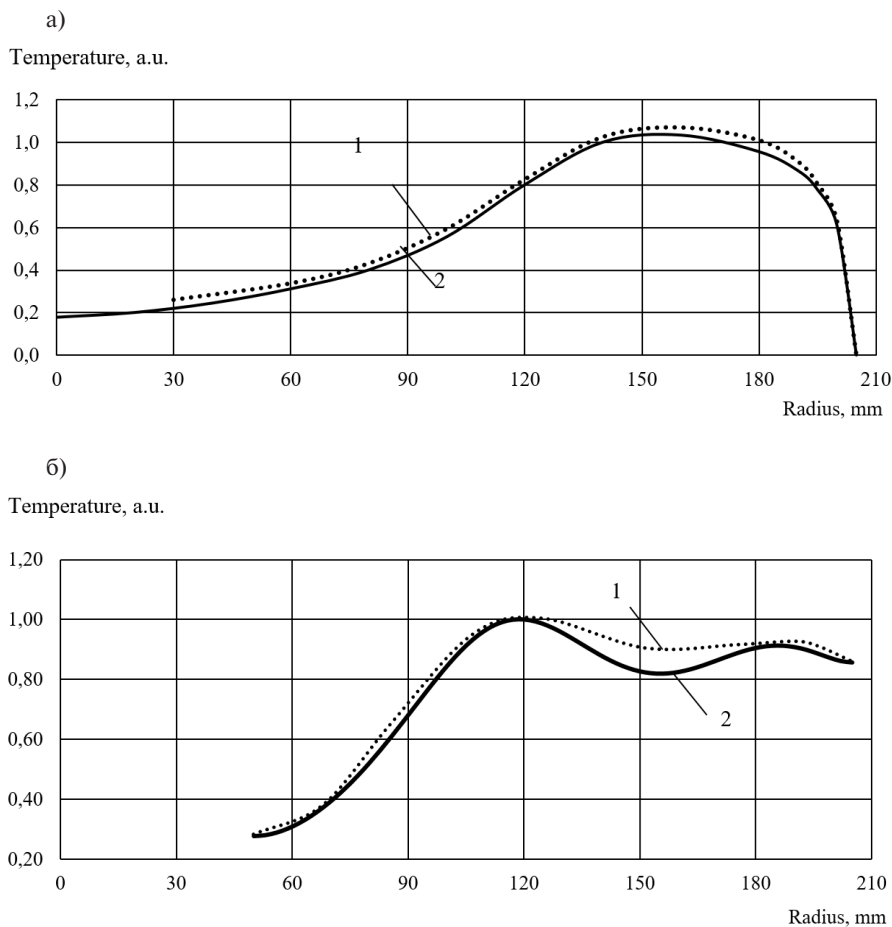


Рис. 16. Температурные профили на поверхности заготовки вдоль радиуса при нагреве диска в продольном (а) и поперечном (б) магнитных полях: 1 – результаты моделирования, 2 – экспериментальные данные

Fig. 16. Temperature profiles on workpiece surface along the radius with disk heated in the longitudinal (a) and transverse (b) magnetic fields: 1 corresponds to simulation results, 2 to experimental data

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- [1] Шепеляковский К.З. Упрочнение деталей машин поверхностной закалкой при индукционном нагреве. – М.: Машиностроение, 1972. – 287 с.
- [2] Численное моделирование устройств индукционного нагрева / В.Б. Демидович, Ф.В. Чмиленко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. С. 157.
- [3] Исследования и применение бесконтактной системы измерений температур вращающихся дисков турбин при индукционном нагреве / А.Б. Кувалдин, А.Р. Лепешкин, С.А. Лепешкин // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2015. Т. 1. С. 277–281.
- [4] Метод нагрева и закалки зубчатых колес при вращении в магнитном поле / Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. В сборнике: ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ – XXI ВЕК материалы XII межд. Науч.-практ. интернет-конф. 2016. С. 147–151.
- [5] Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Моделирование режимов индукционного нагрева дисков турбин ГДТ с использованием специальных индукторов // В сборнике: Электротехника. Электротехнология. Энергетика сборник научных трудов VII межд. науч. конф. мол. ученых. Организаторы: НГТУ; Межвуз. центр сод. науч. и инновац. деят. студ. и мол. уч. Новосибирской области. 2015. С. 70–73.

[6] Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape / E. Mannanov, S. Galunin, A. Nikanorov, B. Nacke // XVIII International UIE – Congress “Elec-trotechnologies for Material Processing”, Hannover (Germany), June 6-9, 2017. Pp. 491–496.

[7] **Mannanov E.R., Galunin S.A., Nikanorov A.N., Nacke B., Kozulina T.P.** Development of induction systems for heating of disks, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

[8] **Mannanov E.R., Galunin S.A.** The heating of a diaphragm spring using induction technique: parametric modeling, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

[9] Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating disks with complex profile / E. Mannanov, S. Galunin, M. Yermekova, A. Nikanorov, B. Nacke // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EConRusNW), 2019 IEEE NW Russia. – 2019. – Pp. 606–608. DOI: 10.1109/EConRus.2019.8656912

[10] **Mannanov E., Galunin S.** Numerical simulation of the induction heating process of a disk profile // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012065 November 2019. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012065

[11] **Mannanov E., Galunin S., Shatunov A.** Numerical modeling of induction heating systems with load of azimuthal periodicity // EECE-2019 E3S Web of Conferences 140, 10009 (2019) Pp. 1–6. DOI.org/10.1051/e3sconf/201914010009

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**МАННАНОВ Эмиль Рамилевич** – инженер-конструктор 1 категории, АО «Силовые машины», без степени.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

**ГАЛУНИН Сергей Александрович** – заведующий кафедрой электротехнологической и преобразовательной техники, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» имени В.И. Ульянова (Ленина), канд. техн. наук.

E-mail: galunin@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8382-3111>

## REFERENCES

[1] **K.Z. Shepelyakovskiy**, Uprochneniye detaley mashin poverkhnostnoy zakalkoy pri induktsionnom nagreve. – M.: Mashinostroyeniye, 1972. – 287 s.

[2] Chislennoye modelirovaniye ustroystv induktsionnogo nagreva / V.B. Demidovich, F.V. Chmilenko. – SPb.: Izd-vo SPbGETU «LETI», 2010. S. 157.

[3] Issledovaniya i primeneniye beskontaktnoy sistemy izmereniy temperatur vrashchayushchikhsya diskov turbin pri induktsionnom nagreve / A.B. Kuvaldin, A.R. Lepeshkin, S.A. Lepeshkin // Avtomatizatsiya v elektroenergetike i elektrotekhnike. 2015. T. 1. S. 277–281.

[4] Metod nagreva i zakalki zubchatykh koles pri vrashchenii v magnitnom pole / Kuvaldin A.B., Lepeshkin A.R., Lepeshkin S.A. V sbornike: ENERGO- I RESURSOSBEREZHENIE – XXI VEK materialy XII mezhd. Nauch.-prakt. internet-konf. 2016. S. 147–151.

[5] **A.B. Kuvaldin, A.R. Lepeshkin, S.A. Lepeshkin**, Modelirovaniye rezhimov induktsionnogo nagreva diskov turbin GDT s ispolzovaniyem spetsialnykh induktorov // V sbornike: Elektrotekhnika. Elektrotekhnologiya.

Energetika sbornik nauchnykh trudov VII mezhd. nauch. konf. mol. uchenykh. Organizatory: NGTU; Mezhevuz. tsentr sod. nauch. i innovats. deyat. stud. i mol. uch. Novosibirskoy oblasti. 2015. S. 70–73.

[6] Simulation algorithm for induction heating of rotated workpieces with complex shape / E. Mannanov, S. Galunin, A. Nikanorov, B. Nacke // XVIII International UIE – Congress “Electrotechnologies for Material Processing”, Hannover (Germany), June 6-9, 2017. Pp. 491–496.

[7] **E.R. Mannanov, S.A. Galunin, A.N. Nikanorov, B. Nacke, T.P. Kozulina**, Development of induction systems for heating of disks, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (2) (2019) 23–31. DOI: 10.18721/JPM.12202

[8] **E.R. Mannanov, S.A. Galunin**, The heating of a diaphragm spring using induction technique: parametric modeling, St. Petersburg Polytechnical State University Journal. Physics and Mathematics. 12 (4) (2019) 61–68. DOI: 10.18721/JPM.12406

[9] Numerical simulation, investigation and development of induction systems for heating disks with complex profile / E. Mannanov, S. Galunin, M. Yermekova, A. Nikanorov, B. Nacke // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRusNW), 2019 IEEE NW Russia. – 2019. – Pp. 606–608. DOI: 10.1109/EIConRus.2019.8656912

[10] **E. Mannanov, S. Galunin**, Numerical simulation of the induction heating process of a disk profile // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 643 (2019) 012065 November 2019. Pp. 1–7. DOI: 10.1088/1757-899X/643/1/012065

[11] **E. Mannanov, S. Galunin, A. Shatunov**, Numerical modeling of induction heating systems with load of azimuthal periodicity // EECE-2019 E3S Web of Conferences 140, 10009 (2019). Pp. 1–6. DOI.org/10.1051/e3sconf/201914010009

## THE AUTHORS

**MANNANOV Emil R.** – JSC “Power machines”.

E-mail: emil-mannanov@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9988-793X>

**GALUNIN Sergei A.** – St. Petersburg Electrotechnical University “LETI”.

E-mail: galunin@mail.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8382-3111>

Статья поступила в редакцию 20.09.2021; одобрена после рецензирования 06.10.2021; принята к публикации 06.10.2021.

The article was submitted 20.09.2021; approved after reviewing 06.10.2021; accepted for publication 06.10.2021.