

С. М. АВЕРКИЕВ, В. М. ДОРОФЕЕВ, Ю. А. ЗАХАРОВ

ТОРМОЗ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ОСЕВЫХ МИКРОТУРБИН

В термодинамической лаборатории Куйбышевского авиационного института созданы установки для исследования микротурбин и их элементов. Одной из таких установок является тормоз УИМТ-6, конструкция, характеристики и эксплуатационные особенности которого рассматриваются в данной статье.

Принципиальная схема тормоза УИМТ-6 аналогична тормозу УИМТ-4 [1]. Их отличие определяется двумя причинами, изменившими тормозную и турбинную часть установки: тормоз УИМТ-6 предназначен для испытания осевых микротурбин и рассчитан на снятие больших мощностей.

Кроме того, проведены некоторые конструктивные доработки тормоза, упростившие его эксплуатацию.

На фиг. 1 приведен продольный разрез тормоза, а на фиг. 2 — вид с торца.

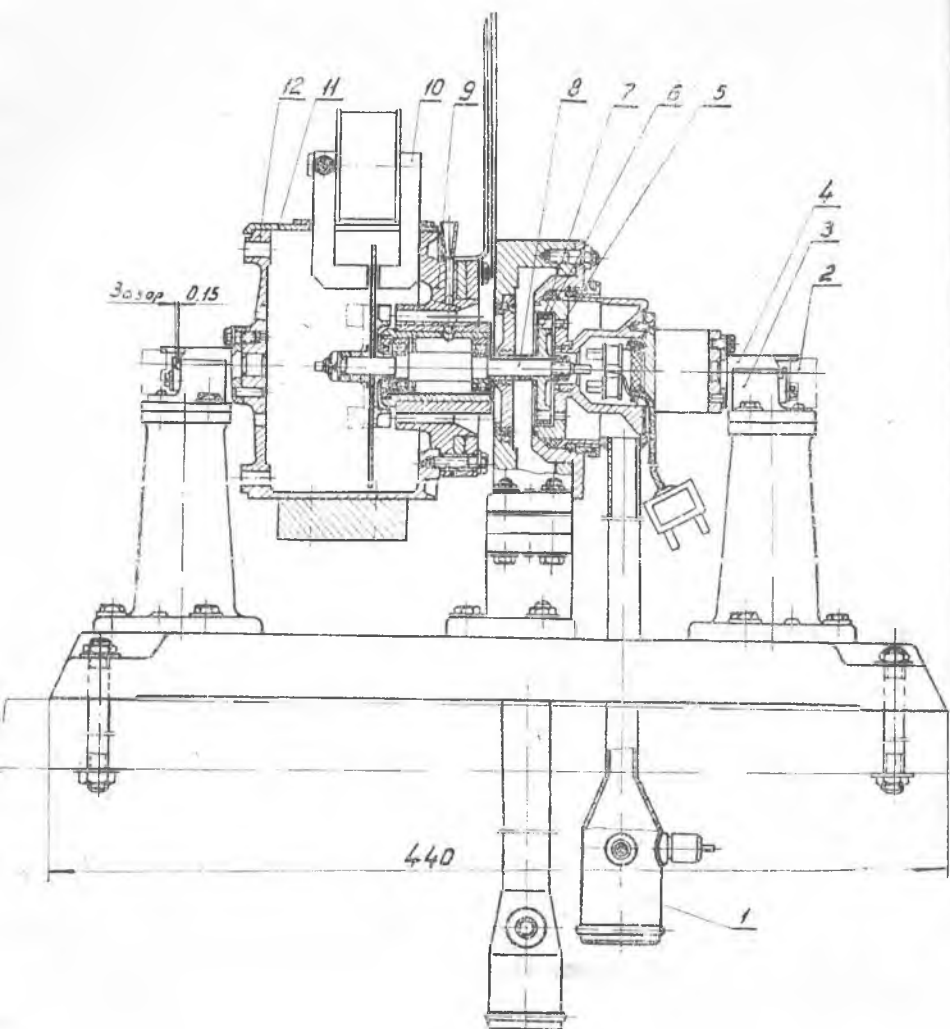
Сжатый воздух из ресивера поступает через патрубок 1 в сопловой аппарат 5. В сопловом аппарате энергия давления превращается в кинетическую энергию, часть которой в рабочем колесе турбины 6 преобразуется в полезную работу вращения вала. Валик тормоза 8 опирается на два шарикоподшипника А100Е, смонтированных в качающемся корпусе тормоза 9. К корпусу тормоза прикреплен тормозной барабан 12, внутри которого размещаются тормозные диски, вентиляторы и полюсы магнитов. Для замены дисков и вентиляторов верхняя часть барабана 11 делается съемной. Подвижная часть тормоза опирается ножами 4 на призмы 3.

Мощность турбины поглощается вентиляторами, дисками и шарикоподшипниками. Момент, опрокидывающий подвижную часть тормоза, равен крутящему моменту турбины и измеряется произведением плеча тормоза на вес уравновешивающих гирь

$$M_{кр} = p \cdot l \text{ кг}\cdot\text{см},$$

где: P — вес гирь, кг;

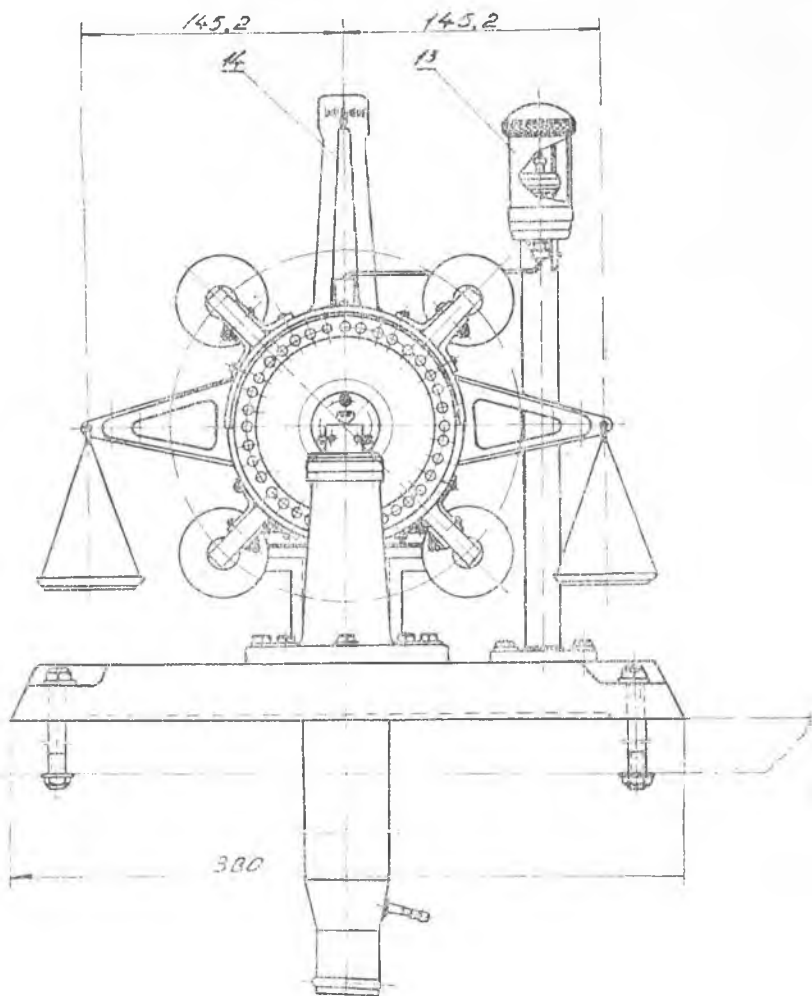
l — длина плеча рычага, см.



Фиг. 1.

При замерах крутящего момента используется «нуль-метод». Ступенчатое регулирование оборотов и мощности микротурбин обеспечивается сменой вентиляторов и дисков. Плавное регулирование этих параметров осуществляется электромагнитами 10. Величина поглощаемой электромагнитами мощности на оборотах $n = 50\,000$ об/мин составляет 0,6—0,7 л. с.

При вращении диска в магнитном поле в нем индуцируются вихревые токи, при взаимодействии с магнитным полем создающие тормозной момент. Величина тормозного момента регулируется из-



Фиг. 2.

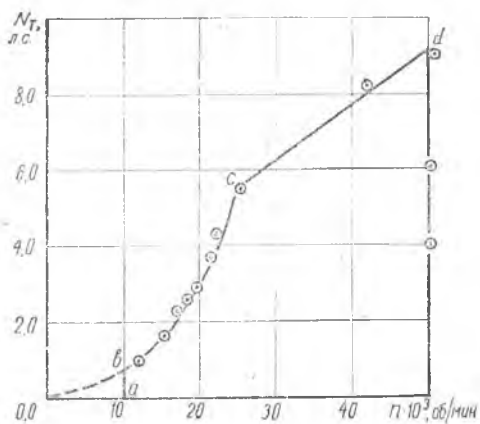
менением силы тока, пропускаемого через катушки электромагнитов.

На тормозе испытывались осевые воздушные микротурбины мощностью от 0,5 до 9 л. с. При этом обороты менялись от 10 000 до 50 000 об/мин.

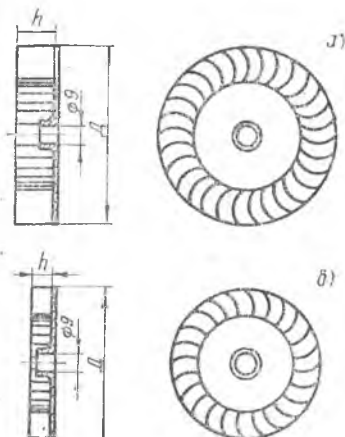
На фиг. 3 показана характеристика тормоза. Ординаты *ab* и *cd* определяют диапазон оборотов, в котором испытывался тормоз. Линия *ae* соответствует минимальной поглощаемой тормозом мощности двух подшипников А100Е валика турбины. Практически эта линия совпадает с осью абсцисс (точка *e* имеет ординату $\approx 0,03$ л. с.).

Линия ac определяет минимальные обороты, которые можно получить на тормозе при заданной мощности. Точка c определяется прочностью применяемых вентиляторов. На линии cd мощность растет пропорционально оборотам.

Внутри поля мощностей торможения $acde$ можно снять любую точку заменой вентиляторов, дисков и изменением силы тока в катушках.



Фиг. 3.



Фиг. 4.

На линии максимальной мощности торможения acd в тормозном барабане устанавливались, в зависимости от мощности и оборотов турбины, один или два вентилятора и диск с наружным диаметром 115 мм, сила тока в катушках электромагнитов равнялась 2,5 а. На участке ac ставился вентилятор с наружным диаметром 94 мм и высотой лопаток 20 мм (фиг. 4), на участке cd устанавливались один или два вентилятора с высотой лопаток от 8 до 15 мм (фиг. 4б).

Чувствительность весов установки $\pm 0,3$ г, что на плече в 14,52 см создает крутящий момент 4,356 гсм. Наибольшая ошибка в определении момента получится при замере крутящего момента $M_{кр}$ на минимальной мощности и максимальных оборотах. При этом величина

$$M_{кр} = 71620 \frac{N}{n} = 71620 \frac{0,5}{50\,000} = 0,7162 \text{ кг}\cdot\text{с.м.}$$

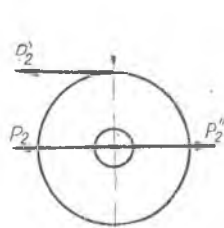
Тогда относительная величина ошибки составляет 0,6%. Во всех других случаях измерения $M_{кр}$ эта ошибка уменьшается.

Для смазки подшипников на тормозе установлена капельница 13, которая позволяет регулировать подачу масла в подшипники. Для нормальной работы подшипников требуется их непрерывная смазка из расчета 0,5 см³ масла в час на один подшипник. Рекомендуемое масло — трансформаторное.

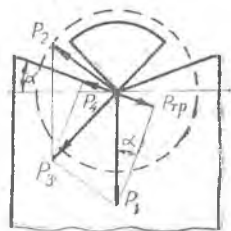
Электромагниты создают тормозной момент при работе на переменном и постоянном токе; но рекомендуется работать на постоянном токе, так как при этом тормозной момент увеличивается. В электрической сети питания электромагнитов необходимо иметь амперметр, по показаниям которого можно судить о нагрузке электромагнитов. Во избежание перегорания катушек и перегрева тормоза сила тока не должна превышать $2,5 \text{ а}$.

Как уже было сказано, торможение микротурбин можно осуществить вентиляторами, дисками и электромагнитами. При работе следует отдавать предпочтение первым двум видам торможения, особенно при работе на больших мощностях, так как при этом тормозная часть УИМТ-6 меньше греется. Это обстоятельство объясняется увеличением

циркуляции воздуха через вентиляционные отверстия тормозного барабана при постановке больших вентиляторов или дисков. При использовании электромагнитов энергия вихревых токов превращается в тепло, вентиляция воздуха при этом остается прежней, тормозная



Фиг. 5.



Фиг. 6.

часть установки разогревается, левый (на фиг. 1) подшипник работает в тяжелых условиях и может выйти из строя.

При испытаниях микротурбин средней мощности в 2—3 л. с. и наборе 3—5 вентиляторов для плавной регулировки оборотов необходима сила тока в $1,0—1,2 \text{ а}$. При этом выделение тепла в тормозной части установки невелико и позволяет вести длительные эксперименты.

Для предотвращения повреждения ножей и призм при замене дисков, вентиляторов, микротурбин и по окончании экспериментов тормоз должен устанавливаться на арретеры 2.

При испытании парциальных турбин мощностью больше 1 л. с. необходимо следить за расположением каналов соплового аппарата относительно оси вала тормоза. При некоторых положениях каналов соплового аппарата возможно задевание рабочего колеса турбины за неподвижное кольцо соплового аппарата 7. Причина задевания в следующем. Если проекция равнодействующей окружающих сил (фиг. 5) парциальной турбины отлична от нуля, появляется сила P_2 , стремящаяся сдвинуть подвижную часть тормоза по отношению к неподвижной. Рассмотрим, при каких условиях возможен такой сдвиг.

На нож тормоза (фиг. 6) действуют две силы: P_1 — вес тормоза, приходящийся на рассматриваемую опору, и P_2 — равнодействующая окружных усилий парциальной турбины. Сила P_1 всегда

направлена вниз, сила P_2 , в зависимости от установки соплового аппарата, может принимать любое направление в плоскости, перпендикулярной оси тормоза. Равнодействующая этих сил $\overline{P_3} = \overline{P_1} + \overline{P_2}$. Сила P_4 , сдвигающая нож вдоль левой грани призмы, появляется при угле $\beta > \alpha$ и равна $P_4 = P_3 \sin(\beta - \alpha)$. Препятствующей сдвигу силой является сила трения $P_{тр}$. Проекция равнодействующей сил P_4 и $P_{тр}$ на левую грань призмы определяется равенством $P = P_{тр} - P_3 \sin(\beta - \alpha)$.

При $P > 0$ тормоз будет работать нормально, при $P < 0$ подвижная часть установки будет сдвигаться и турбина начнет задевать за кольцо соплового аппарата. Для нормальной работы тормоза необходимо, чтобы $P_2 < P_1 \cdot \sin \alpha + P_{тр}$.

Наиболее неблагоприятное положение соплового аппарата будет в том случае, когда сила P_2 будет направлена вдоль грани. При этом предельное значение силы P_2 , при котором подвижная часть тормоза не будет сдвигаться при любом положении соплового аппарата, определяется равенством

$$P_{2\text{пр}} = P_1 \cdot \sin \alpha + P_{тр}. \quad (1)$$

При любых $P_2 > P_{2\text{пр}}$ сопловой аппарат необходимо поворачивать так, чтобы проекция силы P_2 на левую грань призмы не превышала силы $P_{2\text{пр}}$.

Аналогичные рассуждения справедливы и для правой стороны призмы.

Для рассматриваемого тормоза найдем численное значение силы $P_{2\text{пр}}$ и соответствующую ей мощность. Подвижная часть тормоза УИМТ-6 весит 5,4 кг. Так как центр тяжести подвижной части установки находится от рассматриваемой призмы на $\frac{2}{3}$ расстояния между призмами, то на опору приходится $\frac{1}{3}$ веса — 1,8 кг; угла $\alpha = 15^\circ$. Сила трения определяется по формуле $P_{тр} = f \cdot P_1 \cdot \cos \alpha$, где f — коэффициент трения лезвия ножа по грани.

Из [2] берем $f = 0,2$. Находим $P_{2\text{пр}}$.

$$P_{2\text{пр}} = P_1 (\sin \alpha + f \cdot \cos \alpha) = 1,8 (\sin 15^\circ + 0,2 \cdot \cos 15^\circ) = 0,814 \text{ кг.}$$

Соответствующая мощность при оборотах $n = 50000$ об/мин равна

$$N = \frac{r_{\text{ср}} \cdot P_{2\text{пр}} \cdot n}{71\,620} = \frac{2,25 \cdot 0,814 \cdot 50\,000}{71\,620} = 1,28 \text{ л. с.}$$

Здесь $r_{\text{ср}} = 2,25$ см средний радиус турбины.

Величина полученной мощности соответствует опытным данным.

Необходимо отметить, что передняя опора нагружается силой P_1 вдвое большей и, следовательно, нужно ожидать, что в первую очередь начнет сдвигаться нож задней опоры. Это подтверждается и опытом эксплуатации тормоза.

Как видно из формулы 1, предельная мощность, при которой тормоз работает без сдвига при любой установке соплового аппарата, увеличивается с увеличением веса установки, входящего на рассматриваемую опору, угла α и коэффициента трения f .

В лаборатории проведены опыты, которые позволили уточнить мощности, поглощаемые гладким диском и подшипниками А100Е с учетом их работы в тормозе.

Для определения мощности трения диска о воздух выведена формула, учитывающая толщину диска

$$N_f = \beta_f \cdot 10^{-6} \cdot \gamma \cdot U^3 D^2 \left(1 + 5 \frac{b}{D}\right), \text{ л. с.}$$

Здесь γ — весовая плотность, кг/м^3 ;

U — окружная скорость на внешнем диаметре диска, м/сек ;

D — наружный диаметр диска, м ;

b — толщина диска, м .

Коэффициент β_f по данным экспериментов равен 2,2.

Мощность трения двух подшипников А100Е определяется по формуле

$$N_{fn} = 1,15 \cdot 10^{-11} \cdot n^2, \text{ л. с.}, \quad (3)$$

где n — число оборотов вала, об/мин .

Верхний предел оборотов УИМТ-6 ограничивается обычно стойкостью шарикоподшипников. Как показал опыт эксплуатации, подшипники А100Е работают надежно и длительно (до 500 часов) в тормозах при оборотах до 50000 в минуту, кратковременно (15—20 мин) — до 100000 в минуту.

Описанный тормоз прост по конструкции, надежен и удобен в эксплуатации. Тормоз УИМТ-6 позволяет испытывать микротурбины значительной мощности (до 9—10 л. с.) в широком диапазоне оборотов.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Дорофеев, А. С. Наталевич, Н. Т. Тихонов. Магнитовоздушный тормоз для испытания микротурбин, Известия вузов, серия «Авиационная техника», № 4, 1962.
2. Детали машин, т. I, под ред. Н. С. Ачеркана, Машгиз, 1953.