

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ДЕТАЛЯХ

А. Р. Лепешкин

*Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова,
111116, Россия, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.2, e-mail: lepehkin.ar@gmail.com*

Предложен метод исследования распространения тепла во вращающихся деталях в поле действия центробежных ускорений и сил. Разработано устройство для определения характеристик распространения тепла и скорости нагрева теплопроводников на разгонном стенде с использованием вакуумной камеры в условиях центробежных ускорений и сил. Теплоизолированные радиальные и окружные теплопроводники с датчиками температуры и электронагревателями были установлены на диске. Данные по измерениям температур на концах теплопроводников передавались через ртутный токосъемник в измерительную компьютерную систему. Приведены результаты исследований нестационарного нагрева теплопроводников в поле действия центробежных ускорений и сил. Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что скорости нагрева теплопроводников возрастают при повышении частоты вращения. Причем, в радиальном направлении скорость нагрева возрастает больше, чем в окружном. По полученным результатам представлены оценки скоростей нагрева теплопроводников с учетом роста электронной проводимости металла (влияния инерции электронов).

Введение

Принято считать, что действие центробежных сил и ускорений не вызывают изменений в распространении тепла (теплопередачи) во вращающихся деталях. Однако эксперименты,

приведенные в данной работе, показывают, что происходит значительное изменение теплопередачи в металлах в поле действия центробежных ускорений и сил. Лопатки турбин работают при экстремальных центробежных ускорениях свыше $40000...100000 \text{ м/с}^2$ ($4000...10000 \text{ g}$) и изменение теплопередачи материала в этих условиях можно ожидать существенным. Вероятно, неучет этого обстоятельства приводит к различию температурных полей лопаток турбин, прогнозируемых расчетом и наблюдаемых в эксперименте. Кроме ускорений на роторные детали (диски, лопатки) действует растягивающая центробежная сила, которая также влияет на теплопередачу в материалах.

Методика и результаты исследований

В данной работе проведены экспериментальные исследования распространения тепла во вращающихся деталях в поле действия центробежных растягивающих сил и ускорений при испытаниях на разгонном стенде (рис. 1, рис. 2) с использованием разработанного метода исследований [1].

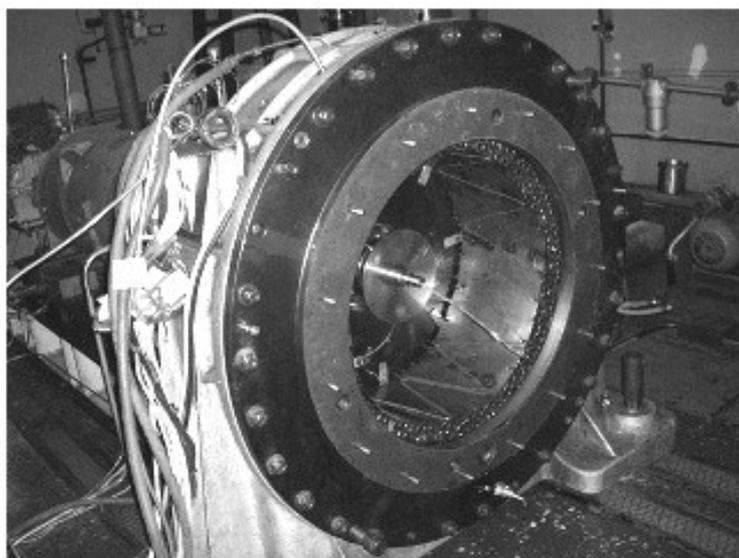


Рис. 1. Разгонный стенд с диском, установленным в вакуумной камере

Данный метод исследований предусматривал закрепление на полотне модельного диска двух теплоизолированных проводников из копелевого провода с диаметром $0,5 \text{ мм}$ с электронагревателем длиной 10 мм (рис. 2).

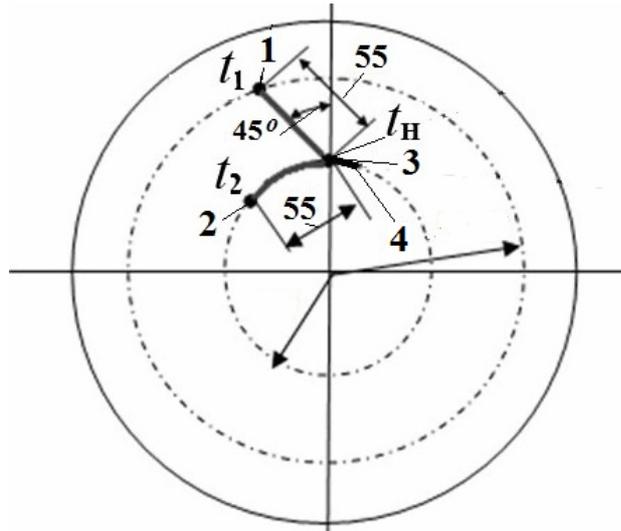


Рис. 2. Схема установки теплопроводников и электронагревателя на диске: 1, 2 – термопары на концах теплопроводников, 3 – термопара в месте соединения теплопроводников перед электронагревателем, 4 – участок расположения электронагревателя.

Электронагреватель размещался в месте соединения теплопроводников. Теплоизолированный объект закреплялся на полотне диска фольгой, привариваемой точечной сваркой.

Первый теплопроводник был размещен в радиальном направлении, а другой вместе с нагревателем располагался в окружном направлении. Внутри вакуумной камеры стенда устанавливался модельный диск со жгутом проводов (рис. 1).

Испытания проводились в данной испытательной камере на разгонном стенде, оснащенный автоматической системой управления частотой вращения электропривода и циклическим нагружением. Контроль за температурным состоянием теплопроводников, размещенных на вращающемся диске с нагревателем, производился компьютерной системой, оснащенной крейтом и измерительными платами. Обработка результатов осуществлялась по разработанной программе. Для питания электронагревателя использовался стабилизированный источник Б5-47.

Провода питания нагревателя и термопары от теплопроводников присоединялись к ртутному токосъемнику. После вакуумирования камеры без включения привода подавалось

стабилизированное питание на нагреватель и записывались базовые показания термопар в течение 300...360 с работы нагревателя.

Затем камера развакуумировалась и объект с диском остывали до исходного состояния. После охлаждения камера вновь вакуумировалась ($p = 0,03$ атм) включался электропривод. Диск раскручивался до 2500 об/мин, после чего включался нагреватель и осуществлялась запись показаний контрольных термопар в течение 300...360 с.

Затем камера развакуумировалась и объект с диском остывали до исходного состояния. После охлаждения камера вновь вакуумировалась ($p = 0,03$ атм), включался электропривод. Диск раскручивался до 5000 об/мин, после чего включался нагреватель и осуществлялась запись показаний контрольных термопар в течение 300...360 с. Далее выключался нагреватель, камера развакуумировалась, объект охлаждался до исходной температуры и испытания заканчивались.

Результаты исследований представлены на рис. 3÷6.

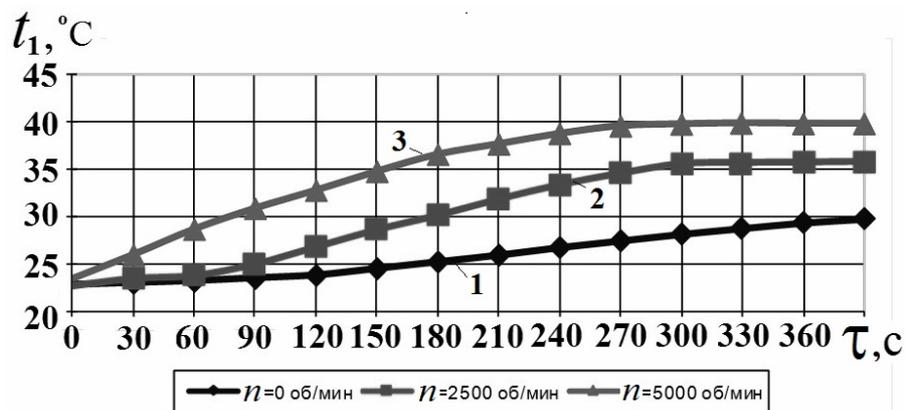


Рис. 3. Температура t_1 на конце первого теплопроводника в зависимости от времени τ нагрева при разных частотах вращения: 1 – 0 об/мин (0 м/с), 2 – 2500 об/мин (25 м/с), 3 – 5000 об/мин (50 м/с)

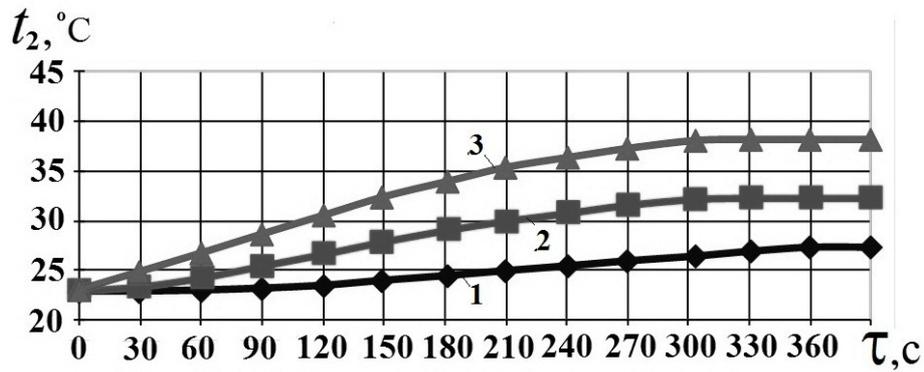


Рис. 4. Температура t_2 на конце первого теплопроводника в зависимости от времени τ нагрева при разных частотах вращения: 1 – 0 об/мин (0 м/с), 2 – 2500 об/мин (25 м/с), 3 – 5000 об/мин (50 м/с)

На рис. 3 и рис. 4 на оси абсцисс указано время нагрева τ , а на оси ординат справа нанесена температура нагревателя t_n (рис. 5 и рис. 6). Слева на оси ординат показана температура t_1, t_2 (рис. 3 и рис. 4) и скорость нагрева v_1, v_2 (рис. 4 и 5) на концах первого и второго теплопроводника. Проведем анализ динамики изменения температуры на конце первого и второго теплопроводников на основе результатов (рис. 3 и рис. 4).

Температура нагревателя в течение 30 с достигала 200 °C, после чего темп ее роста значительно снижался. На концах теплопроводников при $n = 0$ об/мин (базовый эксперимент) скорость нагрева до 60 с (до прихода основного фронта тепла от нагревателя) была весьма незначительной $\approx 0,01$ °C/с. Затем скорость нагрева увеличилась до $0,020 \div 0,04$ °C/с за 30 секунд и держалась довольно стабильно до 270 с, после чего скорость нагрева замедлилась.

На частоте вращения 2500 об/мин скорость нагрева теплопроводников значительно возросла. Скорость нагрева с 60 до 120 с увеличилась от $(0,020 \div 0,024)$ до $0,041 \div 0,057$ °C/с, т.е. скорость нагрева в среднем возросла, более, чем в 2 раза. На частоте вращения 5000 об/мин (при окружной скорости ≈ 50 м/с) скорость нагрева увеличилась до $0,064 \div 0,072$ °C/с за 30 с, т.е. скорость нагрева по сравнению с базовыми условиями увеличилась в среднем в 3 раза.

В наблюдаемом явлении присутствуют две составляющие: от действия центробежного ускорения и растягивающей центробежной нагрузки. При этом, необходимо учитывать, что в

металлах наиболее эффективным является перенос тепла электронным механизмом.

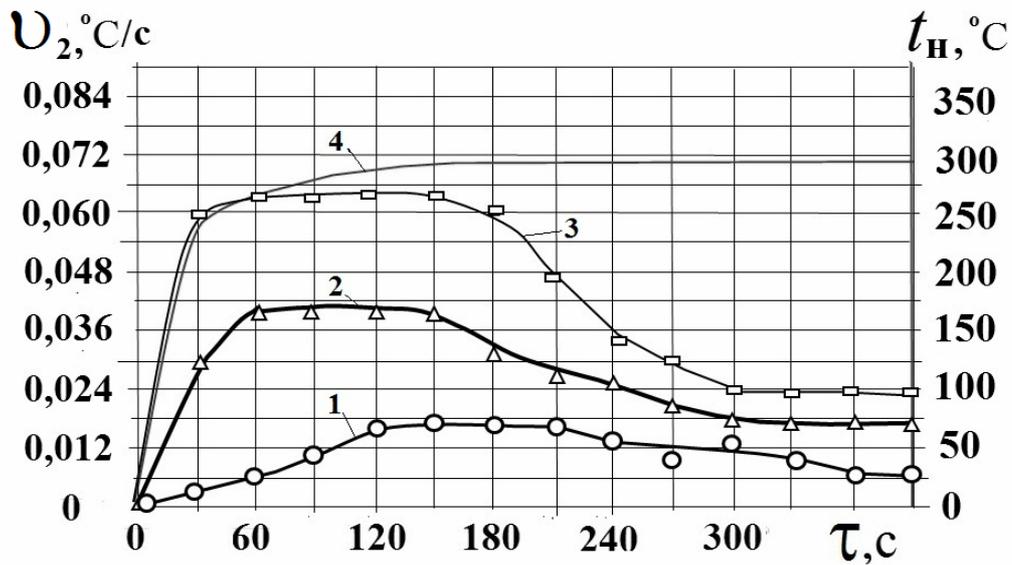


Рис. 4. Скорость нагрева v_1 на конце первого теплопроводника в зависимости от времени τ нагрева при разных частотах вращения: 1 – 0 об/мин (0 м/с), 2 – 2500 об/мин (25 м/с), 3 – 5000 об/мин (50 м/с), 4 – температура электронагревателя.

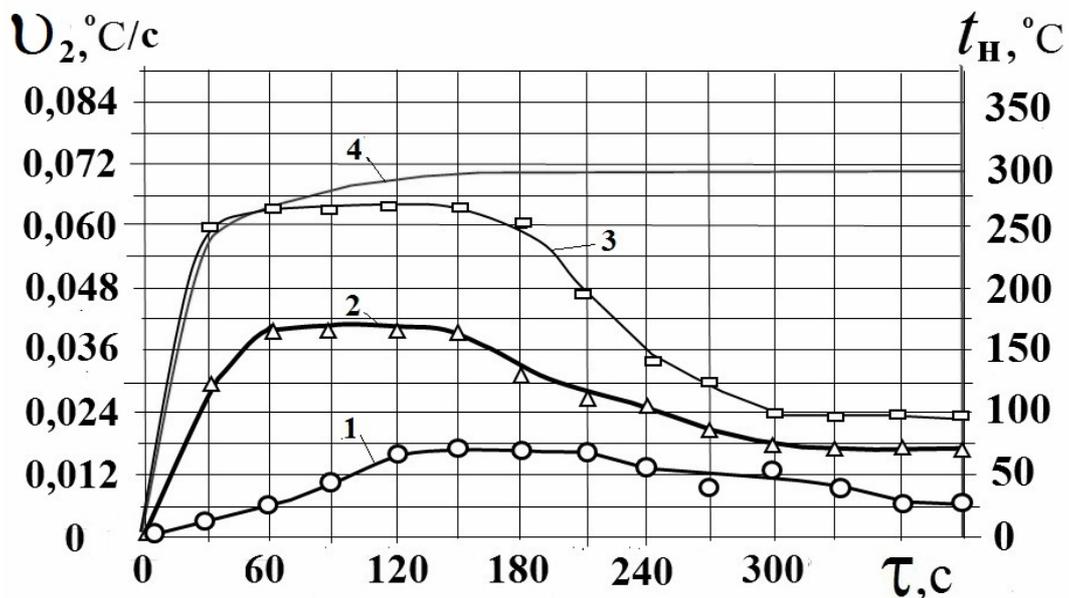


Рис. 5. Скорость нагрева v_2 на конце второго теплопроводника в зависимости от времени τ нагрева при разных частотах вращения: 1 – 0 об/мин (0 м/с), 2 – 2500 об/мин (25 м/с), 3 – 5000 об/мин (50 м/с), 4 – температура электронагревателя

На основе экспериментальных данных, полученных на установке с осевым растяжением, о влиянии сил растяжения вторая составляющая (за счет фононной проводимости) равна, примерно, 10-20 %, а остальная часть 200...280 % связана с влиянием центробежного ускорения на повышение электронной проводимости в металле за счет движения электронов и электронных пар, имеющих массу.

В работе [2] приводятся сведения по электронному явлению в металлах, которое опытным путем установили русские ученые Л.И. Мандельштам и Н.Д. Папалекси в 1913 г. В их опыте при вращении катушки на концах провода возникала переменная разность потенциалов, и, подключенный к концам провода телефон издавал звук. Этот опыт в 1916 г. был усовершенствован американским ученым Ч. Толменом. Катушка в его опыте приводилась в быстрое вращение и затем резко тормозилась. При этом с помощью баллистического гальванометра регистрировался импульс тока неэлектрического происхождения, связанный с инерционным движением свободных зарядов (электронов, имеющих массу) в тонком медном проводе на катушке. Таким образом, электроны и возможно другие частицы продолжают свое движение при резком торможении проводника. В данных опытах также подтверждается, что ускорения оказывают влияние на электронные явления в металлах, в частности, при торможении. Однако из указанных опытов не было сделано выводов и предположений о возможности появления электронного явления на других режимах вращения, и его влиянии на тепловые процессы в коротких проводниках и в деталях, вращающихся с высокими скоростями.

Заключение

Разработаны метод и устройство для исследования распространения тепла во вращающихся деталях [1].

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что скорости нагрева теплопроводников на частотах вращения 2500 и 5000 об/мин возрастают в 2 и 3 раза соответственно по сравнению со стационарным состоянием без вращения. Причем, в

радиальном направлении скорость нагрева возрастает больше, чем в окружном, т.е. на частотах вращения 2500 и 5000 об/мин соответственно на 40 и 25%.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для оценки теплового состояния вращающихся деталей энергетических установок.

Литература

1. Лепешкин А.Р., Бычков Н.Г. Патент № 2417367 РФ. Способ и установка для определения характеристик твердых материалов в поле действия центробежных сил. 2011. Бюл. №12.

2. Гинзбург В.Л. Памяти А.А. Андропова. М.: Изд-во АН СССР. 1955. 622 с.