

УДК 621.365.5

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРЕВА ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ПОЛЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

© 2021 г. А. Р. Лепешкин<sup>1,2,\*</sup>, А. Б. Кувалдин<sup>1</sup>, О. И. Ильинская<sup>2</sup>, М. А. Федин<sup>1</sup>, А. О. Кулешов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”, Москва, Россия

<sup>2</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)”, Москва, Россия

\*E-mail: lepehkin.ar@gmail.com

Поступила в редакцию 21.06.2021 г.

После доработки 05.07.2021 г.

Принята к публикации 28.07.2021 г.

Обсуждаются результаты моделирования нестационарного нагрева диска, вращающегося на ускорительном стенде в электромагнитном поле, созданном с использованием устройства с магнитами. Предложенную методику моделирования целесообразно применять для нагрева небольших дисков и деталей.

DOI: 10.31857/S0367676521110193

### ВВЕДЕНИЕ

В промышленности широко используется как индукционный нагрев, так и другие виды электронагрева для обеспечения заданных температурных режимов деталей, изделий и заготовок в различных технологических процессах. Применение индукционного нагрева для обеспечения тепловых режимов дисков турбин газотурбинных двигателей (ГТД) и установок (ГТУ) в процессе их испытаний рассмотрено в работах [1–5]. Установки индукционного нагрева отличаются высокой стоимостью и требуют дополнительного оборудования по их электроснабжению. В связи с этим, актуальна разработка новых методов нагрева, которые снижают материальные затраты и позволяют экономить электроэнергию.

В работе [6] были проведены расчетно-экспериментальные исследования неравномерного распределения температуры диска и распределения температуры, близкого к равномерному, в ободной части диска турбины с использованием индукционного нагрева, который обеспечивался устройством с использованием трехвиткового индуктора. Недостатком указанных исследований являлось использование малой скорости вращения диска, равной 18 об/мин.

Использовать постоянные магниты (ПМ) в устройствах нагрева актуально, т.к. они позволяют экономить электроэнергию. С точки зрения физики нагрева ПМ так же, как и индукторы, со-

здают вихревые токи во вращающихся деталях, поэтому устройства с ПМ можно считать разновидностью индукционного нагрева.

В работе [7] проведен эксперимент по нагреву обода диска турбины с использованием одного постоянного магнита. Однако использование одного магнита с малой индукцией 0.1 Тл привело к малому нагреву диска в эксперименте. Максимальная температура составила лишь 70°C. Следует отметить, что такой низкотемпературный нагрев диска не соответствует рабочим температурам эксплуатации двигателя.

В работе [8] проведены экспериментальные исследования нагрева вращающихся дисков в электромагнитном поле, созданном с использованием постоянных магнитов. Однако в результате проведенных экспериментов были получены стационарные распределения температур во вращающемся диске. При проведении специальных неизотермических циклических испытаний дисков и деталей ГТД и ГТУ в машиностроении необходимо задавать скорости нагрева и временные параметры испытательных термо-циклов в различных программах исследований [1]. Свойства постоянных магнитов Nd–Fe–В рассмотрены в [9].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью данной работы являлась разработка методики моделирования и исследование нестациона-

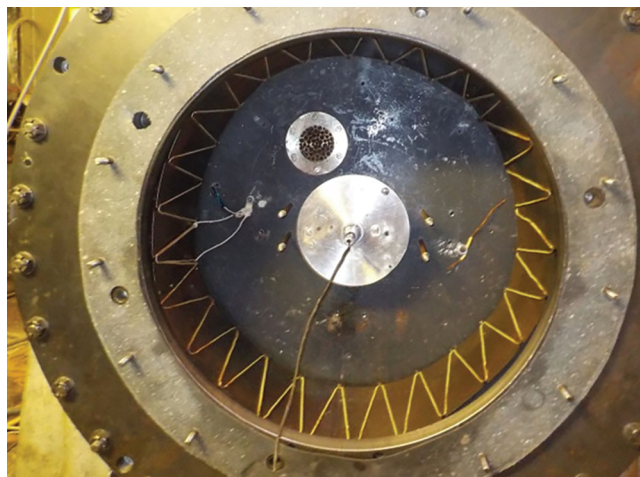


Рис. 1. Диск в вакуумной установке стенда.

нарного нагрева диска, вращающегося в электромагнитном поле, при разных скоростях вращения на ускорительном стенде, с помощью устройства, в котором используются постоянные магниты.

В указанной цели новизна работы состоит в моделировании и исследовании нестационарного нагрева диска, исследовании влияния зазора между поверхностью диска и постоянными магнитами на тепловое состояние диска и в применении бесконтактного метода измерений температуры диска.

На рис. 1 показан диск, установленный в вакуумной установке ускорительного стенда. Передаточное число ускорителя (зубчатой передачи) составляет 10. С помощью ускорителя скорость вращения стендового электродвигателя преобразуется от номинальной 3000 об./мин до максимальной.

Перед проведением исследований на специальный крепежный алюминиевый диск, имею-

щий стальные подставки, были установлены 8 сильных постоянных магнитов с размерами  $60 \times 30 \times 15$  мм из сплава Sm–Co. Алюминиевый диск обеспечивал также отвод тепла от постоянных магнитов, что очень важно с точки зрения потери магнитных свойств при повышении температуры. Средний зазор между поверхностью диска и поверхностью сильных постоянных магнитов обеспечивался при монтаже и составил 5 мм. Термопары были установлены на радиусах диска, равных 125, 100 и 50 мм. Провода термопар подключались через токосъемное устройство к измерительной аппаратуре, использующей приборы ТРМ-201.

Экспериментальные исследования нестационарного нагрева диска проводились до максимальной скорости вращения (кривая 1, рис. 2). Из анализа экспериментальных результатов следует, что скорость нагрева составляет от  $2.0$  до  $2.5^\circ\text{C}/\text{с}$  до достижения температуры  $440^\circ\text{C}$  (кривая 3, рис. 2) и  $3.0\text{--}3.5^\circ\text{C}/\text{с}$  до температуры  $650^\circ\text{C}$  (кривая 5, рис. 2). Исследование влияния зазора между поверхностью диска и магнитами на скорости 15000 об./мин показало (кривая 4, рис. 2), что при увеличении зазора с 5 до 10 мм максимальная температура диска снижалась на  $150^\circ\text{C}$ . Этот фактор влияния можно использовать как дополнительный способ регулирования температуры вращающихся дисков с использованием постоянных магнитов.

Следует отметить, что по сравнению с индукционным нагревом разработанная методика моделирования нагрева дисков позволяет в среднем в два раза повысить КПД нагрева до величины, соответствующей КПД электропривода, обеспечивающего подвод механической энергии для вращения диска, и в целом повысить эффективность нагрева вращающихся дисков.

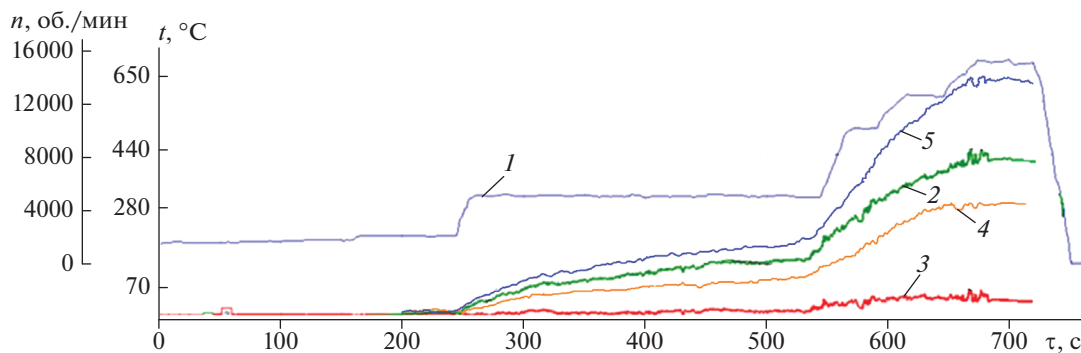


Рис. 2. Нестационарный нагрев: 1 – скорость диска (об./мин), 2 – кривая температуры в зависимости от времени ( $R = 100$  мм), 3 – кривая температуры в зависимости от времени ( $R = 50$  мм), 4 – кривая температуры в зависимости от времени ( $R = 100$  мм) при зазоре 10 мм, 5 – кривая температуры в зависимости от времени ( $R = 125$  мм).

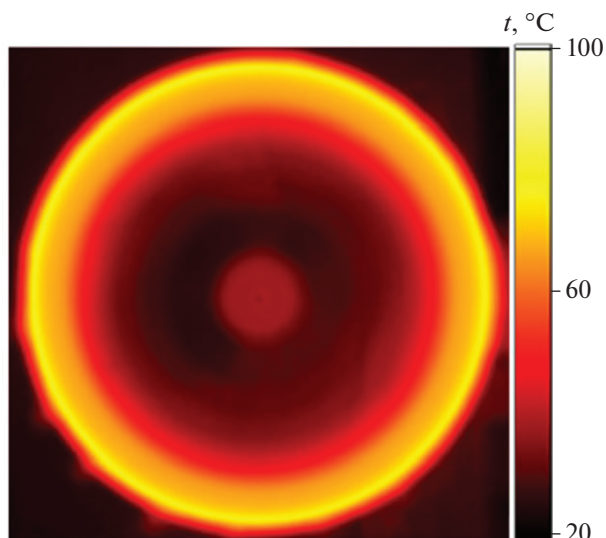


Рис. 3. Диаграмма теплового состояния диска.

Проводились также исследования для модельного диска с использованием небольших сильных постоянных магнитов из сплава Nd–Fe–В с размерами  $25 \times 20 \times 5$  мм, расположенных в ободной части диска, на специальной установке на разных скоростях вращения в диапазоне от 3000 до 12000 об./мин. Такие исследования проведены с использованием бесконтактного средства измерения температуры – термографа FLIR. На рис. 3 приведена диаграмма распределения температуры, полученная с помощью не скоростного термографа, для вращающегося модельного диска на скорости 12000 об./мин в электромагнитном поле, созданном с использованием постоянных магнитов. При этом максимальная температура в ободной части составила около  $100^\circ\text{C}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная методика нестационарного нагрева диска, вращающегося в электромагнитном поле, позволяет повысить КПД и эффективность нагрева вращающихся дисков. Получены скорости нагрева вращающегося диска при нестационарном нагреве и результаты влияния зазора между диском и магнитами на тепловое состояние диска. Предложен бесконтактный метод измерений вращающихся дисков с использованием термографа. Данную методику моделирования целесообразно применять для нагрева небольших дисков и деталей в промышленности.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. Скоростные режимы индукционного нагрева и термонапряжения в изделиях. М.: Инфра-М, 2019. 282 с.
2. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р., Лепешкин С.А. // Электричество. 2009. № 7. С. 33.
3. Кувалдин А.Б. Способ получения энергии и устройство для его реализации. Патент РФ № 2416869, кл. H02N11/00. 2011.
4. Базаров А.А., Данилушкин А.И. // Изв. Томск. политех. ун-та. Инж. георесурсов. 2018. Т. 329. № 10. С. 143.
5. Круцило В.Г. // Изв. Самарск. НЦ РАН. 2016. Т. 18. № 4(2). С. 336.
6. Маннанов Э.Р., Галунин С.А., Никаноров А.Н. и др. // Научн.-техн. вед. СПбГПУ. Физ.-мат. науки. 2019. Т. 12. № 2. С. 23.
7. Кувалдин А.Б., Лепешкин А.Р. // X межд. научн.-практ. конф. “Энерго- и ресурсосбережение – XXI век”. (Орел, 2012). С. 41.
8. Лепешкин А.Р., Кувалдин А.Б., Лепешкин С.А., Ильинская О.И. // Мат. XXVII Межд. научн.-техн. конф. “Электромагнитное поле и материалы”. (Москва, 2019). С. 88.
9. Гинзбург Б.А., Каминская Т.П., Поляков П.А. и др. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 2. С. 226; Ginzburg B.A., Kaminskaya T.P., Polyakov P.A. et al. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. No. 2. P. 197.

## Simulation of heating of rotating discs in an electromagnetic field using permanent magnets

A. R. Lepeshkin<sup>a, b, \*</sup>, A. B. Kuvaldin<sup>a</sup>, O. I. Ilyinskaya<sup>b</sup>, M. A. Fedin<sup>a</sup>, A. O. Kuleshov<sup>a</sup>

<sup>a</sup>National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, 111250 Russia

<sup>b</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, 125993 Russia

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

The non-stationary heating of a disk rotating on an accelerating stand in an electromagnetic field created using a device with magnets is studied. The proposed modeling technique is advisable to use for heating of the small disks and parts.