

УДК 621.365.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ ТУРБИН В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ, СОЗДАННОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИНДУКТОРОВ И СИЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

© 2020 г. А. Р. Лепешкин<sup>1, \*</sup>, О. И. Ильинская<sup>1</sup>, А. Б. Кувалдин<sup>2</sup>, С. А. Лепешкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «МАИ «НИУ», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», Москва, Россия

\*e-mail: [lepeshkin.ar@gmail.com](mailto:lepeshkin.ar@gmail.com)

Поступила в редакцию 30.12.2019 г.

После доработки 13.01.2020 г.

Принята к публикации 14.01.2020 г.

Рассматриваются особенности моделирования эксплуатационного теплового состояния вращающихся дисков турбин с использованием индукционного нагрева. Предложены новые методы нагрева вращающихся дисков с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов. Разработаны математические модели для расчета энергетических характеристик системы индукционного нагрева и моделирования режимов нагрева дисков переменной и постоянной толщины. Разработаны новые конструкции специальных индукторов для нагрева вращающихся деталей. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований теплового состояния вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном специальными индукторами, и модельного диска, вращающегося в магнитном поле, созданном сильными постоянными магнитами, на разгонных стендах. Разработанные методы можно использовать для нагрева вращающихся дисков, изделий и заготовок в машиностроении и энергетике.

*Ключевые слова:* нагрев, вращающийся диск, индукторы, постоянные магниты, тепловое состояние, частота вращения

DOI: 10.31857/S0002331020010070

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Диски и лопатки компрессоров и турбин газотурбинных установок (ГТУ), и авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) являются наиболее ответственными деталями и подвергаются воздействию значительных механических и тепловых нагрузок в условиях эксплуатации [1]. В каждом эксплуатационном цикле работы при запуске ГТД одновременно увеличивается частота вращения дисков и возрастает их температура, при выходе на заданный режим они достигают максимальных значений, затем, на других режимах, — несколько уменьшаются, а при выключении ГТД — одновременно уменьшаются частота вращения дисков и их температура при охлаждении. Тепловые процессы характеризуются тепловыми потоками в зоне лопаток, которые являются основными параметрами газового потока: температура газа и коэффициенты теплоотдачи от газа к поверхности лопаток. Температуры в ободной части дисков на рабочих режимах достигают 550–750°C, в лопатках — 800–1100°C. Средние скорости нагрева дисков турбин авиадвигателей в условиях эксплуатации составляют 0.5–1 К/с, а на отдельных участках нагрева в начале полетного цикла максимальные скорости нагрева

дисков достигают 2–5 К/с. Поэтому моделирование тепловых процессов нагрева и термонапряженного состояния вращающихся дисков и лопаток и других деталей имеет важное значение в связи с учетом режимов работы деталей ГТД на нестационарных режимах [1–3].

На разгонных и специализированных стендах с использованием индукционного нагрева проводятся изотермические и термоциклические испытания дисков и лопаток турбин ГТУ и ГТД с воспроизведением эксплуатационных тепловых процессов и механических нагрузок по разработанным методикам. На данных стендах реализованы мероприятия по энергосбережению при испытаниях деталей турбин [1].

Применяются различные методы нагрева: индукционный, аэродинамический, газодинамический, радиационный для реализации тепловых процессов в телах вращения для проведения разгонных и термоциклических испытаний дисков и деталей авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и турбин энергетических установок на разгонных специализированных стендах [1–5] и специальные виды нагрева в технологических процессах [6]. Индукционный нагрев позволяет обеспечить высокие скорости нагрева и получить заданное неравномерное распределение температур по радиусу диска, соответствующего эксплуатационным условиям при испытаниях на разгонных стендах [1–5]. Натурные эксперименты и разгонные испытания с индукционным нагревом вращающихся дисков на установках и стендах связаны с существенными материальными затратами.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ, СОЗДАННОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПЕЦИАЛЬНЫХ ИНДУКТОРОВ

Обычная система индукционного нагрева состоит из нескольких плоских кольцевых индукторов (рис. 1), расположенных на разных радиусах диска, имеет следующие недостатки. Указанная система нагрева требует использования нескольких источников питания и соответственно повышенного электропотребления. Ее недостатком является также и невозможность получения дополнительной тепловой энергии за счет вращения, т.к. индукторы осесимметричны. Кроме того, индукторы расположены дискретно по поверхности диска, и поэтому появляются местные отклонения (градиенты) температур  $\pm 30\text{--}40^\circ\text{C}$  в радиальном направлении (рис. 2).

В связи с этим необходимо разработать новые конфигурации плоских индукторов или использовать сильные постоянные магниты, которые позволят повысить точность воспроизведения температурного поля в дисках турбин ГТУ и ГТД.

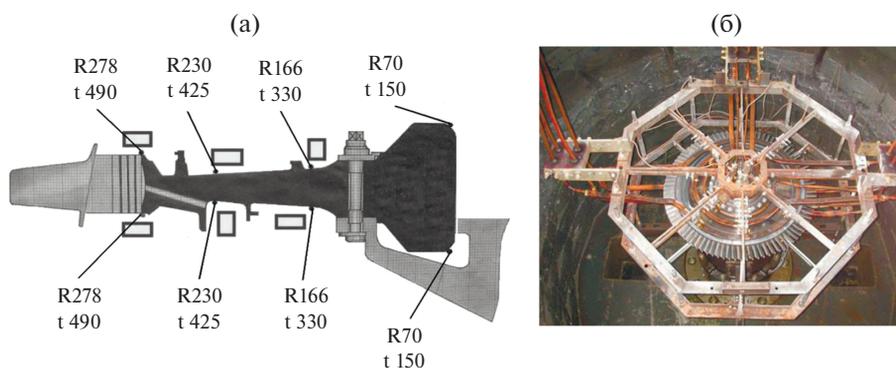


Рис. 1. Индукторы (а), дискретно расположенные вблизи поверхности диска турбины на разгонном стенде (б).

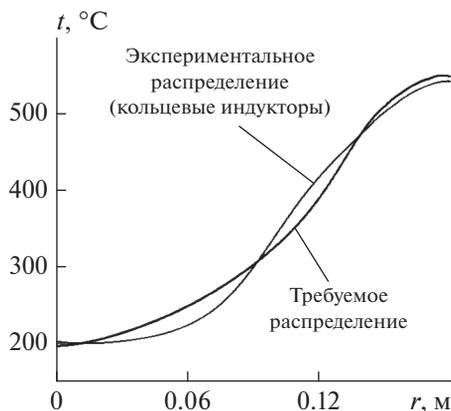


Рис. 2. Распределения температур диска турбины.

Разработка систем и методов нагрева вращающихся дисков с обеспечением заданного температурного поля дисков является актуальной проблемой. Для решения указанной проблемы необходимо решить задачи моделирования режимов нагрева вращающихся дисков. Выбор частоты системы энергопитания и индукторов переменной конфигурации является необходимым для обеспечения заданного температурного поля диска. В работе [1] представлены результаты исследований влияния частоты тока на термонапряженное состояние дисков. При термоциклических испытаниях максимальная частота вращения дисков составляет 5000–80000 об/мин. Нагрев выполняется с заданными тепловыми потоками.

Разработка и применение специальных двухчастотных систем нагрева и плоских индукторов позволяет устранить локальные градиенты температур, которые относятся к системам нагрева с дискретно расположенными индукторами и обеспечивают распределение тепловых потоков и повышение точности воспроизведения заданного распределения температуры диск.

В разработанных математических моделях в программном комплексе ANSYS для расчета энергетических характеристик системы индукционного нагрева и моделирования режимов нагрева дисков переменной толщины учитывается физический эффект дополнительного нагрева с учетом вращения.

Исследования влияния частоты вращения на выделение мощности внутренних источников тепла в диске за счет двух составляющих ЭДС проведены с использованием индукторов разной формы. Первая составляющая возникает в диске на средней частоте тока в переменном электромагнитном поле. Вторая составляющая ЭДС наводится в диске за счет вращения в переменном электромагнитном поле, создаваемом индуктором, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. В результате чего дополнительно возникают индуцированные токи. В результате мощность дополнительных внутренних источников тепла увеличивается при повышении частоты вращения и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска.

Таким образом, удельная мощность  $P$  индукционного нагрева определяется по формуле

$$P = P_1 + P_2, \quad (1)$$

где  $P_1$  — мощность, выделяемая в диске, за счет частоты тока электромагнитного поля,  $P_2$  — мощность, выделяемая в диске, за счет пульсаций магнитного поля вызываемое вращением в переменном электромагнитном поле.

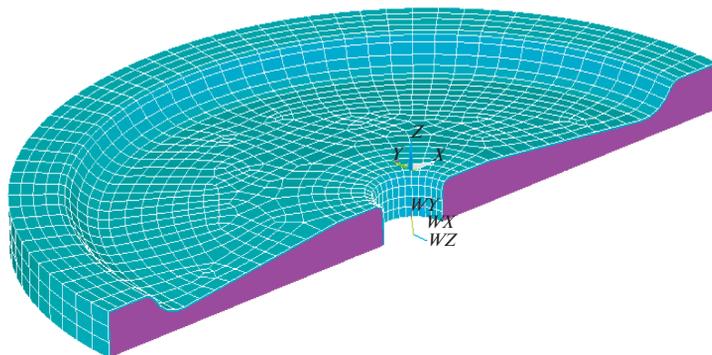


Рис. 3. Геометрическая модель и конечно-элементная сетка диска переменной толщины.

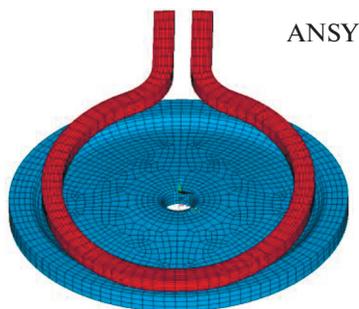


Рис. 4. Конечно-элементная сетка системы “индуктор-диск”.

Исследования влияния частоты вращения на выделение энергии внутренних источников в диске благодаря двум компонентам электродвижущей силы проведены с использованием индукторов разной формы.

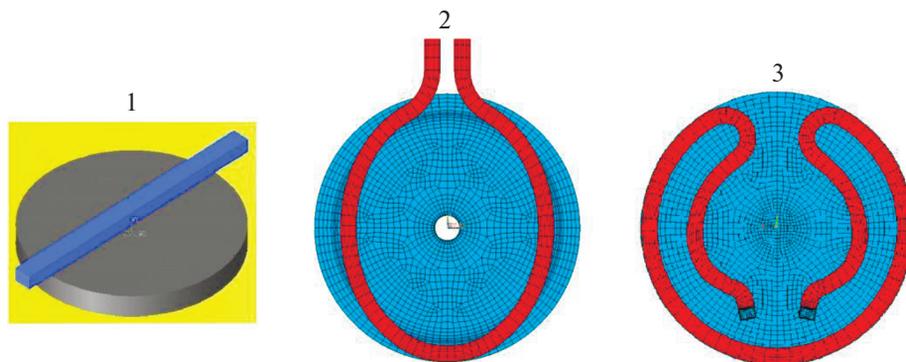
В соответствии с данной методологией разработаны трехмерные конечно-элементные модели системы индукционного нагрева, состоящие из кольцевых и петлевых и других индукторов для нагрева диска турбины ГТД переменной толщины в программном комплексе ANSYS.

Неравномерная сетка конечных элементов диска переменной толщины для повышения точности расчета была использована. На рисунке 3 показана геометрическая модель.

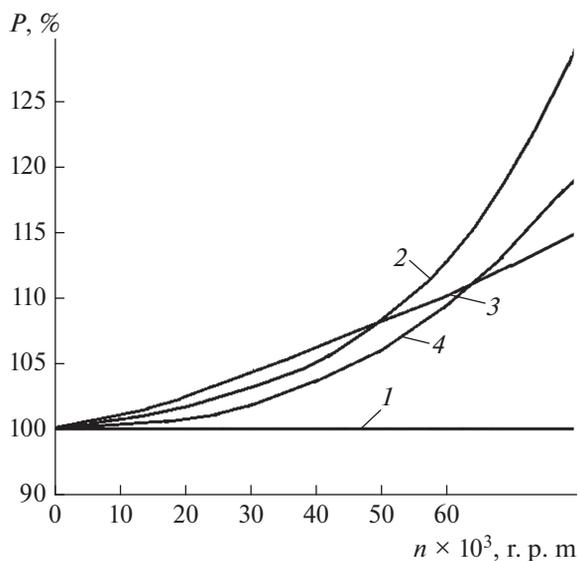
Построенная конечно-элементная сетка системы “индуктор-диск” содержит около 170 000 элементов на рис. 4. Трехмерный элемент SOLID117 используется для электромагнитного расчета гармонической задачи в программном комплексе ANSYS.

При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения магнитного потока в диске, и наведенная ЭДС увеличиваются. В результате мощность внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность индукционного нагрева вращающегося диска. Расчетные исследования мощности, выделяющейся в диске, с учетом вращения диска с использованием стержневого, эллиптического и петлевого индукторов проведены (рис. 5).

На рисунке 6 показаны результаты расчетов выделенной мощности в диске при индукционном нагреве с учетом вращения диска: 1 – петлевой индуктор, 2 – стержневой индуктор. Параметры режима: ток – 500 А и частота – 2400 Гц, зазор – 10 мм.



**Рис. 5.** Индукторы для нагрева диска: 1 – стержневой индуктор, 2 – эллипсный индуктор, 3 – петлевой индуктор.



**Рис. 6.** Зависимость выделенной мощности во вращающемся диске: 1 – без вращения; с использованием – стержневого индуктора (2), эллипсного индуктора (3), петлевого индуктора (4).

Из анализа (рис. 6) полученной зависимости мощности (выделенной во вращающемся диске) следует, что влияние наведенных токов из-за вращения диска, то есть увеличения мощности внутренних источников тепла становится существенным при частотах вращения выше 10000 оборотов в минуту. Это является дополнительным фактором энергосбережения при проведении термоциклических испытаний дисков с использованием индукционного нагрева.

Разработанные модели в программном комплексе ANSYS использованы в исследованиях по влиянию различной формы индукторов на распределения температур во вращающихся дисках ГТД. В указанном расчете важен наибольший охват индуктором поверхности диска. При вращении наиболее эффективный нагрев достигается в тех

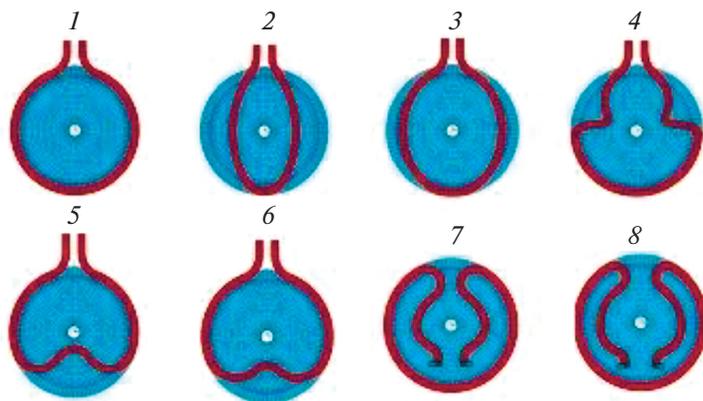


Рис. 7. Индукторы различной конфигурации.

кольцевых зонах диска, которые более длительное время находятся под участками индуктора. Следовательно, каждый такой участок индуктора характеризуется отношением его ширины к соответствующей кольцевой зоне нагрева.

Различные индукторы (рис. 7), спроектированные с использованием компьютерного моделирования, и двухчастотная система энергопитания этих индукторов от одного тиристорного преобразователя частоты (ТПЧ), расположенных на обеих сторонах диска переменной толщины, были использованы.

Указанные факторы учитывались в расчетных исследованиях по влиянию различной формы индукторов на распределения температур во вращающемся диске переменной толщины при питании индукторов (рис. 7) одинаковым током 500 А. Результаты расчетного моделирования представлены на рис. 8.

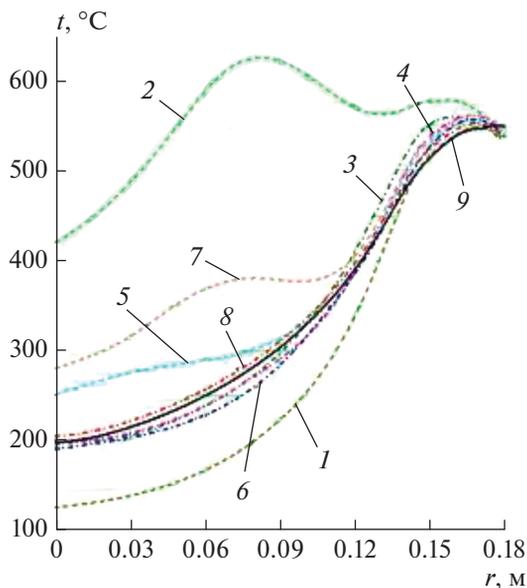
На рисунке 8 показаны распределения температур с использованием индукторов различной конфигурации (рис. 7): 1 – кольцевой индуктор, 2 – эллипсный узкий индуктор, 3 – эллипсный большой индуктор, 4 – полукольцевой индуктор 1, 5 – полупетлевой индуктор, 6 – полупетлевой узкий индуктор 2, 7 – петлевой индуктор, 8 – петлевой узкий индуктор, 9 – требуемое распределение температуры.

Проведем анализ распределений температур с использованием различных индукторов на рис. 7. Индукторы 2, 5 и 7 создают распределения температур также существенно отличающиеся от заданного. Таким образом узкий эллипсный индуктор 2 целесообразно использовать для равномерного нагрева дисков.

Распределения температур 8, 4, 3 и 6 наиболее близки к заданному распределению 9 температуры диска и индукторы, соответствующие этим распределениям, можно использовать при моделировании тепловых режимов дисков. Среди индукторов 8, 4, 3 и 6 петлевой индуктор 8 обеспечивает более высокую скорость нагрева средней и центральной (ступичной) частей и это важно при термоциклических испытаниях. При этом распределение его температуры почти совпало с заданным – 9.

Отклонения распределения 8 от заданного распределения температуры 9 по радиусу диска не превышает  $10^{\circ}\text{C}$ . Кроме того, индуктор 8 имеет самую высокую эффективность среди тех индукторов, у которых распределения совпадают с требуемым распределением температуры 9. На основании проведенных расчетов выбрана оптимальная конструкция индуктора – петлевой индуктор 8. Индуктор обеспечивает наилучшее приближение расчетного распределения температуры диска ГТД к заданному распределению 9 (рис. 8).

Для проведения теоретических исследований теплофизических процессов и режимов индукционного нагрева диска турбины разработаны две независимые электро-



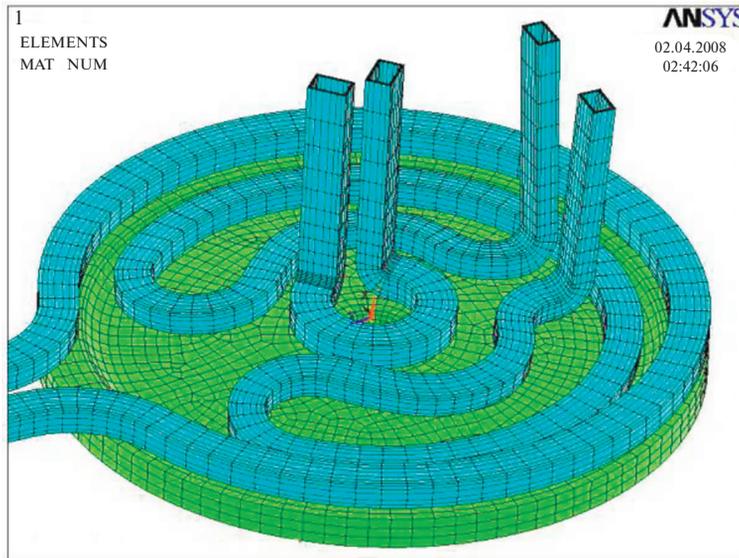
**Рис. 8.** Распределения температур в диске в зависимости от формы индуктора (рис. 7) с учетом вращения.

магнитная и тепловая конечно-элементные модели системы индукционного нагрева в программном комплексе ANSYS с учетом граничных условий: коэффициентов теплоотдачи, температуры воздуха и распределения внутренних источников тепла по глубине детали. Алгоритм решения связанной трехмерной задачи осуществляется с помощью ANSYS Multifield Solver. Для моделирования температурного поля диска использовался элемент SOLID90. Конечно-элементная сетка математической модели системы петлевых и кольцевых индукторов для нагрева диска турбины переменной толщины с двух сторон представлена на рис. 9.

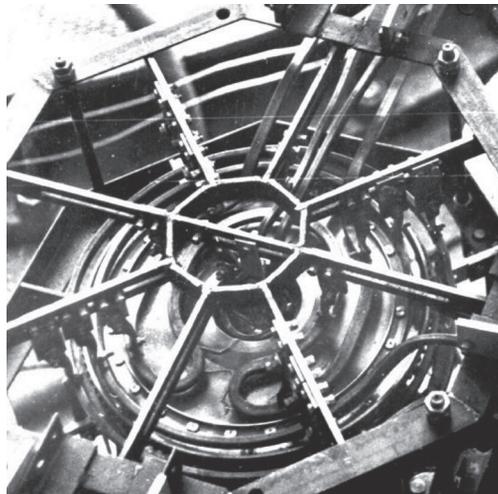
Внешний кольцевой индуктор необходим для повышения скорости нагрева ободной части диска при ускоренных термоциклических испытаниях и внутренний кольцевой индуктор иногда требуется для подогрева отверстия диска. Сформированная конечно-элементная сетка диска состоит из 15000 элементов. Сетки индукторов в среднем состоят из 25000–30000 элементов. В целом система нагрева диска с индукторами и областью воздуха состоит из 80000–120000 элементов.

В целом использование петлевых индукторов (рис. 7, рис. 9 и рис. 10), разработанных с использованием компьютерного моделирования, и двухчастотной системы электропитания от тиристорного преобразователя частоты позволяет повысить эффективность температурных режимов при термоциклических испытаниях вращающихся дисков на разгонном стенде и повысить точность моделирования экспериментальных распределений температур в дисках в 2–3 раза (с точностью  $\pm 10\text{--}15^\circ\text{C}$ ) и уменьшить количество индукторов и источников питания в 1.5–2.0 раза.

Нагрев диска был обеспечен системой индукционного нагрева с тремя ТПЧ, работающими на 2400–10000 Гц. Анализ скоростного нагрева также показал, что с увеличением скорости нагрева в 5 раз (с 2 К/с до 10 к/с) производительность индукционного нагрева увеличивается в 2 раза, а стоимость электроэнергии при термоциклических испытаниях уменьшается в 3 раза.



**Рис. 9.** Конечно-элементная сетка модели системы индукторов для нагрева диска турбины переменной толщины.



**Рис. 10.** Петлевые индукторы для нагрева диска.

### 3. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ДИСКА В МАГНИТНОМ ПОЛЕ, СОЗДАННОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛЬНЫХ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

В настоящее время актуальна разработка и применение энергосберегающих методов нагрева. К одному из таких новых методов нагрева относится нагрев деталей с использованием сильных постоянных магнитов с улучшенными характеристиками.

При вращении детали в поле магнита в ней наводится ЭДС, и, таким образом, выделяется тепловая энергия (мощность внутренних источников тепла при определенных условиях в зависимости от формы магнита). Однако, ранее нагрев вращающихся дисков с помощью постоянных магнитов, в том числе, и на разгонных стендах не рассматривался и не оценивался. Также не исследованы вопросы комбинированного нагрева вращающихся дисков с применением постоянных магнитов.

Разработка методики нагрева – получения тепловой энергии в дисках за счет вращения (выделения мощности внутренних источников тепла) в магнитном поле, созданном постоянными магнитами, является актуальной задачей. При термоциклических испытаниях максимальная частота вращения дисков может составлять 8000–50000 об/мин.

Технология изготовления современных постоянных магнитов совершенствуется и достигла определенного прогресса, и в настоящее время для нагрева вращающихся малоразмерных дисков можно применить постоянные магниты из редкоземельных сплавов – неодим–железо–бор и самарий–кобальтовых сплавов, производство которых началось сравнительно недавно. Они намного сильнее обычных ферритовых магнитов и магнитов из других магнитных материалов. Это позволило использовать их в промышленности, в частности, они нашли широкое применение в электродвигателях и генераторах для получения электрической или механической энергии.

Исследования теплового состояния дисков, вращающихся в постоянном магнитном поле на начальном этапе целесообразно проводить с использованием магнитов из самарий–кобальтовых сплавов, т.к. они имеют не только значительную магнитную индукцию до 1 Тл, но и работают при повышенных температурах до 250–330°C. Однако, следует учитывать, что они обладают хрупкостью.

ЭДС наводится при вращении диска в магнитном поле, создаваемом постоянным магнитом, в соответствии с законом электромагнитной индукции Фарадея. В результате чего возникают индуцированные токи. На небольшой частоте вращения указанная ЭДС мала. При увеличении частоты вращения увеличивается скорость изменения (пульсации) магнитного потока в диске и наведенная ЭДС становится значимой в диапазоне больших частот вращения. В результате мощность внутренних источников тепла увеличивается и повышается интенсивность нагрева вращающегося диска.

В данной работе впервые рассмотрен новый метод нагрева дисков, вращающихся в постоянном магнитном поле, с учетом выделения мощности внутренних источников тепла на различных частотах вращения [5].

Исследование теплового состояния модельного диска (из нержавеющей стали), вращающегося в поле постоянных магнитов, проводилось на разгонном стенде. Диск был препарирован термопарами на трех радиусах. Диск и узел крепления с магнитами, установленные в вакуумной разгонной камере, показаны на рис. 11.

Между диском и магнитами установлен зазор 5 мм. Измерения температур диска осуществлялись через ртутный токосъемник с помощью компьютерной системы. На рисунке 12 представлены распределения температур диска на разных частотах вращения диска на разных радиусах в зависимости от частоты вращения в процессе эксперимента. Наблюдалась максимальная температура на радиусе 100 мм, который был близко расположен к средней линии установленных магнитов.

В данных экспериментах тепловое состояние (рис. 12) модельного диска исследовалось на частотах вращения до 8000 об/мин.

На этой частоте вращения максимальная температура составила 350°C (рис. 12). Из анализа экстраполированной зависимости 2 (рис. 12) более радиуса 100 мм следует, что на внешнем радиусе диска температура может составлять 500°C. На более высоких частотах вращения следует ожидать нагрев дисков до более высокой температуры.

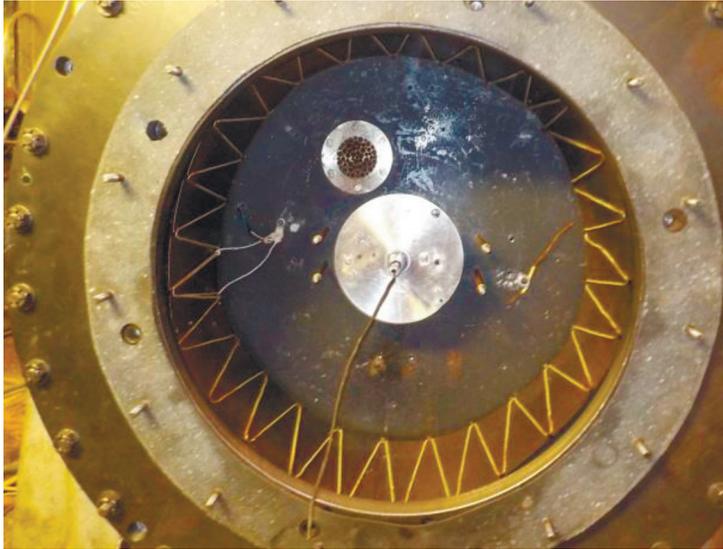


Рис. 11. Модельный диск, установленный в вакуумной камере разгонного стенда.

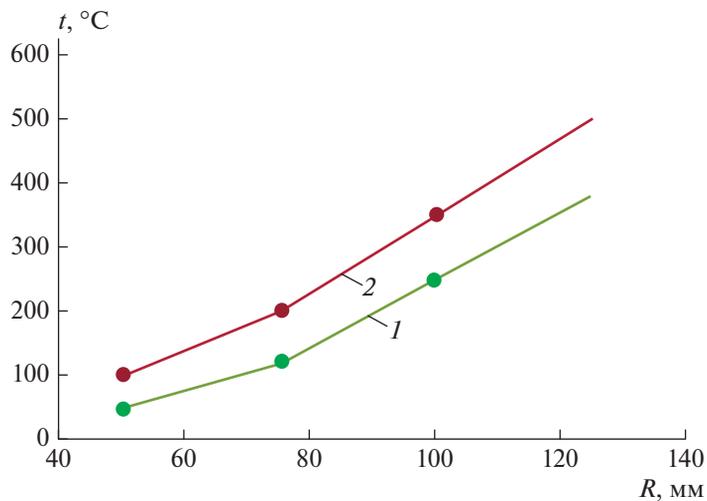


Рис. 12. Распределения температур диска на разных частотах вращения: 1 – 5000 об/мин, 2 – 8000 об/мин.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложены новые методы нагрева вращающихся дисков с использованием специальных индукторов и сильных постоянных магнитов. Разработаны математические модели для расчета энергетических характеристик системы индукционного нагрева и моделирования режимов нагрева дисков переменной и постоянной толщины. Разработаны новые конструкции специальных индукторов для нагрева вращающихся деталей. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований теплового

состояния вращающихся дисков турбин в электромагнитном поле, созданном специальными индукторами, и модельного диска, вращающегося в магнитном поле, созданном сильными постоянными магнитами, на разгонных стендах. Разработанные методы можно использовать для нагрева вращающихся дисков, изделий и заготовок в машиностроении и энергетике.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. Монография. М.: Инфра-М. серия: Научная мысль. – 2019. – 282 с.
2. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростной индукционный нагрев. Электротехническая энциклопедия: в 4 т. / Под ред. Дьякова А.Ф. (гл. ред.). Т. 3. – М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 175.
3. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Метод испытаний дисков турбомашин и бандажей роторов турбогенераторов с использованием индукционного нагрева // *Электричество*. 2009. № 7. С. 33–38.
4. Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А., Ильинская О.И. Технология моделирования теплового состояния дисков ГТД при стендовых испытаниях // *Научные труды. Вестник МАТИ*. 2014. № 24 (96). С. 59–65.
5. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. Способ получения энергии и устройство для его реализации. Пат. 2416869 Российская Федерация, МПК H02N 11/00.; Заявитель и патентообладатель НИУ “МЭИ”. № 2010117026/07; заявл. 30.04.2010; опубл. 20.04.2011, бюл. № 11.
6. Денисов Л.В., Бойцов А.Г., Силуянова М.В. Обеспечение эксплуатационных свойств деталей и узлов газотурбинного двигателя локальным поверхностным легированием // *Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение*. 2018. Т. 17. № 2. С. 58–66.

### Investigation the Heating of Rotating Turbin Disks in the Electromagnetic Field Created Using Special Inductors and Strong Permanent Magnets

A. R. Lepeshkin<sup>a,\*</sup>, O. I. Ilyinskaya<sup>a</sup>, A. B. Kuvaldin<sup>b</sup>, and S. A. Lepeshkin<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Moscow Aviation Institute “NRU”, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*National Research University “MPEI”, Moscow, Russia*

\**e-mail: lepeshkin.ar@gmail.com*

The features of modeling the operational thermal state of the rotating turbine disks using induction heating are considered. New methods for heating rotary disks using special inductors and strong permanent magnets are proposed. Mathematical models have been developed for calculating the energy characteristics of the induction heating system and modeling the heating modes of disks of variable and constant thickness. New designs of special inductors for heating rotating parts have been developed. The results of computational and experimental studies of the thermal state of rotating turbine disks in an electromagnetic field created by special inductors and a model disk rotating in a magnetic field created by strong permanent magnets on accelerating stands are presented. The developed methods can be used to heat rotating disks, products and blanks in mechanical engineering and energy.

*Keywords:* heating, rotating disk, inductors, permanent magnets, thermal state, rotation frequency