

*Доцент, кандидат технических наук А. И. Борисенко,
инженер А. П. Горожанкин*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕНТИЛЯЦИИ И ОХЛАЖДЕНИЯ ЗАКРЫТЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

(результаты работы по содружеству ХАИ и ХЭМЗ'а)

ВВЕДЕНИЕ

История вопроса. Цель исследований: создание методики исследований, изыскание резервов мощности и улучшение технико-экономических показателей.

I. Методика исследований

1. Выбор измерителя скорости.
2. Физические основы термоанемометрии.
3. Выбор температуры накала нити.
4. Насадок и применяемая аппаратура.
5. Градуировка термоэлектроанемометра.
6. Введение поправок.
7. Измерение расхода воздуха.
8. Измерение температуры воздуха.
9. Измерения скорости воздушных потоков и температур во вращающихся частях.

II. Аэродинамические и тепловые испытания электродвигателя МА-145-1/8

1. Программа испытаний.
2. Изучение конфигурации остова машины.
3. Измерение общего расхода воздуха.
4. Фотография скоростного поля.
5. Измерение скорости потока у поверхности станины.
6. Размещение термопар для тепловых испытаний.
7. Результаты испытаний на статоре электродвигателя.
8. Температурное поле ротора.
9. Рекомендации института по упрощению конструкции и улучшению охлаждения.
10. Проверка рекомендаций на опытных машинах.

III. Новая конструкция взрывобезопасного электродвигателя типа МА-36

1. Конструктивные недостатки серии МА-140 и устранение их.
2. Результаты испытания электродвигателя МА-36-72/4 и анализ их.
3. Вариант электродвигателя МА-36-72/4 с продольными планками на плотном корпусе.

4. Электродвигатель МА-36-72/4 с магнитным клином.
5. Сравнительная оценка электродвигателей серии МА-140 и МА-36.
6. Серия электродвигателей типа МА-36.
7. Конструктивные особенности электродвигателей серии МА-36.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В конце 1946 года между Харьковским электромеханическим заводом имени Сталина и Харьковским авиационным институтом был заключен договор на проведение научно-исследовательских работ по вопросам вентиляции и охлаждения электрических машин. Программа предусматривала исследование вентиляции и охлаждения машин различных типов. Общими для всех машин были следующие вопросы:

1. Исследования аэродинамических полей электрических машин для проверки достоверности предположений о распределении общего количества воздуха между отдельными каналами, характере воздушных потоков в них и в связи с этим уточнение расчётов.

2. Оценка влияния отдельных конструктивных элементов на аэродинамическое и температурное поле машин, связь между ними и влияние их на интенсивность охлаждения.

Целью работы было изыскание резервов мощности и улучшение технико-экономических показателей.

Значительную часть работ составляли эксперименты на машинах; поэтому важнейшей задачей были создание надежной методики исследований и введения поправок. Этот раздел потребовал большой предварительной работы, которая была проведена в конце 1947 и начале 1948 года.

Вначале работы производились только в институте, но когда объём исследований перерос его производственные возможности, в 1948 г. работа была перенесена на завод, где и продолжается в тесном сотрудничестве с кафедрой лопастных машин.

I. Методика исследований

1. ВЫБОР ИЗМЕРИТЕЛЯ СКОРОСТИ

Первый вопрос — выбор измерителя скорости — был решен в самом начале работы, в 1946 году.

Измеритель скорости воздушного потока, который необходим при исследовании вентиляции и для охлаждения электрических машин, кроме общих требований, предъявляемых к приборам (чувствительность, точность, простота устройства, удобство в обращении и т. д.), должен удовлетворять и ряду специфических требований. Прибор для измерения скорости в условиях поставленной задачи должен:

1. Дать возможность измерений во всех важнейших магистралях воздушного потока, включая узкие щели, длинные каналы, а также каналы во вращающихся частях.

2. Оказывать минимальное влияние на форму потока в местах измерений.

3. Иметь достаточно широкий диапазон измерения скоростей.

4. Быть лёгким и прочным, обладать стабильностью показаний при установке в любом месте, включая установку во вращающихся частях.

Наиболее распространённые в технике способы измерения величины и направления скорости основаны на измерении давлений в потоке. Недостатком этих приборов является практическая невозможность измерения скорости

потока в узких щелях, труднодоступных местах и, особенно, во вращающихся частях машин. По этим же соображениям не могут быть применены анемометры (вертушки).

Поставленным требованиям наиболее полно удовлетворяет термоэлектрон-анемометр, который в дальнейшем будем называть сокращённо «ТЭА».

2. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕРМОАНЕМОМЕТРИИ

При измерении скорости воздушного потока термоанемометром в исследуемый поток помещают насадок, представляющий собой кусочек платиновой или другой тугоплавкой проволоки, укреплённой на соответствующей державке. Эту проволоку будем называть нитью накала. Если нить накала поместить в поток воздуха и нагревать электрическим током, то температура её, а следовательно, и ее электрическое сопротивление будет определяться не только силой тока, питающего нить накала, величиной поверхности и формой нити, но также и скоростью потока воздуха, омывающего нить. Когда скорость потока и сила тока постоянны, то количество тепла, выделяемое электрическим током в единицу времени, будет равно количеству тепла, отдаваемого нитью потоку. Это явление вынужденной теплоотдачи в поперечном потоке лежит в основе термоанемометрии.

Применяя закон Джоуля — Ленца, можно написать уравнение баланса энергии:

$$0,86I^2R = \alpha F (t_w - t_f), \quad (1,1)$$

где:

I — сила тока в цепи термоанемометра (амп);

R — электрическое сопротивление нити (ом);

α — коэффициент теплоотдачи — $\left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{град час}}\right)$;

t_w — температура нити ($^{\circ}\text{C}$);

t_f — » » воздуха, омывающего нить ($^{\circ}\text{C}$).

Так как величины I , R , F , t_w и t_f могут быть непосредственно измерены, то данное соотношение позволяет свести измерение скорости потока к измерению электрического сопротивления данного насадка и питающего его тока, если известна зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости потока.

При конструировании термоанемометра и его расчёта необходимо рассмотреть все факторы, влияющие на теплоотдачу нагретой нити насадка, с тем, чтобы усилить влияние факторов, связанных со скоростью, и уменьшить влияние всех других факторов.

В общем случае теплоотдача нити термоанемометра, помещенной в воздушный поток, сопровождается явлением теплопроводности, конвекции и тепловым излучением. В каждом конкретном случае определяющим является обычно какое-либо одно явление, которое и учитывается. Влияние же остальных можно учесть лишь величиной поправочных множителей.

Для нити, помещенной в поток, коэффициент теплоотдачи можно выразить следующим образом:

$$\alpha = \alpha_h + \alpha_r, \quad (1,2)$$

где: α_h — коэффициент теплоотдачи при вынужденной конвекции,

α_r — коэффициент теплоотдачи лучеиспусканием.

Рассмотрим каждый коэффициент в отдельности.

Теплоотдача цилиндра при вынужденной конвекции

Теория подобия и опытные исследования показывают, что теплоотдача тела при вынужденной конвекции определяется критериями подобия

$\left(Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} \text{ и } Re = \frac{ud}{\nu}, \text{ где } \alpha \text{ — коэффициент теплоотдачи} \right) \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{град час}}, d \text{ — диаметр проволоки (м), } \lambda \text{ — коэффициент теплопроводности} \left(\frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{час град}} \right), \nu \text{ — коэффициент кинематической вязкости} \left(\frac{\text{м}^2}{\text{сек}} \right) \text{ и } u \text{ — скорость потока} \left(\frac{\text{м}}{\text{сек}} \right).$ Для поперечного обтекания цилиндра зависимость между этими критериями можно представить в виде степенной функции вида

$$Nu_f = c Re_f^n, \quad (1.3)$$

где коэффициент c и показатель степени n зависят от значения критерия Re и величины начальной турбулентности. Индекс f указывает, что за определяющую температуру принимается температура воздуха, омывающего нить. Опытные значения c и n приведены в таблице 1.

Таблица 1

№№ п/п	$Re = ud : \nu$	c	n
1	5—80	0,810	0,40
2	80—5,10 ³	0,625	0,46
3	5,10 ³ —5,10 ⁴	0,197	0,60
4	5,10 ⁴ и выше	0,023	0,80

При значениях $t_f 20^\circ \text{C}$, $d = 0,02 \text{ мм}$, $5 < u < 50 \text{ м/сек}$ значение критерия Рейнольдса меняется в пределах $6 < Re < 60$ и соответственно этому коэффициент конвективной теплоотдачи лежит в пределах:

$$1800 < \alpha_k < 4700 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{град час}}$$

Теплоотдача лучеиспусканием

Решение задачи о лучистом теплообмене между двумя поверхностями в замкнутом пространстве, когда одна поверхность охватывает другую (что соответствует условиям применения термоанемометра), приводит к следующему закону Стефана — Больцмана —

$$Q_n = E_n C_0 F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (1.4)$$

где:

Q_n — количество тепла, переданного лучеиспусканием от тела 1 к телу 2;

T_1 — температура тела 1;

T_2 — » » » 2;

F_1, F_2 — поверхности тел 1, 2;

E_n — приведенная степень черноты;

C_0 — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

$$E_n = \frac{1}{\frac{1}{E_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{E_2} - 1 \right)}. \quad (1.5)$$

В случае термоанемометра $F_2 \gg F_1$, $E_n \cong E_1$; при этом значение коэффициента теплоотдачи лучеиспусканием с единицы поверхности представляется в следующем виде:

$$\alpha_s = \frac{Q}{StF} = E_1 C_0 \frac{\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4}{T_1 - T_2}. \quad (1.6)$$

Принимая степень черноты для нити $\epsilon = 0,8$,

$$t_1 = 500^\circ \text{C}; t_2 = 0^\circ \text{C} \quad \alpha_L \cong 27,4 \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \text{град час}}$$

Таким образом доля энергии, теряемой нитью термоанемометра лучеиспусканием, в диапазоне рабочих температур составляет от 0,1 до 0,5% от всей энергии. Поэтому в дальнейшем во всех расчётах значением α_L можно пренебречь и считать $\alpha = \alpha_k$.

Развернув критериальную зависимость (1,3), получим следующее значение для коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha = C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{ud}{\nu} \right)^n \quad (1,7)$$

Уравнение баланса энергии теперь можно переписать в виде

$$0,86 I^2 R = C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{ud}{\nu} \right)^n F (t_w - t_f) \quad (1,8)$$

Принимая во внимание, что

$$R_w = R_0 (1 + at_w), \quad (1,9)$$

где: R_0 — сопротивление нити при 0°C ;

a — температурный коэффициент сопротивления, можно написать

$$t_w - t_f = \frac{R_w - R_0}{a R_0}$$

и окончательно:

$$0,86 I^2 R_w = C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{ud}{\nu} \right)^n F \frac{R_w - R_0}{a R_0}$$

Вводя обозначение

$$\beta = \frac{1}{0,86} C \frac{\lambda}{d} \left(\frac{d}{\nu} \right)^n F \frac{1}{a R_0},$$

имеем

$$u^n = \frac{I^2}{\beta \left(1 - \frac{R_0}{R_w} \right)} \quad (1,10)$$

Так как в рабочем диапазоне значений Re_f показатель n постоянный (см. табл. 1), то для данной нити накала можно считать β — постоянным; уравнение (1,10), связывающее скорость потока с электрическими характеристиками насадка, которые могут быть непосредственно измерены, позволяет определить постоянную β тарировкой термоанемометра по другому измерителю скорости. При этом уравнение (1,10) показывает, что тарирование ТЭА можно производить двумя способами: либо, поддерживая постоянным R_w , находить зависимость между током и скоростью потока, либо, поддерживая постоянным I , находить зависимость между скоростью потока и сопротивлением нити.

Первый способ можно назвать способом постоянного сопротивления, второй — способом постоянного тока.

Так как нить насадка сильно охлаждается уже при незначительных скоростях потока, то более или менее значительное увеличение скорости вызывает только небольшое дополнительное охлаждение; поэтому для диапазона скоростей $0 < u < 50$ м/сек более удобно вести измерения по способу постоянного сопротивления.

3. ВЫБОР ТЕМПЕРАТУРЫ НАКАЛА НИТИ

Требования, предъявляемые к ТЭА, как к прибору для измерения скорости, в отношении рабочей температуры противоречивы.

Для увеличения чувствительности прибора, а также точности отсчёта скорости желательно повышать температуру накала нити как можно больше,

так как при этом повышается значение производной $\frac{dI}{du}$ и увеличивается диапазон изменения силы тока $\Delta I = I_{\max} - I_0$.

В то же время условие сохранения стабильности показаний насадка в течение длительного времени склоняет нас в сторону уменьшения рабочей температуры нити ТЭА. Несмотря на то, что материал нити (платина, вольфрам) весьма устойчив против влияния веществ, содержащихся в атмосфере, все же под действием высокой температуры в течение продолжительного времени в нём происходят внутрикристаллические изменения, которые в конечном счёте заметно сказываются на омическом сопротивлении и ведут к искажению показаний.

Вместе с тем необходимое условие возможности отсчёта при температуре и давлении внешней среды, отличных от таковых при тарировке, требует выбора такой температуры накала, при которой температурный коэффициент α [см. формулы (1,8) и (1,9)] был бы постоянным в диапазоне изменения температур, по крайней мере $\pm 25^\circ\text{C}$. Серьёзным доводом за уменьшение рабочей температуры насадка является снижение опасности пережога нити при внезапном падении скорости. На основании изложенного и систематического наблюдения за отдельными насадками в течение 6 месяцев рабочая температура была принята $t_w = 250\text{--}350^\circ\text{C}$.

4. НАСАДОК И ПРИМЕНЯЕМАЯ АППАРАТУРА

Термоанемометр, предназначенный для измерения средних скоростей потока, состоит из следующих основных частей:

- 1) насадка, вносимого в поток;
- 2) электроизмерительного устройства, позволяющего следить за сопротивлением нити;
- 3) прибора, измеряющего силу тока.

Насадок ТЭА делается из небольшого куска тонкой платиновой проволоки, прикреплённой к ножкам державки, представляющим стержни; они электрически изолированы друг от друга и присоединены к токоведущим проводам. Выбор формы державки и её размеров определялся условиями места измерений (наружные элементы, сетки, щели, вращающиеся каналы).

Длина и диаметр нити обуславливаются следующими соображениями: насадок не должен быть велик; длинная проволока будет давать показания какой-то осередненной по длине нити (в смысле теплоотдачи) скорости, что недопустимо при изучении и измерении потоков с неравномерным распределением скоростей. Кроме того, длинная проволока менее прочна и может быть легко деформирована в потоке. Не следует также применять слишком короткую нить, так как, помимо малого сопротивления её, большое значение приобретают сопротивления переходных контактов и соединительных проводов, что налагает жесткие условия на технику изготовления насадка, так как непостоянство электрического контакта между нитью и ножкой державки может служить источником значительных ошибок.

Конструкция одного из широко применяемых нами насадков приведена на рис. 1.

Необходимо, чтобы материал державки давал возможность надёжного соединения с платиновой нитью и обладал бы минимальным омическим сопротивлением. Как показали опыты, лучшим материалом для державки является не медь, а железо. Железная державка при минимальных размерах будет всегда более жесткой и прочной по сравнению с медной, а это очень важно при необходимости применять длинные державки для измерения скоростей в каналах статора и ротора.

Изготовление насадков производилось следующим образом:

Стальная проволока диаметром 0,8—1 мм обматывалась плотно хлопчатобумажной нитью и пропитывалась в лаке. После сушки этот изолированный стержень плотно обкатывался листовой жестию толщиной 0,2—0,25 мм и представлял собою железную трубку с наружным диаметром 2 мм, затем одевалась резиновая трубка диаметром 2 × 3 и уже поверх этой изоляции одевался ниппель со стопорящим винтом для крепления и фиксации насадка в нужном положении. После этого ножки державки отгибались в нужном направлении с раствором в свету, примерно 4 мм, и приступали к приварке нити.

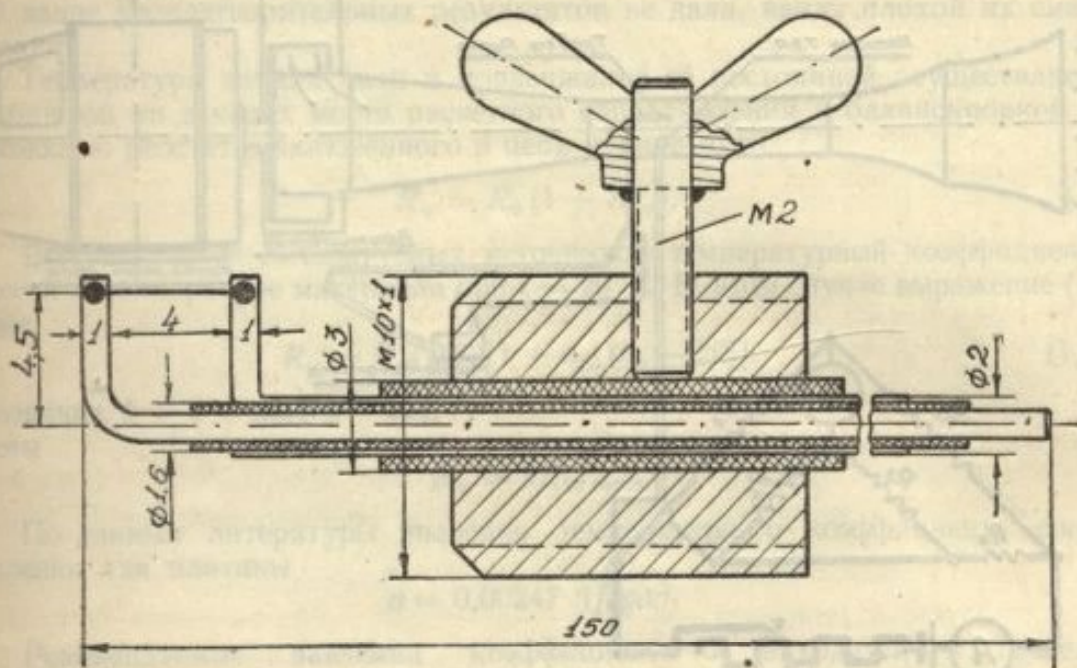


Рис. 1. Типовая конструкция насадка.

Малая толщина свариваемых деталей является определяющим фактором при выборе способа сварки. Нами была выбрана контактная сварка, относящаяся к электромеханическим способам.

Технология сварки малоуглеродистой стали малых толщин имеет свои особенности, важнейшими из которых являются следующие:

1. Сталь перед сваркой должна быть очищена от грязи, ржавчины и окалины. Очистку лучше всего производить травлением в 10% растворе серной кислоты, с последующей нейтрализацией в растворе щелочи и промывкой в горячей воде.

2. Необходимая сила тока зависит от толщины свариваемых деталей, времени сварки, давления на контакт и диаметра контактной поверхности электродов. Интенсивность нагрева при точечной сварке определяется плотностью тока, чрезмерное увеличение которого ведёт к перегреву поверхности державки и пережогу нити. Слишком низкая плотность тока даёт недостаточный провар. Нами была принята плотность тока 100 А на мм².

После непродолжительных упражнений приобретает навык, и приварка нити осуществляется успешно.

После сварки, для стабилизации сопротивления, насадок подвергался искусственному старению, то есть нить нагревалась током до темнокрасного цвета и затем выдерживалась при этой температуре в течение двух часов.

В качестве электроизмерительного устройства, позволяющего измерять и контролировать сопротивление насадка, можно применять мостик Уитстона, одно из плеч которого образовано нитью термоанемометра, или двойной мост Томсона.

Нами двойной мост Томсона применялся потому, что он в отличие от моста Уитстона позволяет устранить влияние соединительных проводов и контактов на результаты измерений, а также допускает значительно большую силу тока в цепи насадки.

В измерительной схеме, приведенной на рис. 2, R_x — измеряемое сопротивление, а R_s — образцовое сопротивление.

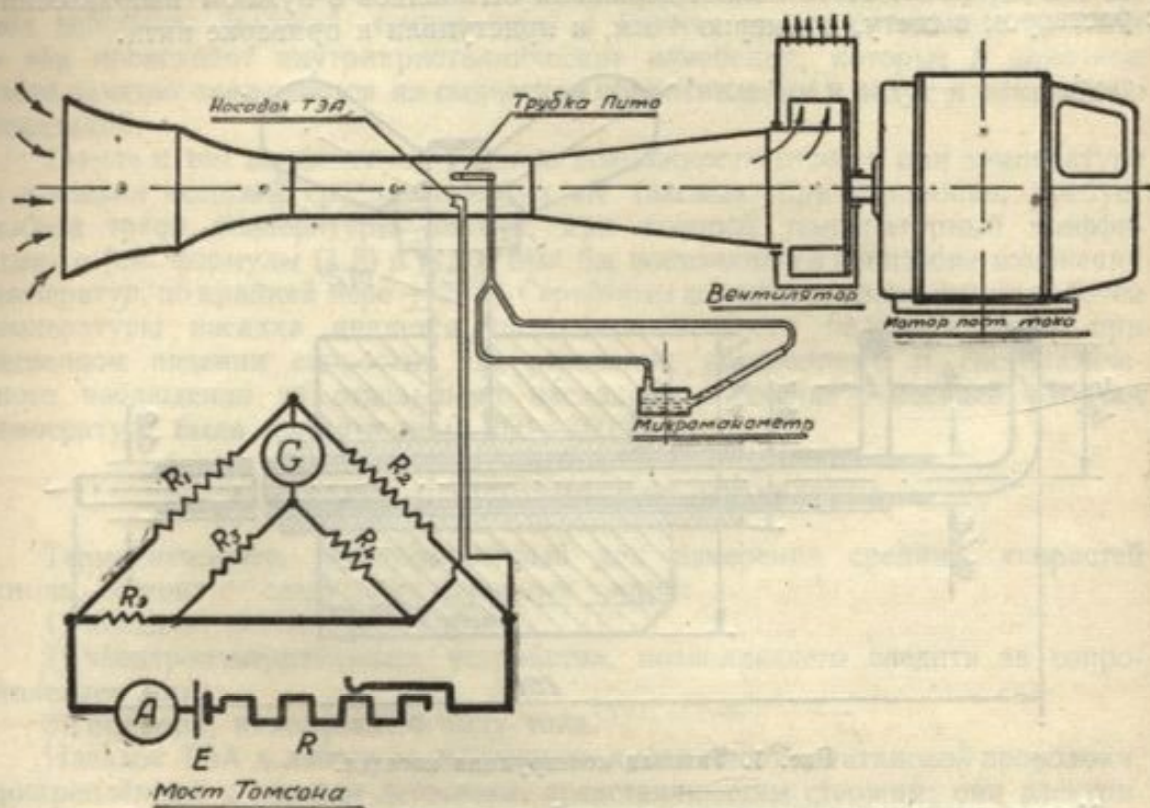


Рис. 2. Схема тарировки термоанемометра.

При равновесии моста на основании закона Кирхгофа для двух контуров его имеем:

$$\frac{R_x}{R_s} = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_3}{I_2 R_2 - I_1 R_4} \quad (1,11)$$

при $R_1 = R_3$; $R_2 = R_4$
имеем

$$R_x = R_s \frac{R_1}{R_2} \quad (1,12)$$

Сопротивления контактов и соединительных проводников на пути главного тока не входят в уравнение (1,11). Только в местах соединения измерительных сопротивлений падение напряжения, вызываемое токами I_1 и I_2 в контактах и соединительных проводах, влияет на распределение напряжений в измерительных контурах. Однако, по сравнению с сопротивлением $R_1 - R_4$ ($10 \div 1000 \Omega$), сопротивления контактов и соединительных проводников величины настолько малые ($0,01 \div 0,001 \Omega$), что влиянием их можно пренебречь. В этом заключается основное преимущество двойного моста.

5. ГРАДУИРОВКА ТЕРМОЭЛЕКТРОАНОМЕОМЕТРА.

За невозможностью точного измерения длины нити ТЭА между точками контакта с державкой, её сопротивление определяем как разность между полным сопротивлением насадка вместе с подводящими проводами и сопро-

тивлением того же насадка с закороченными ножками насадка, то есть

$$R_{\text{нити}} = R_{\text{полное}} - R_{\text{вр.}}$$

При таком способе измерения в сопротивление R нити войдёт сопротивление самих контактов нити с ножками державки, однако, в силу достаточно надёжной сварки, этим сопротивлением можно пренебречь.

$R_{\text{вр}}$ — измерялось на том же мостике, что и $R_{\text{полн.}}$, ножки державки закорачивались в медном зажиме. Попытка закорачивать ножки державки в ртутной ванне удовлетворительных результатов не дала, ввиду плохой их смачиваемости.

Температура накала нити и поддержание её постоянной осуществляется установкой на декадах моста расчётного сопротивления и балансировкой его с помощью реостата, включённого в цепь накала нити.

$$R_w = R_0 (1 + \alpha t_w). \quad (1,9)$$

В большинстве литературных источников температурный коэффициент α отнесен к температуре материала при $t = 20^\circ \text{C}$. В этом случае выражение (1,9) будет

$$R_w = R_{20 \text{ нити}} [1 + a_{20} (t_w - 20)]. \quad (1,13)$$

Обозначив $k = 1 + a_{20} (t_w - 20)$,
имеем

$$R_w = k R_{20 \text{ нити}}.$$

По данным литературы значение температурного коэффициента сопротивления для платины

$$\alpha = 0,00247 \text{ 1/град.}$$

Рекомендуемые значения коэффициента k находятся в пределах $1,6 \leq k \leq 1,8$. Соответственно температура нагретой нити будет

$$263^\circ \text{C} < t_w < 344^\circ \text{C}.$$

Сопротивление, устанавливаемое на декадах моста, будет

$$R_1 = k R_{\text{нити}} + R_{\text{вр.}} \quad (1,14)$$

Градуирование насадков термоанемометров производилось в тарировочной аэродинамической трубе. Схема установки приведена на рис. 2.

Аэродинамическая труба разомкнутого типа имела рабочую камеру прямоугольного сечения. Центробежный вентилятор типа «Сирокко» № 3 приводился во вращение мотором постоянного тока. Изменение скорости воздушного потока в трубе достигалось за счёт глубокой регулировки оборотов мотора, питающегося от мотор-генератора. Трубка Пито и насадок ТЭА размещались в рабочей части трубы симметрично по отношению к оси трубы. Предварительными исследованиями установлено, что поле трубы достаточно симметрично и равномерность скорости потока по сечению не выходит за пределы точности измерений.

Градуирование насадков производилось следующим образом. Вначале фиксировался определённый режим работы вентилятора и, следовательно, поток в трубе, затем приводился в равновесие мост с помощью реостатов и одновременно отсчётом фиксировались показания микроанометра и амперметра. После каждой тарировки проверялось сопротивление насадка. По данным протокола строился график $I = f(u)$. Один из них приведен на рис. 3. Незначительный разброс точек можно объяснить турбулентностью потока в трубе.

Измерение скорости термоанемометра по способу постоянного сопротивления состоит в том, что при помощи реостата, включённого в цепь насадка, под-

держивается постоянное сопротивление насадка Rw_1 , а следовательно, и его температура t_w . По силе проходящего при этом тока можно судить о величине скорости потока, пользуясь тарировочной кривой.

По существу же такое заключение не совсем правильно. Равенство силы тока и сопротивления нити при измерении скорости воздушного потока в машине со значениями тока и сопротивления при градуировке свидетельствуют только об одном — о равенстве теплоотдачи нити как в условиях измерений, так и в условиях тарировки. Это равенство теплоотдачи нити в месте измерения

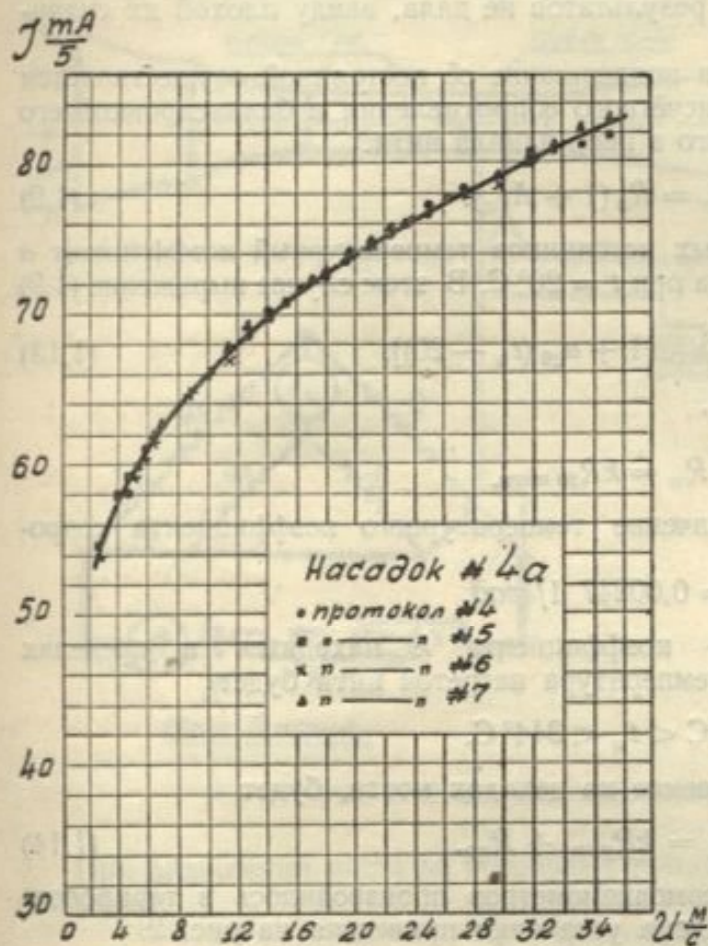


Рис. 3. Типовой тарировочный график термоанемометра.

$\psi = 40^\circ$ уменьшает теплоотдачу, примерно, на 20%. Кроме того, теплоотдача нити зависит от взаимного положения державки и нити. Насадок типа *a* (см. рис. 1) имеет форму, при которой нить расположена в одной плоскости со стержнем державки. Весьма важно поэтому, чтобы эта плоскость не была расположена по потоку, ибо в таком случае возможно искажение характера охлаждения нити по сравнению с тем, какое было при градуировке насадка.

На основании изложенного следует, что измерению скоростей воздушных потоков с помощью ТЭА обязательно должно предшествовать хотя бы грубое, $\psi = \pm 15^\circ$, определение направления потока. Такое определение можно производить в доступных для наблюдения местах с помощью шелковинки либо простой хлопчатобумажной нити длиной 40—50 мм, прикрепленной к тонкой проволоке. В местах, недоступных для визуальных наблюдений, следует применять специальные насадки для определения направления потока. Произвольная ориентировка насадков потока может привести к грубым ошибкам при измерении скоростного воздушного поля машины.

и при тарировке может быть и при скоростях потока, заметно отличающихся между собой. Может получиться и другой вариант: при одинаковых значениях скорости теплоотдача нити будет различна и величина тока, потребляемая насадком, также будет различна.

Из этого следует, что прежде чем приступать к измерениям скорости с помощью ТЭА, необходимо рассмотреть действие хотя бы важнейших факторов, влияющих на теплоотдачу нити. Главнейшие из этих факторов, по нашему мнению, три.

Ориентировка нити относительно потока

Приведенные формулы (1,3) и (1,7) справедливы только в тех случаях, когда нить расположена перпендикулярно потоку. Исследования показывают, что при отклонении нити на угол $\pm 20^\circ$ от поперечного положения теплоотдача существенно изменяется. Отклонение на угол

Степень турбулентности потока

Общезвестен факт, что теплоотдача сильно зависит от степени турбулентности потока. Характер потока определяется не только значением критерия Рейнольдса $Re = \frac{ud}{\nu}$, но также и мерой турбулентности его, то есть отношением $\varepsilon = \Delta u : u$,

где: Δu — величина пульсации потока.

Воздушные потоки в электрических машинах отличаются значительными пульсациями, вызванными вибрацией и наличием плохообтекаемых элементов. Поэтому при градуировке насадков не следует добиваться в трубе потоков с малой степенью турбулентности, так как это может привести к искажению показаний ТЭА при измерениях.

6. ВВЕДЕНИЕ ПОПРАВOK

Процесс теплоотдачи нити в потоке газа определяется его физическими свойствами. Теплоотдача зависит от температуры газа, от удельного веса, вязкости, теплопроводности, теплоёмкости и прочих свойств.

Наиболее существенное влияние на коэффициент теплоотдачи, как это видно из критериальной зависимости (1,3), оказывают теплопроводность и кинематическая вязкость. Если не учитывать изменения температуры воздуха и атмосферного давления в условиях эксперимента по сравнению с таковыми при тарировке, то это приведет к различным значениям коэффициента теплопроводности λ_f и коэффициента кинематической вязкости ν_f , что в свою очередь может вызвать значительные погрешности. Вышесказанное требует решения задачи: какова будет действительная скорость потока, если показания амперметра и сопротивление нити как при тарировке, так и при замерах совпадают, а температура воздуха и атмосферное давление различны? Для решения напишем уравнение баланса энергии при тарировке:

$$0,86I^2R_w = \alpha_1 F (t_w - t_{f1}). \quad (1,15)$$

Соответственно в условиях измерения

$$0,86I^2R_w = \alpha_2 F (t_w - t_{f2}). \quad (1,16)$$

Из этих уравнений получаем $\alpha_1 (t_w - t_{f1}) = \alpha_2 (t_w - t_{f2})$. Раскрыв значение α по уравнению (1,7), находим

$$C_1 \frac{\lambda_1}{d} \left(\frac{u_1 d}{\nu_1} \right)^{n_1} (t_w - t_{f1}) = C_2 \frac{\lambda_2}{d} \left(\frac{u_2 d}{\nu_2} \right)^{n_2} (t_w - t_{f2}). \quad (1,17)$$

Учитывая изменения параметров внешней среды, встречающихся при исследовании электрических машин, можно принять $C_1 = C_2$; $n_1 = n_2$.

Поэтому после подстановки в (1,17) и решения уравнения относительно u_2 будем иметь:

$$u_2 = u_1 \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{t_w - t_{f1}}{t_w - t_{f2}} \right)^{\frac{1}{n}}. \quad (1,18)$$

Следует отметить, что, хотя значения критерия Рейнольдса не выходили при тарировке из границ $0 \leq Re < 80$, показатель степени n по нашим опытам заметно отличается от значений, приведенных в книге Михеева «Основы теплопередачи».

Сравнивая два отсчёта по протоколу градуирования ТЭА, можно написать $\frac{I_1^2}{I_2^2} = \frac{u_1^n}{u_2^n}$,

откуда следует $n = 2 \lg \frac{I_1}{I_2} : \lg \frac{u_1}{u_2}. \quad (1,19)$

Результаты подсчетов значений n по протоколам тарировок приведены в таблице 2.

Таблица 2

№№ п/п	Наименование насадка	№ прото- кола	Дата тари- ровки	Диапазон скоростей в м/сек	Показатель степени	Среднее значение
1	2	3	4	5	6	7
1		1	18/XI—47	2,5—6	0,206	0,265
2		2	24/XI—47		0,254	
3		3	24/XI—47		0,338	
4	Насадок № 3а	1	18/XI—47	6—10	0,336	0,31
5		2	24/XI—47		0,302	
6		3	25/XI—47		0,294	
7		1	18/II—47	10—20	0,36	0,35
8		2	24/XI—47		0,34	
9		3	24/XI—47		0,347	
10		1	18/II—47	20—40	0,333	0,37
11		2	24/XI—47		0,386	
12		3	24/XI—47		0,385	
13		4	24/XI—47	2,5—6	0,252	0,26
14		5	25/XI—47		0,252	
15		6	26/XI—47		0,275	
16	Насадок № 4а	4	24/XI—47	6—10	0,314	0,32
17		5	25/XI—47		0,318	
18		6	26/XI—47		0,336	
19		4	24/XI—47	10—20	0,346	0,335
20		5	25/XI—47		0,320	
21		6	26/XI—47		0,333	
22		4	24/XI—47	20—40	0,358	0,36
23		5	25/XI—47		0,359	
24		6	26/XI—47		0,368	
25		7	25/XI—47	2,5—6	0,235	0,275
26		8	27/XI—47		0,258	
27		9	28/XI—47		0,332	
28	Насадок № 5а	7	25/XI—47	6—10	0,344	0,315
29		8	27/XI—47		0,270	
30		9	28/XI—47		0,336	
31		7	25/XI—47	10—20	0,332	0,31
32		8	27/XI—47		0,338	
33		9	28/XI—47		0,340	
34		7	25/XI—47	20—40	0,36	0,35
35		8	27/XI—47		0,372	
36		9	28/XI—47		0,320	

№№ п/п	Наименование насадка	№ прото- кола	Дата тари- ровки	Диапазон скоростей в м/сек	Показатель степени	Среднее значение
1	2	3	4	5	6	7
37	Насадок № 6а	10	25/XI—47	2,5—6	0,218	0,24
38		11	26/XI—47		0,262	
39		10	25/XI—47	6—10	0,315	0,31
40		11	26/XI—47		0,262	
41		10	25/XI—47	10—20	0,339	0,34
42		11	26/XI—47		0,333	
43		10	25/XI—47	20—40	0,346	0,34
44		11	26/XI—47		0,332	

Опытная проверка формулы (1,18) показала хорошее совпадение показаний ТЭА с результатами непосредственных измерений трубкой Пито.

Введение поправок на изменение параметров внешней среды расчётным путём можно было бы упростить, изменяя нагрев нити таким образом, чтобы температурный напор $\Delta t = t_w - t_f$ был одинаков как в условиях тарировки, так и в условиях измерений. Продолжая расчёты, можно поставить задачу: как настроить аппаратуру ТЭА, чтобы необходимость введения поправок была ликвидирована вовсе?

Уравнение (1,18) можно написать в таком виде:

$$u_2 = Au_1,$$

где:

$$A = \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{t_w - t_{f_1}}{t_w - t_{f_2}} \right)^{\frac{1}{n}},$$

тогда задача сводится к следующему: нужно найти такое значение t_{w_2} , при котором $A = 1$, то есть

$$A = \frac{\nu_2}{\nu_1} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{t_{w_1} - t_{f_1}}{t_{w_2} - t_{f_2}} \right)^{\frac{1}{n}} = 1. \quad (1,20)$$

Решение этого уравнения даёт

$$t_{w_2} = \left(\frac{\nu_2}{\nu_1} \right)^n \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (t_{w_1} - t_{f_1}) + t_{f_2}. \quad (1,21)$$

Принимая во внимание, что от параметров внешней среды зависят ν_2 и λ_2 , получим функциональную связь:

$$t_{w_2} = \Psi(P, t_f)$$

P — атмосферное давление.

Таким образом введение поправок можно свести к внесению изменений в настройку сопротивления насадка. Пользуясь таблицей значений R_w , вычисленных для различных значений P и t_f , можно производить эти поправки.

Можно также построить схемы термоанемометров с автоматической настройкой, положив в основу автоматическую настройку плеч измерительного мостика по уравнению:

$$t_{w_2} = \varphi(R_w) = \Psi(t_f).$$

Применение такой упрощенной зависимости основано на том, что изменение атмосферного давления в данной местности происходит в довольно узких пределах и поэтому настоящим изменением можно пренебречь. Наиболее удачно этот вопрос разрешен в аппаратуре ЭТАМ-3 ВЭИ, разработанной А. В. Чебышевым в 1950 г.

В заключение необходимо остановиться на одном свойстве термоанемометра, которое ставит его в предпочтительное положение по сравнению с другими измерителями при исследовании процессов теплопередач. По существу измерение скоростных полей своей конечной целью имеет оценку интенсивности процесса теплоотдачи в месте измерений. Поэтому в некоторых случаях определение величины скорости не является основным. Измеряя скорость потока термоанемометром, предварительно проградуированным в трубе, делаем заключение, что теплоотдача нити в месте измерения в данном потоке такова, как и в потоке тарировочной трубы.

7. ИЗМЕРЕНИЕ РАСХОДА ВОЗДУХА

Интенсивность процесса теплоотдачи в электромашиностроении обычно оценивают количеством воздуха, проходящего через машину в единицу времени. Не останавливаясь подробно на достоинствах и недостатках этого способа, укажем, что измерение общего расхода воздуха производится наиболее часто по

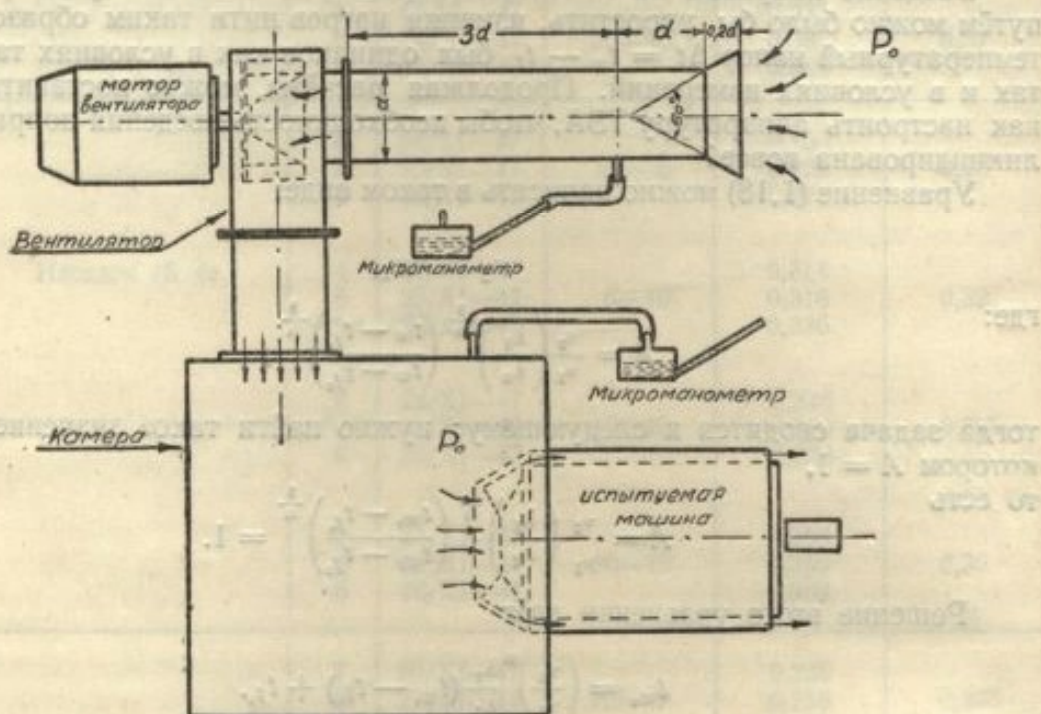


Рис. 4. Схема измерения расхода по способу куба.

сравнению с другими видами исследований вентиляции и охлаждения электромашин. Многочисленные способы измерения расходов по их сущности можно разделить на две категории: прямые и косвенные.

Из прямых способов наиболее широкое распространение до последнего времени имел так называемый способ куба, схема которого приведена на рис. 4. Суть его состоит в том, что испытуемая машина вставляется в воздушную камеру объемом $3-6 \text{ м}^3$ своей всасывающей частью. При вращении машины воздух поступает в неё из камеры и после прохождения через воздуховоды выходит в окружающую атмосферу. Измеряя количество воздуха, поступающего в камеру, судим о расходе воздуха через машину.

А поэтому, для создания условий работы машины, идентичных с естественными (то есть без камеры), нужно поддерживать в камере нормальное атмосферное давление опыта. Это осуществляется специальным нагнетающим вентилятором. Измерение расхода производится во всасывающем трубопроводе с помощью статического штуцера. Напишем уравнение энергии для двух сечений перед коллектором и в месте расположения штуцера

$$p_0 = p_{ст} = \frac{\rho W^2}{2} + \Delta p. \quad (1,22)$$

Здесь

p_0 — атмосферное давление водяного столба;

$p_{ст}$ — статический напор водяного столба;

ρ — массовая плотность воздуха $\left(\frac{\text{кг/сек}^2}{\text{м}^3}\right)$;

Δp — потеря напора на учете от входа до статического штуцера.

Потеря напора Δp может быть выражена в виде

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho W^2}{2},$$

где ζ коэффициент зависящей от геометрии входной части трубопровода.

Подставляя это в уравнение (1,22), найдём

$$p_0 - p_{ст} = \frac{\rho W^2}{2} + \zeta \frac{\rho W^2}{2} = (1 + \zeta) \frac{\rho W^2}{2}.$$

Если обозначить $\frac{1}{1 + \zeta} = k$, то получаем

$$\frac{\rho W^2}{2} = k (p_0 - p_{ст})$$

и окончательно

$$W = \sqrt{\frac{2k (p_0 - p_{ст})}{\rho}}. \quad (1,23)$$

Значение коэффициента k определяется предварительной тарировкой трубопровода, измеряя поле скоростей трубкой Пито. В условиях наших экспериментов было $d = 200$ мм и значение $k = 0,985$.

Способ куба, или способ камеры разрежения, будучи по замыслу достаточно совершенным, обладает вместе с тем существенными недостатками. Главный из них заключается в большой громоздкости применяемых сооружений, которые делают возможными измерения только на специально оборудованной площадке. Вторым является безусловное требование герметичности многочисленных соединений, которое не всегда возможно осуществить.

В некоторых случаях допустимо применение более простого по нашему мнению способа, который даёт достаточно точные для целей практики результаты. Схема этого способа приведена на рис. 5. Он основан на том положении, что в пределах небольших изменений чисел Рейнольдса характер аэродинамического поля (то есть профиль скоростей) практически не изменяется.

Измерение расхода производится следующим образом: со стороны всасывания воздуха пристраивается всасывающий трубопровод с калиброванным статическим штуцером. Одновременно со стороны выхода устанавливается трубка Пито для измерения динамического напора в наиболее характерной точке.

Произведя одновременный отсчет на микроманометрах, мы затем снимаем всасывающий трубопровод и производим измерения только динамического

напора. Определение расхода воздуха в нормальных условиях эксплуатации производится на основании следующей зависимости:

$$\frac{v_{\text{измер.}}}{v_{\text{действ.}}} = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}, \quad (1,24)$$

здесь

v_1 — расход в единицу времени;

h_1 — величина динамического напора при наличии всасывающего трубопровода;

h_2 — величина динамического напора при отсутствии всасывающего трубопровода;

обозначив

$$\sqrt{h_1 : h_2} = b,$$

получаем

$$v_{\text{действ.}} = b v_{\text{измер.}} \quad (1,25)$$

Изложенный способ широко применялся нами при измерении расходов воздуха закрытых асинхронных электродвигателей, и, будучи достаточно точ-

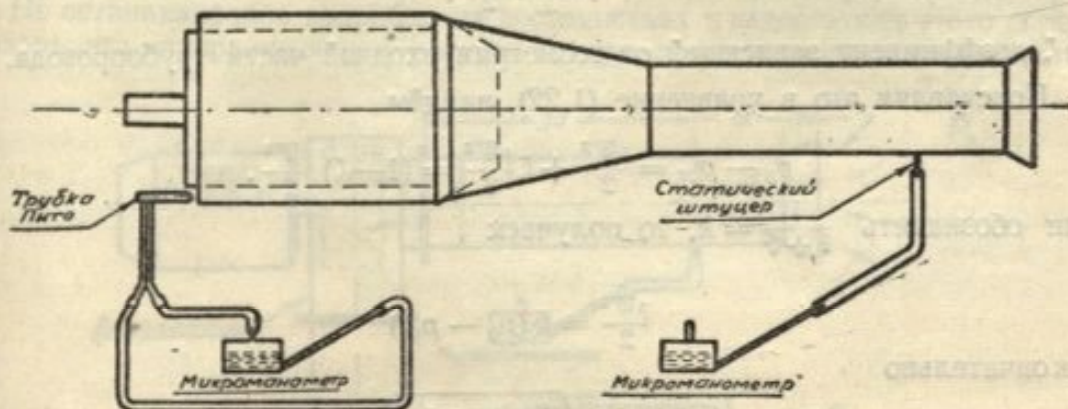


Рис. 5. Схема для измерения расхода воздуха.

ным, не требовал больших, по затрате времени, подготовительных работ, а также допускал измерения непосредственно на испытательных станциях ОТК.

Третий способ измерения расходов заключается в измерении поля скоростей в сетке щитка, при входе воздуха в машину с помощью ТЭА. Являясь универсальным способом, он по времени измерений более продолжительный, чем второй способ, так как для точности измерений их необходимо производить в довольно большом количестве точек. Общий расход воздуха определяется как сумма расходов через элементы сетки, то есть

$$v_{\text{общ}} = v_1 + v_2 + \dots = u_1 f_1 + u_2 f_2 + \dots \quad (1,26)$$

Косвенный способ определения расхода воздуха заключается в измерении температур входящего и выходящего воздуха при проведении теплового режима. При установившемся тепловом режиме можем написать следующую зависимость

$$Q = C_p \gamma v (t_{f_1} - t_{f_2}), \quad (1,27)$$

здесь

Q — греющие потери в единицу времени, уносимые воздухом;

C_p — теплоёмкость воздуха;

γ — удельный вес воздуха;

v — объёмный расход воздуха в единицу времени;

t_{f_1} — температура входящего воздуха;

t_{f_2} — температура выходящего воздуха.

Из уравнения (1,27) получаем:

$$v = \frac{Q}{c_{p\gamma}(t_{f_1} - t_{f_2})} \quad (1,28)$$

Последний способ в электромашиностроении является наиболее простым, так как в программу испытаний вновь построенных машин, обязательно входит проведение тепловых режимов и стало быть измерение расходов воздуха сводится к вычислению греющих потерь и достаточно точному измерению температур воздуха.

Недостатком этого способа является сравнительно большая неточность.

Ошибка при определении расхода воздуха этим способом может достигать величины 30%. Источником таких грубых погрешностей являются следующие причины:

1. Несовершенство методов определения количества греющих потерь в машинах.

2. Погрешности при измерениях температур воздуха техническими термометрами.

3. Случайное положение термометра при измерении температуры выходящего воздуха, которая неодинакова во всех точках струи.

4. Невозможность точного учёта количества греющих потерь, уходящих из машины в результате теплоизлучения, теплопроводности и естественной конвекции.

Основываясь на вышеизложенном, к данным, полученным на основании косвенного способа измерения расхода воздуха, следует относиться с большой осторожностью.

8. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

При тепловых исследованиях электрических машин существует необходимость измерения температур следующих элементов машины:

1. Температуры изоляции обмоток в пазу и в лобовых частях.
2. Температуры железного пакета в зубцовой зоне и на поверхности.
3. Температуры корпуса машины (в случае корпусной закрытой машины) и щитов.
4. Температуры подшипников.
5. Температуры входящего и выходящего воздуха.

Наибольшее распространение в электромашиностроении при тепловых испытаниях средних машин как измерители температур получили термометры и термопары.

Термометры применяются главным образом для измерения температур воздуха снаружи и внутри машины, а также для измерения температур масла подшипников.

При пользовании ртутными термометрами следует соблюдать осторожность при измерениях в местах магнитных полей. В таких случаях лучше всего пользоваться спиртовым термометром.

Термопары применяются для измерений температур обмоток, железа, пакета и поверхностей корпуса. Основы теории термопар в настоящее время достаточно хорошо разработаны и изучены. Накоплен также большой опыт по их применению.

Наиболее распространёнными и хорошо зарекомендовавшими себя в электромашиностроении являются термопары медь-копелевые и медь-константановые. Так как предельная измеряемая температура редко превышает значения $t = 150^\circ\text{C}$, то опасность окисления меди и возникновения нестабильных значений электродвижущей силы, связанных с этим, исключаются.

Техника изготовления термопар проста и не вызывает никаких затруднений.

При измерениях температур элементов машины с помощью термопар необходимо обратить внимание на определение температуры холодного спая. Включение электроизмерительного прибора в цепь термопары может быть выполнено двумя способами, приведенными на рис. 6.

При присоединении прибора следует либо разорвать цепь термопары в холодном спаяе (рис. 6а), либо разорвать один из термоэлектродов (рис. 6б). Хотя внешне схемы и отличаются друг от друга, но электродвижущая сила, развиваемая термопарами в обоих случаях, будет одинакова, если одинаковы будут температуры горячих и холодных спаев.

Однако, принимая во внимание, что при исследованиях электрических машин закладываются несколько десятков термопар и применяют несколько

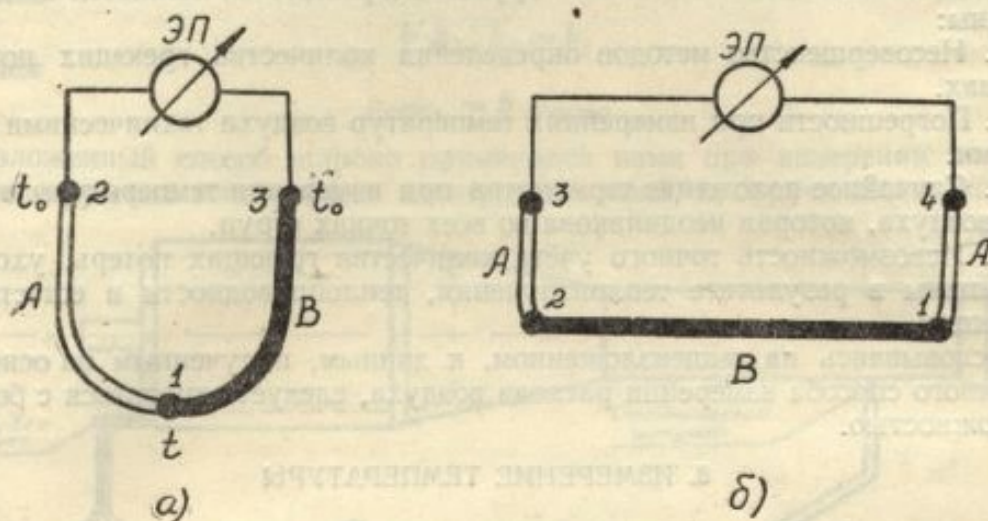


Рис. 6. Способы включения термопар.

переключателей, следует производить подключение ЭП по схеме 6б, так как при этом существует возможность более точного измерения температуры холодного спая, помещенного в масляную ванну.

Что касается электроизмерительного ЭП прибора, то кроме высокоомного чувствительного гальванометра мы в наших опытах широко пользовались потенциометром типа ПП-II.

Преимущество потенциметрического метода измерения термоэлектродвижущей силы заключается в том, что точность измерений не зависит от сопротивления внешней цепи термопары и проводов. Это имеет особенно важное значение при измерении температур во вращающихся частях, а также позволяет производить измерения термопарами различной длины, пользуясь одной тарировочной кривой. Единственным условием является предварительная проверка материала термопар на однородность.

9. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТЕЙ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ И ТЕМПЕРАТУР ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ЧАСТЯХ

Для полноты изучения вопросов вентиляции и охлаждения электрических машин необходимо иметь возможность измерения скоростей воздушных потоков и температур во вращающихся частях машин.

Вопрос измерения температур посредством термопар решается сравнительно просто применением компенсационного метода измерения ЭДС термопар по схеме — термопара — контактные кольца — щётки — потенциометр. Применение компенсационного метода измерения ЭДС исключает влияние длины термопар и сопротивления переходных контактов на точность измерений. Однако по существу более или менее значительное переходное сопротивление

снижает чувствительность гальванометра, потенциометра при измерениях ЭДС термопары, а вместе с тем и точность отсчёта.

Самым главным, по нашему мнению, при измерении перегревов во вращающихся частях является локализация промежуточных ЭДС, возникающих в месте переходного контакта. Способы локализации промежуточных ЭДС будут показаны на конкретном примере (см. раздел 3).

Измерение скоростей воздушных потоков во вращающихся частях с помощью термоанемометра значительно сложнее.

Более точное уравнение баланса энергии для термоанемометра имеет следующий вид

$$0,86I^2 (R_{\text{нити}} + R_{\text{вр}}) = \alpha F (t_w - t_f), \quad (1,29)$$

здесь

$R_{\text{нити}}$ — сопротивление нити;

$R_{\text{вр}}$ — сопротивление державки и проводов ТЭА.

При тарировке ТЭА величины $R_{\text{нити}}$, $R_{\text{вр}}$, F , t_w , t_f остаются постоянными и можно считать

$$u = f(x) = \Psi(I). \quad (1,30)$$

Так как параметры воздуха в машине (давление, температура, теплопроводность и пр.) как правило значительно отличаются от таковых при тарировке, то даже при сохранении геометрических и электрических параметров ТЭА в результате измерений необходимо вводить поправки, используя критериальные зависимости.

Однако, если в условиях опыта изменяется также $R_{\text{вр}}$ (уравнение 1,29), то кроме уверенности сохранения постоянного значения её для точности измерений необходимо иметь величину $R_{\text{вр}}$ возможно меньшей.

Экспериментальная установка для изучения сопротивления переходных контактов

Для оценки величины добавочного сопротивления переходного контакта было принято решение сконструировать и изготовить экспериментальную

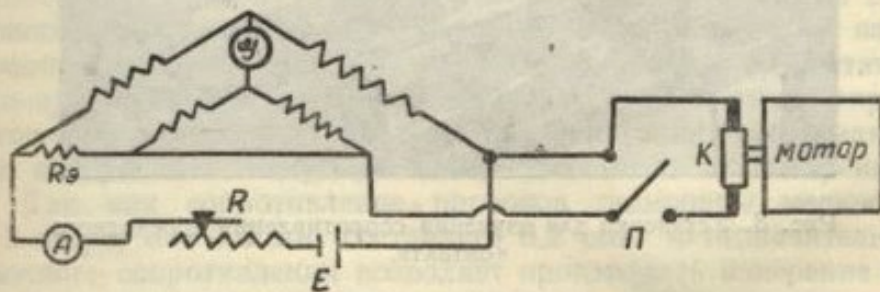


Рис. 7. Схема установки для изучения сопротивления переходного контакта.

G — гальванометр; A — амперметр; R — реостат; Π — переключатель.

установку и с её помощью изучить влияние главнейших факторов, определяющих величину сопротивления скользящих контактов, а также подобрать наиболее выгодные параметры и режимы при устройстве установки непосредственно на машине. Схема этой установки дана на рис. 7 и фотография её на рис. 8.

Экспериментальная установка представляет железный каркас из швеллерного железа, на вертикальной панели которого укреплен электрический мотор постоянного тока. На валу мотора с помощью зажимных втулок, закреплено медное кольцо диаметром 80 мм и шириной обода 10 мм. На вертикальной панели укреплены эбонитовые угольники с запрессованными в них медными щёткодержателями. На этой же панели укреплены оси нагрузочных рычагов.

и кронштейны для роликов. Нагрузочные рычаги изготовлены из текстолита и представляют собой рычаги первого рода с соотношением плеч 1 : 1. В нижнем конце рычага укреплен регулировочный винт, через который передается нагрузка на щётку. В центре его впрессован игольчатый подшипник, а в верхнем конце — просверлено отверстие для нити чашки весов, перекинутой через ролик. На горизонтальной панели установлен угольник из плексигласа для

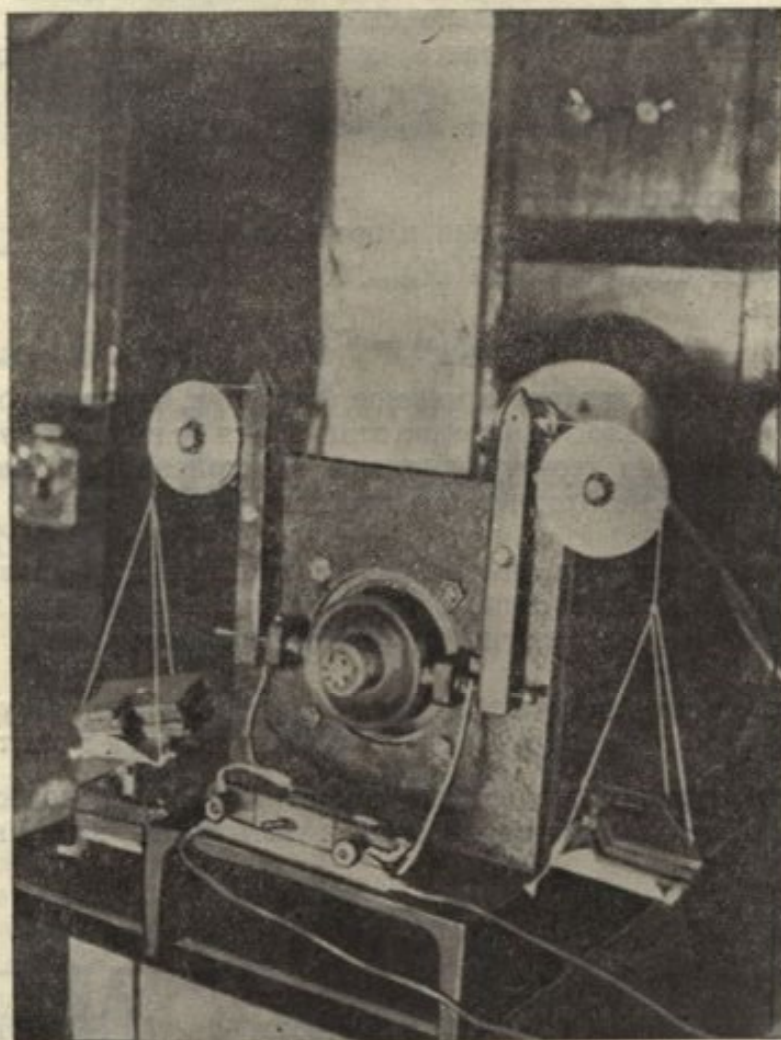


Рис. 8. Установка для изучения сопротивления переходного контакта.

крепления переключателей и контактов. Щётки представляют собой прямо угольные призмы размером $5 \times 10 \times 30$. Изменение чисел оборотов контактного кольца осуществлялось с помощью реостата, введённого в цепь обмотки возбуждения мотора и измерялось с помощью тахометра. Нагрузка создавалась с помощью гирь, помещаемых на чаше установки.

Эксперименты с медными щётками показали, что осуществить надёжный контакт медного кольца с медной щёткой невозможно вследствие быстрого образования задиров как на поверхности кольца, так и на поверхности щётки, поэтому было решено производить испытание с меднографитовыми щётками с различным соотношением меди и графита.

Результаты испытаний щёток с 20% содержанием меди и 80% содержанием графита приведены на рис. 9.

Многочисленные опыты с указанным выше составом меди (20%) и графита (80%) показали, что для стабильности сопротивления скользящего

контакта минимальная необходимая нагрузка находится в пределах 500—600 г.

Как видно из рис. 9, при нагрузке на щётки порядка 500—600 г сопротивление скользящего контакта становится стабильным и не зависит ни от числа оборотов контактного кольца, ни от величины поверхности контакта, и дальнейшая нагрузка не уменьшает сопротивления скользящего контакта. Важным обстоятельством является также то, что с применением щёток данного состава не требуется постоянной очистки поверхности контакта. Величина добавочного сопротивления составляет:

$$R_{\text{доб}} = 0,053 - 0,052 = 0,001 \Omega.$$

При $R_{\text{вр}} = 0,1 \Omega$ величина добавочного сопротивления переходных контактов не превосходит одного процента $R_{\text{вр}}$.

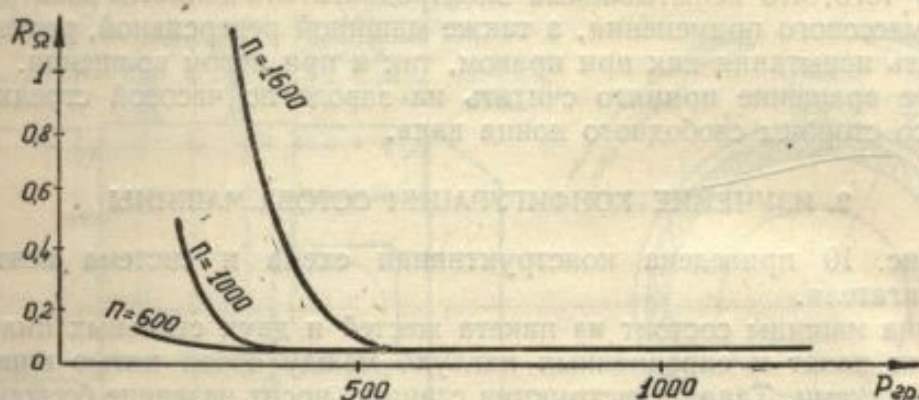


Рис. 9. Сопротивление переходного контакта с меднографитовыми щётками (80% меди и 20% графита) в зависимости от оборотов и нагрузки.

Как показали испытания скользящего контакта при соблюдении условий экспериментальной установки (материал щёток, нагрузка), измерение скоростей воздушных потоков во вращающихся частях можно проводить с достаточной надёжностью. При измерении скорости воздушного потока с помощью ТЭА по способу постоянного сопротивления, устанавливаемого на декадах, моста Томпсона (и обозначаемых в графиках тарировки R_1), достаточно прибавить величину добавочного сопротивления (0,001 Ω) и тогда сопротивление скользящего контакта почти не будет влиять на показания измерителя скорости.

Вопрос измерения температур во вращающихся частях решается ещё успешнее. Так как сопротивление проводов термопары медь-контактная (при $l = 2,5$ метра, $d = 0,5$ мм) составляет 6,2 ома, то незначительная величина добавочного сопротивления позволяет производить измерение не только компенсационным способом, но даже с помощью милливольтметра, что значительно упрощает измерения в производственных условиях при массовых испытаниях на стендах ОТК.

II. Аэродинамические и тепловые испытания электродвигателя МА-145-1/8

1. ПРОГРАММА ИСПЫТАНИЙ

Целью аэродинамических испытаний машины было изучить характер воздушного потока, омывающего поверхности охлаждения электродвигателя, установить связи между характером воздушного потока и интенсивностью охлаждения элементов машины, а также выяснить факторы, влияющие на теплопередачу, проверить эффективность существующих усовершенствований для увеличения теплосъёма и, наконец, наметить пути для улучшения системы вентиляции и охлаждения.

Для решения поставленной задачи была разработана программа испытаний электродвигателя типа МА-145-1/8, состоящая из следующих основных этапов:

1. Изучение конфигурации обдуваемых элементов машины и разметка мест для измерения скоростей воздушных потоков.
2. Фотография отдельных участков скоростного поля.
3. Определение направлений потока для ориентировки термоанемометра.
4. Измерение скоростей воздушных потоков.
5. Измерение общего расхода воздуха, продуваемого вентилятором через машину.
6. Анализ результатов аэродинамических испытаний, оценка вероятной эффективности охлаждения отдельных участков машины и разметка мест закладки термопар для тепловых испытаний.

Ввиду того, что испытываемый электродвигатель является электрической машиной массового применения, а также машиной реверсивной, решено было производить испытания как при правом, так и при левом вращении.

Правое вращение принято считать на заводе по часовой стрелке, если смотреть со стороны свободного конца вала.

2. ИЗУЧЕНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ОСТОВА МАШИНЫ

На рис. 10 приведена конструктивная схема и система вентиляции электродвигателя.

Станина машины состоит из пакета жестей и двух стальных цилиндров, сжимающих пакет и скрепленных наглухо между собой пятью шпильками и семью планками. Такая конструкция станины носит название бескорпусной.

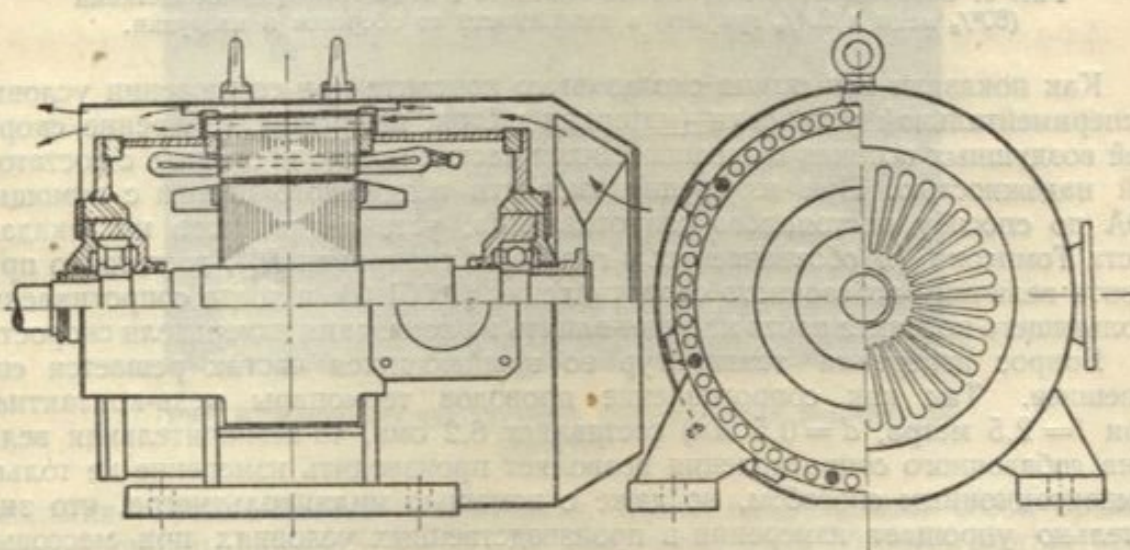


Рис. 10. Конструктивная схема и система вентиляции электродвигателя

МА-145-1/8.

С торцов она закрыта двумя щитами, обеспечивающими в своих сочленениях условия взрывобезопасности.

Вентиляция электродвигателя осуществляется следующим образом: воздух из окружающей среды засасывается в машину реверсивным вентилятором диагонального типа и нагнетается в кольцевую щель, образованную цилиндром станины и наружным кожухом. После прохождения над поверхностью переднего цилиндра воздух разделяется на два потока, один из которых проходит через отверстия, выштампованные в жестах статора, а другой — над спинкой

статора. На участке заднего цилиндра потоки соединяются и выходят в окружающую среду. Как видно из чертежа рис. 10, в осевом направлении продуваемая часть машины имеет три участка, резко различающиеся между собой, а именно: передний цилиндр, пакет железа статора и задний цилиндр. Эти участки закрыты соответственно тремя частями кожуха. Осевая симметрия переднего цилиндра нарушена выводной трубой кабельной муфты. Эта труба закрывает часть поверхности пакета статора от воздушного потока. Кожух в передней части имеет вырез для выводной трубы; образующиеся в этом месте щели приводят к бесполезной трате части напора, создаваемого вентилятором.

Пакет железа статора имеет 54 отверстия по окружности, из которых 5 закрыты от прохождения воздуха крепёжными шпильками. Щель между

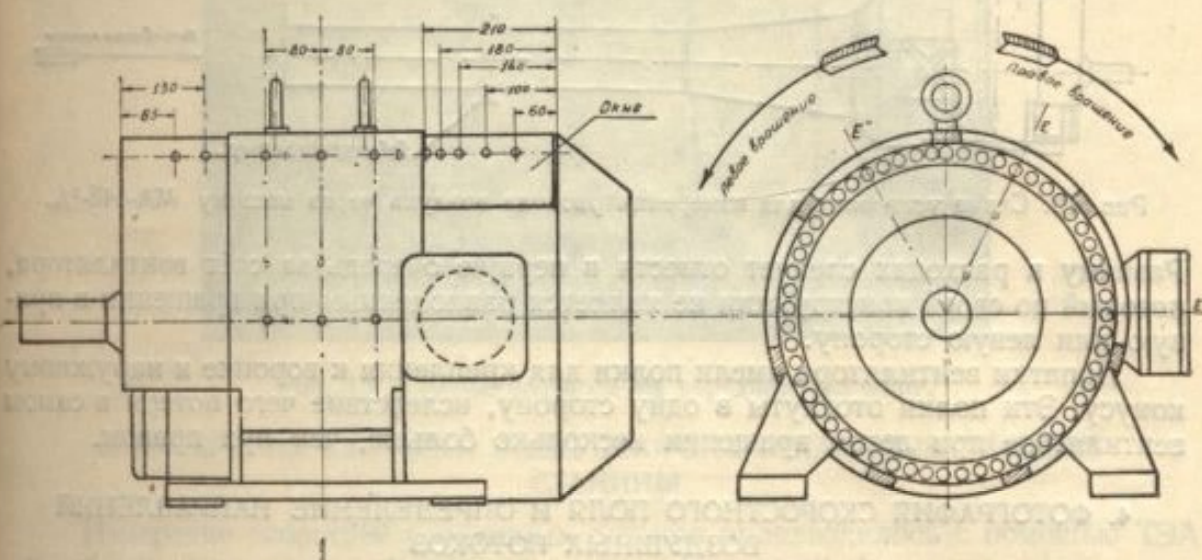


Рис. 11. Разметка мест измерения скорости.

кожухом и пакетом статора по окружности разделена планками на 7 участков, из которых 2 в нижней части на 80% закрыты непродуваемыми укосинами лап.

Таким образом из всей кольцевой щели между пакетом статора и наружным кожухом только 70% свободно для обдува воздухом.

Средняя часть кожуха охватывает поверхность машины от транспортных колец до опорных лап, оставляя нижнюю часть машины открытой. Кожух заднего цилиндра охватывает только 60% периметра.

В радиальном направлении только средняя часть машины (пакет статора) имеет два различных участка, а именно: каналы в пакете статора и щель между пакетом и передней частью кожуха.

На основании вышеизложенного было принято решение изучить скоростные воздушные поля на следующих участках:

- 1) участок переднего цилиндра;
- 2) участок заднего цилиндра;
- 3) кольцевая щель между пакетом статора и кожухом;
- 4) в отверстиях пакета статора по всей окружности;
- 5) по длине канала в пакете статора.

Разметка мест измерений приведена на рис. 11. В указанных местах в кожухе были просверлены отверстия и нарезана резьба $M 10 \times 1$ для закрепления ниппеля ТЭА.

3. ИЗМЕРЕНИЕ ОБЩЕГО РАСХОДА ВОЗДУХА

Измерение расхода воздуха было проведено с помощью всасывающего трубопровода по методике, изложенной в первой части.

С этой целью изготовили из листовой стали воздухопровод, состоящий из двух частей. Одна — представляет собой усечённый конус со следующими размерами $d = 350$, $d = 200$, $h = 550$. Другая — цилиндрическую трубу $d = 200$ мм и $l = 1350$ мм. Схема установки приведена на рис. 12. Измерения скоростного поля производились в сечениях АА в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Результаты измерений, подробно изложенные в техотчёте НИСа, следующие: при правом вращении $v = 14$ м³/минуту, а при левом 13,5 м³/минуту.

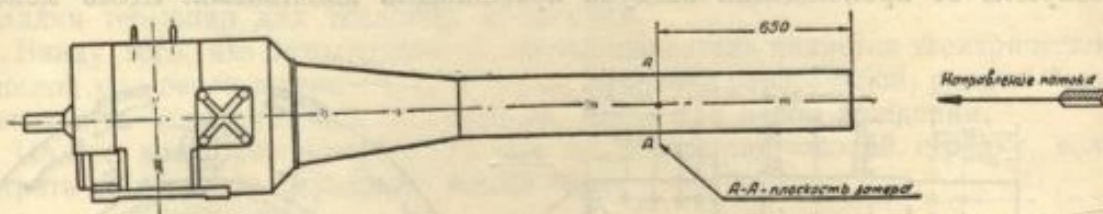


Рис. 12. Схема установки для измерения расхода воздуха через машину МА-145.1/8.

Разницу в расходах следует отнести в первую очередь за счёт вентилятора, который по своей конструкции не является равноценным при вращении в правую или левую сторону.

Лопатки вентилятора имели полки для крепления к воронке и наружному конусу. Эти полки отогнуты в одну сторону, вследствие чего потери в самом вентиляторе при левом вращении несколько больше, чем при правом.

4. ФОТОГРАФИЯ СКОРОСТНОГО ПОЛЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЙ ВОЗДУШНЫХ ПОТОКОВ

При предварительном определении направлений потока с помощью шелковинки установлено, что направление воздушного потока сильно отличается от осевого вдоль машины. При этом замечено, что степень такого отклонения различна на разных участках. Особенно сильное отклонение от осевого направления имелось на участке переднего цилиндра.

Для изучения скоростного поля в передней части кожуха было вырезано прямоугольное окно (рис. 11). Цилиндр на участке окна был выкрашен белилами и на нём с помощью картонных шайб и клея укреплены шпильки (36 шт.). На шпильки были надеты станиолевые флажки, свободно вращающиеся на шпильках. После этого окно закрыли плексигластом, выгнутым по форме кожуха. При вращении электродвигателя флажки свободно устанавливаются по потоку. Фотография скоростного поля на участке переднего цилиндра приведена на рис. 13.

С помощью флажков, укрепленных на проволоке, были определены направления потоков во всех точках измерений скорости, включая и каналы пакета статора.

На рис. 14 приведена развёртка скоростного воздушного поля машины.

Из рис. 13 и 14 видно, что воздушный поток при входе на передний цилиндр сильно закручен. Не встречая на своём пути никаких препятствий, за исключением выводной трубки, поток по длине цилиндра постепенно разворачивается в осевом направлении (поворот от 80 до 50° по отношению к оси мотора); у входа в каналы пакета статора происходит резкий поворот от 50 до 0°; при входе потока в щель между кожухом и железом статора происходит менее резкий поворот от 50 до 30° и далее, до самого выхода из кожуха происходит плавный поворот от 30 до 10°.

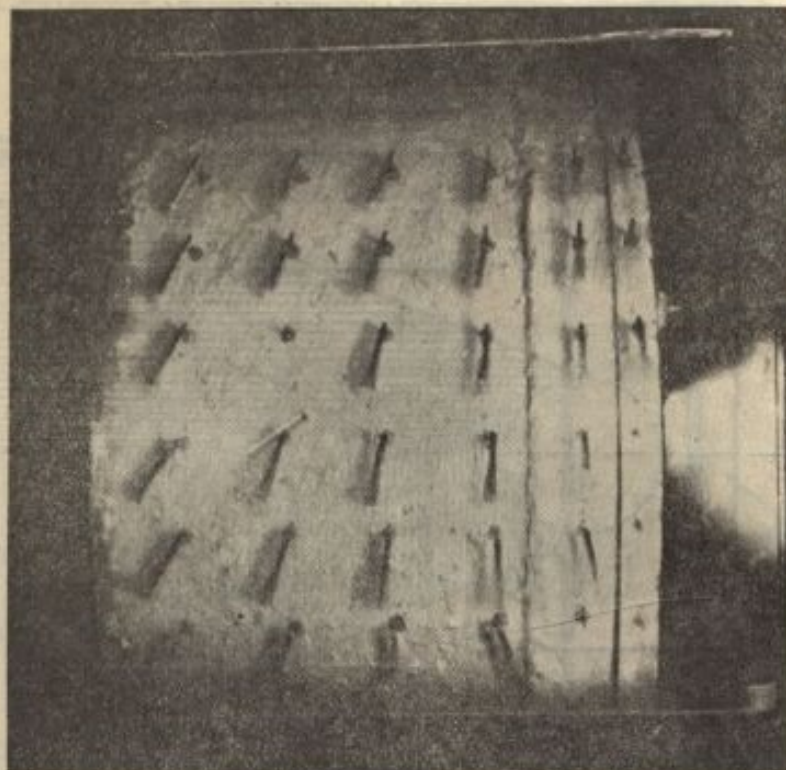


Рис. 13. Скоростное поле на переднем цилиндре.

5. ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ ВОЗДУШНОГО ПОТОКА У ПОВЕРХНОСТИ СТАНИНЫ

Измерение скоростей воздушных потоков производилось с помощью ТЭА и соблюдением всех необходимых технических условий.

В области переднего цилиндра измерения в каждом отверстии производились в пяти точках, через 10 мм по высоте от поверхности цилиндра кожуха; на участке заднего цилиндра — в девяти точках, через 5 мм по высоте; в средней части машины, в зазоре между кожухом и пакетом статора — в трёх точках. Результаты измерений показаны на рис. 15. Следует иметь в виду, что на чертеже отложены абсолютные по величине значения скорости, а не их проекции на плоскость, проходящую через ось машины.

Затем были измерены скорости на выходе во всех каналах пакета. Полярная диаграмма скоростей приведена на рис. 16.

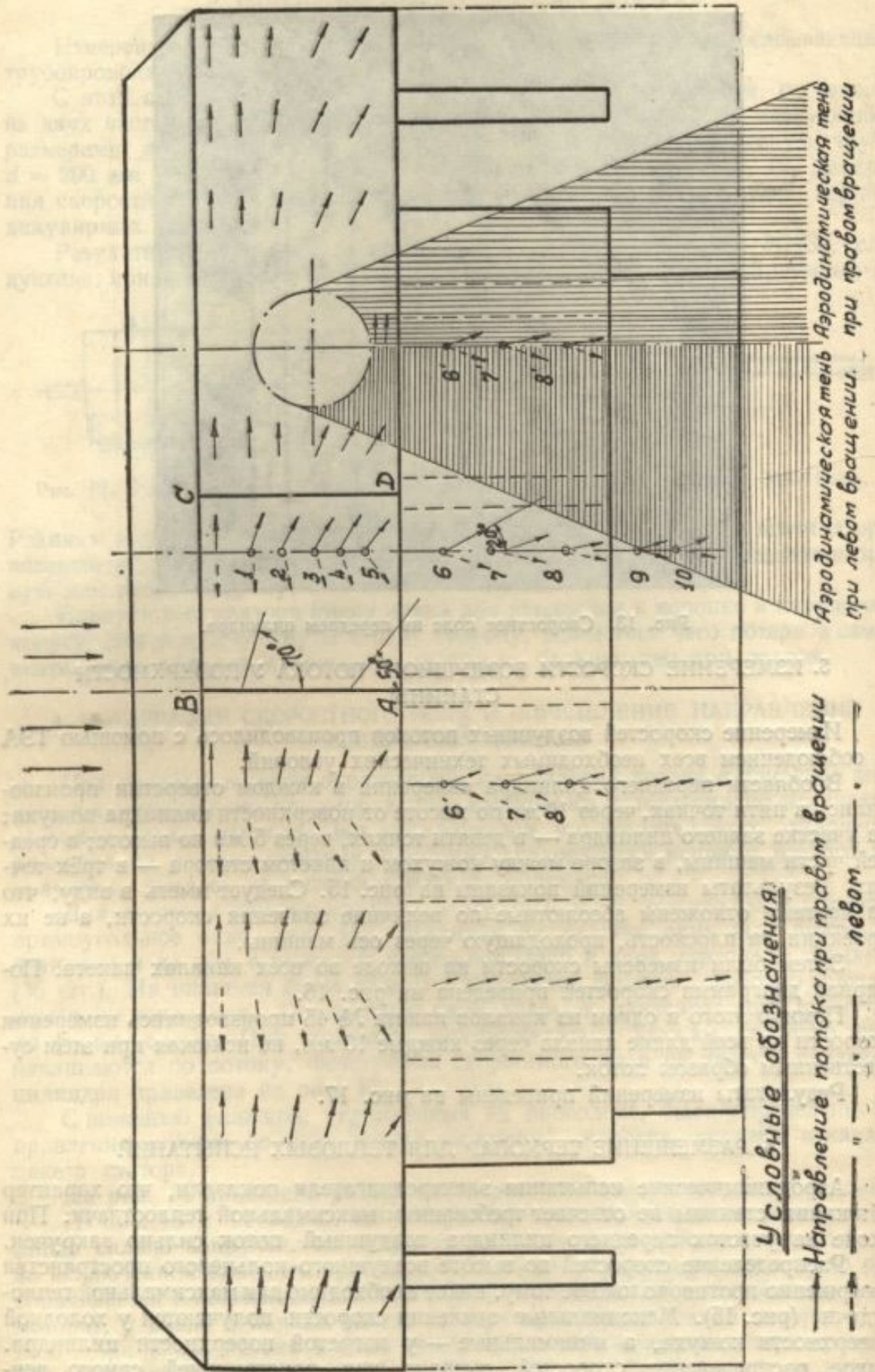
Помимо этого в одном из каналов пакета № 45 производились измерения скорости по всей длине канала через каждые 10 мм, не искажая при этом существенным образом поток.

Результаты измерений приведены на рис. 17.

6. РАЗМЕЩЕНИЕ ТЕРМОПАР ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

Аэродинамические испытания электродвигателя показали, что характер обтекания станины не отвечает требованиям максимальной теплоотдачи. При входе на участок переднего цилиндра воздушный поток сильно закручен.

Распределение скоростей по высоте воздушного кольцевого пространства совершенно противоположное тому, какое необходимо для максимальной теплоотдачи (рис. 15). Максимальные значения скорости получаются у холодной поверхности кожуха, а минимальные — у нагретой поверхности цилиндра. Такое распределение скоростей вызвано как конструкцией самого вентилятора, так и наличием ступеньки в виде кольца для крепления щитов.



Условные обозначения:

— Направление потока при правом вращении

--- левом

Аэродинамическая тень Аэродинамическая тень при левом вращении. при правом вращении

Рис. 14. Развертка скоростного поля МА-145-1/а

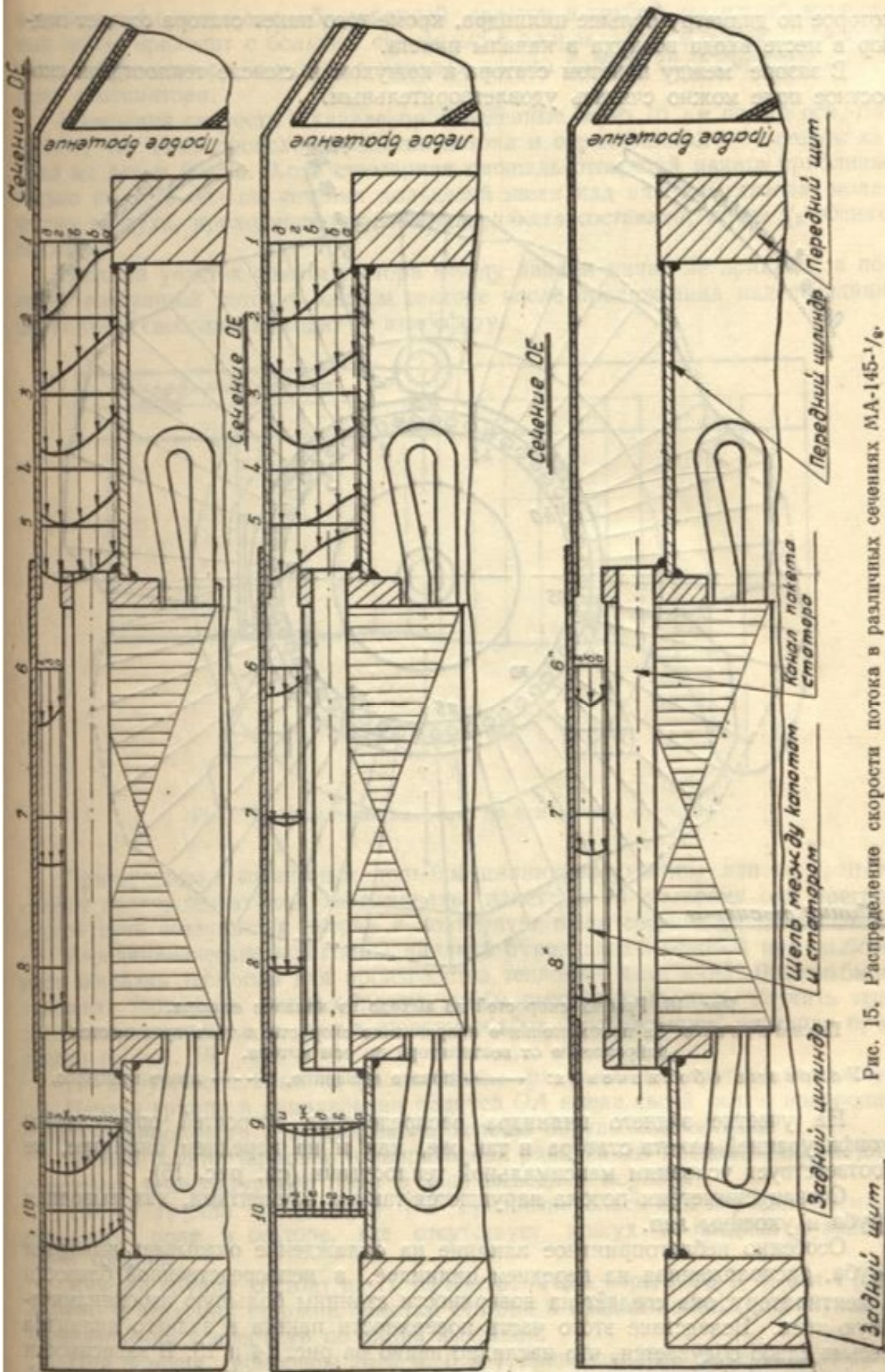


Рис. 15. Распределение скорости потока в различных сечениях МА-145-1/8.

которое по диаметру больше цилиндра, кроме того пакет статора создает подпор в месте входа воздуха в каналы пакета.

В зазоре между пакетом статора и кожухом в смысле теплоотдачи скоростное поле можно считать удовлетворительным.

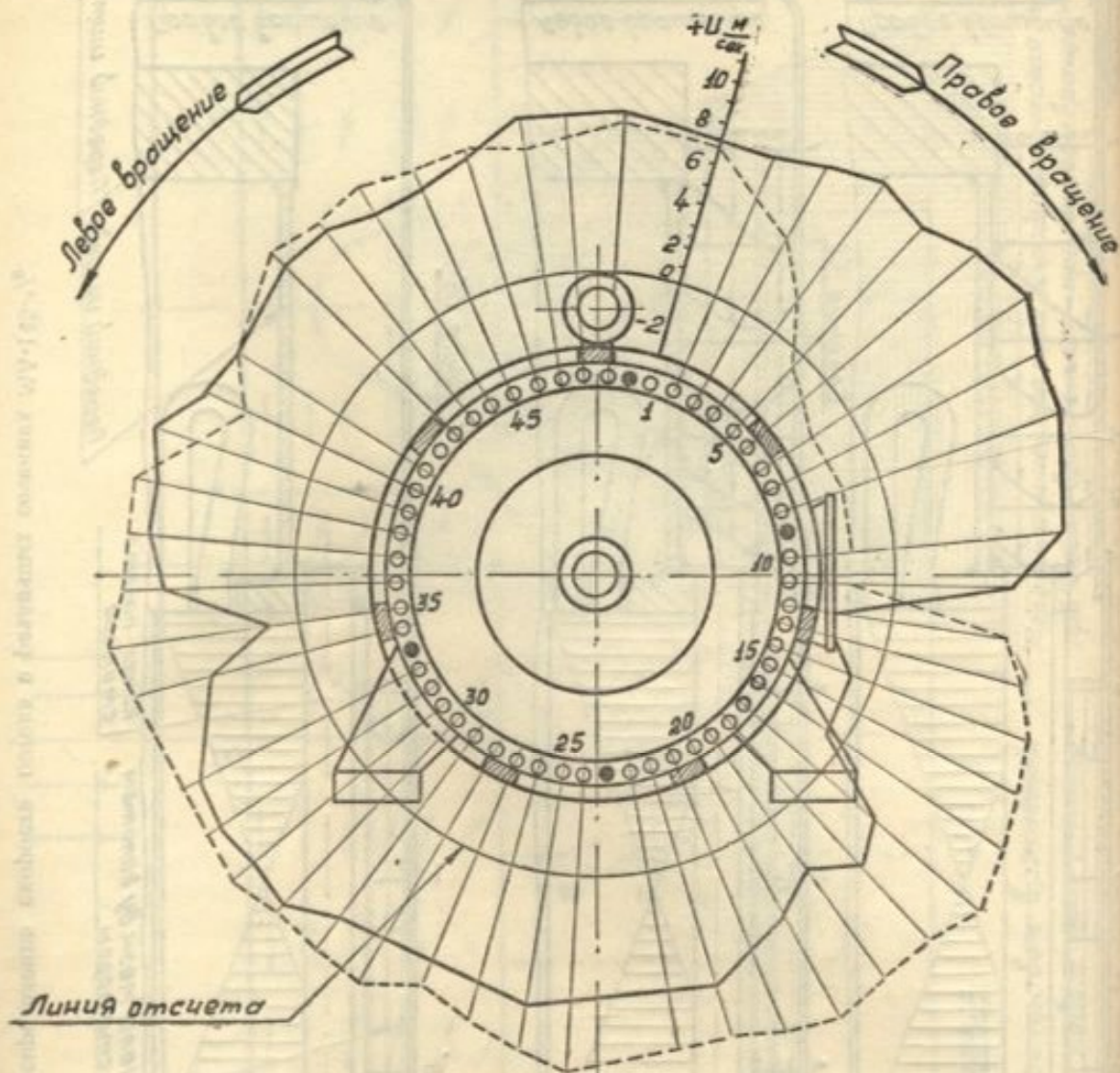


Рис. 16. График скоростей на выходе из каналов статора.

Примечание: За положительное направление скорости потока принимается направление от вентилятора по оси мотора.

Условные обозначения: — правое вращение, - - - - левое вращение.

На участке заднего цилиндра распределение скоростей определяется конфигурацией пакета статора и так же, как и на переднем цилиндре, не соответствует условиям максимальной теплоотдачи (см. рис. 15).

Осевая симметрия потока нарушается такими элементами, как выводная труба и укосины лап.

Особенно неблагоприятное влияние на охлаждение оказывает выводная труба, расположенная на переднем цилиндре, в непосредственной близости к вентилятору; она создаёт на поверхности станины большую аэродинамическую тень. Вследствие этого часть поверхности пакета и заднего цилиндра весьма слабо обдувается, что наглядно видно на рис. 14 и 15. В зависимости от направления вращения тень перемещается то вправо, то влево от выводной трубы. Помимо этого, вследствие близкого расположения выводной трубы

и пакета статора в щели, образованной пакетом и трубой, поджатый воздушный поток проходит с большой скоростью в направлении, перпендикулярном оси каналов статора, вызывая в каналах пакета потоки, направленные в сторону вентилятора.

Измерения скорости в канале, произведенные через 10 мм по его оси, показали, что здесь происходит сжатие потока и отрыв такового от стенок канала на длине 50 мм. Хотя суммарная площадь отверстий пакета приблизительно на 20% больше сечения кольцевой щели над пакетом статора, количество воздуха, проходящее через каналы пакета составляет менее $\frac{1}{3}$ общего расхода.

Нижний участок пакета статора между лапами ничем не прикрыт, а поэтому воздушный поток в данном секторе после прохождения над передним цилиндром свободно выходит в атмосферу.

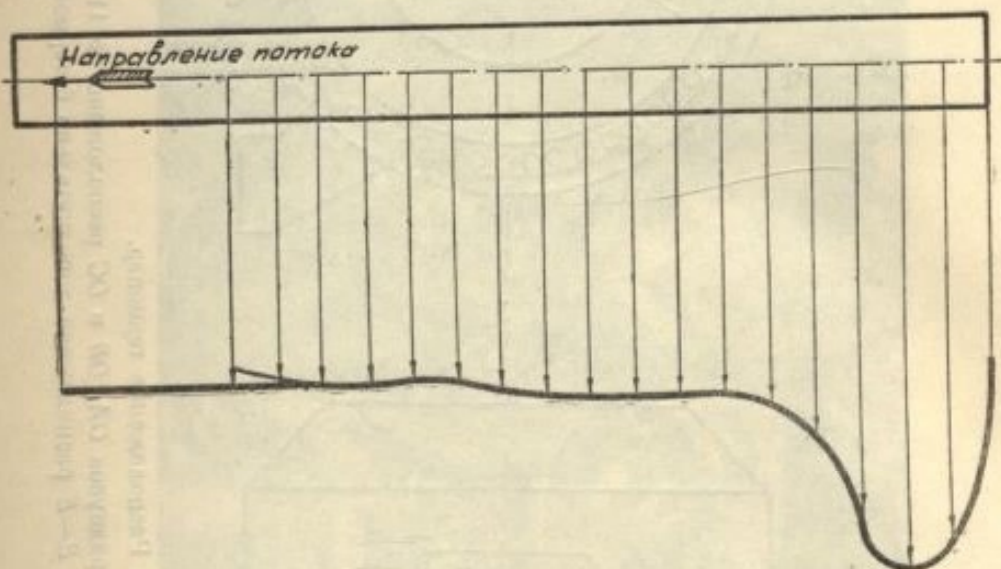


Рис. 17. Изменение скорости по оси канала статора.

Приваренные к нажимным кольцам цилиндров укосины лап не препятствуют прохождению воздуха в каналы пакета, в то же время они преграждают путь воздушному потоку в кольцевую щель средней части машины.

Аэродинамические испытания явились руководящей основой при выборе мест закладки термопар для производства тепловых испытаний. Решено было заложить термопары таким образом, чтобы иметь возможность изучить тепловое поле машины в возможно полном объеме. Расположение термопар приведено на рис. 18.

По окружности машины расположены три основных группы термопар.

Первая группа в направлении радиуса OA имела своей целью измерение температурного поля в сравнительно хорошо обдуваемом секторе.

Вторая группа термопар в направлении радиуса OB предназначалась для измерения температурного поля в зоне выводной коробки.

Третья группа по радиусу OB предназначалась для изучения температурного поля в секторе, где отсутствует кожух в средней и задней части машины.

Каждая группа состоит из 11 термопар. Термопары №№ 1, 2, 3 и 4 размещены в изоляции стержня обмотки статора и предназначены для изучения распределения температур по длине изоляции.

При помощи термопар №№ 5, 6 и 7 производились измерения температуры по толщине пакета железа.

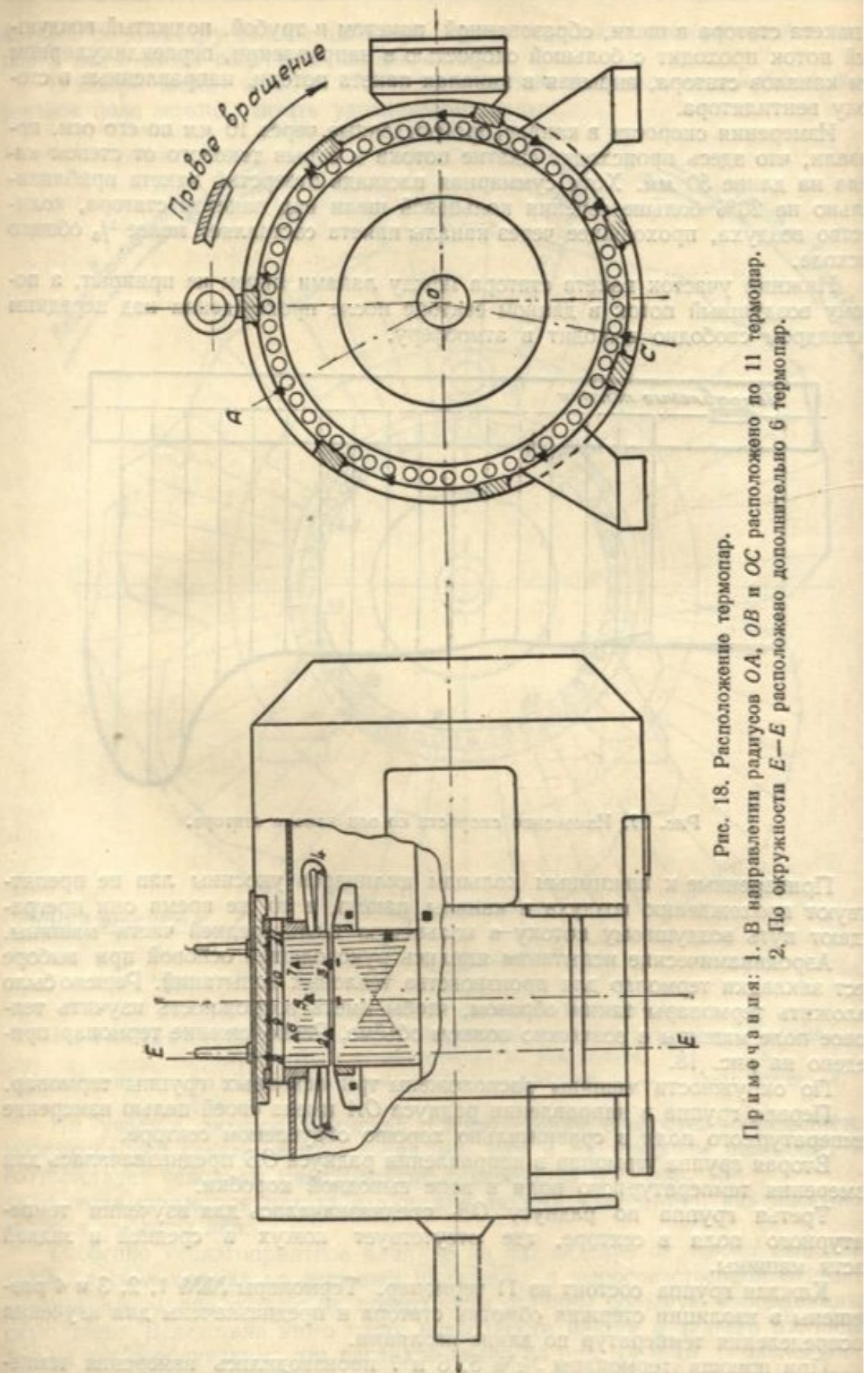


Рис. 18. Расположение термопар.

Примечания: 1. В направлении радиусов *OA*, *OB* и *OC* расположено по 11 термопар.
2. По окружности *E—E* расположено дополнительно 6 термопар.

Термопары №№ 8, 9, 10 и 11 измеряли температуру поверхности пакета по длине машины.

В области аэродинамических теней в пазу под клином на изоляции расположены были группы термопар №№ 34—37.

Помимо этого равномерно, по окружности были размещены термопары №№ 38—43 для изучения температурного поля пакета. Термопары №№ 44 и 45 предназначены для измерения температуры цилиндров.



Рис. 19. Установка термопар в роторе.

В роторе термопары расположены следующим образом: №№ 1 и 4 закреплены в крыльях со стороны переднего и заднего цилиндров. №№ 2 и 3 размещены у поверхности пакета железа. № 5 закреплена в железе между отверстиями пакета. № 6 предназначена для измерения температуры вала.

Общий вид машины с термопарами и контактными кольцами роторных термопар приведен на рис. 19.

Для измерения средней температуры щитов применялись спиртовые термометры. Стержень его во время опыта находился в углублении, высверленном в теле щита и заполненном маслом.

Кроме измерения температуры входящего и выходящего воздуха также измерены температуры воздуха внутри машин в области переднего и заднего цилиндров. Для этой цели в заднем щите и переднем цилиндре были просверлены отверстия $\varnothing 10$ мм, в которых и закреплялись термометры, обмотанные в месте прохода через отверстие изоляционной лентой.

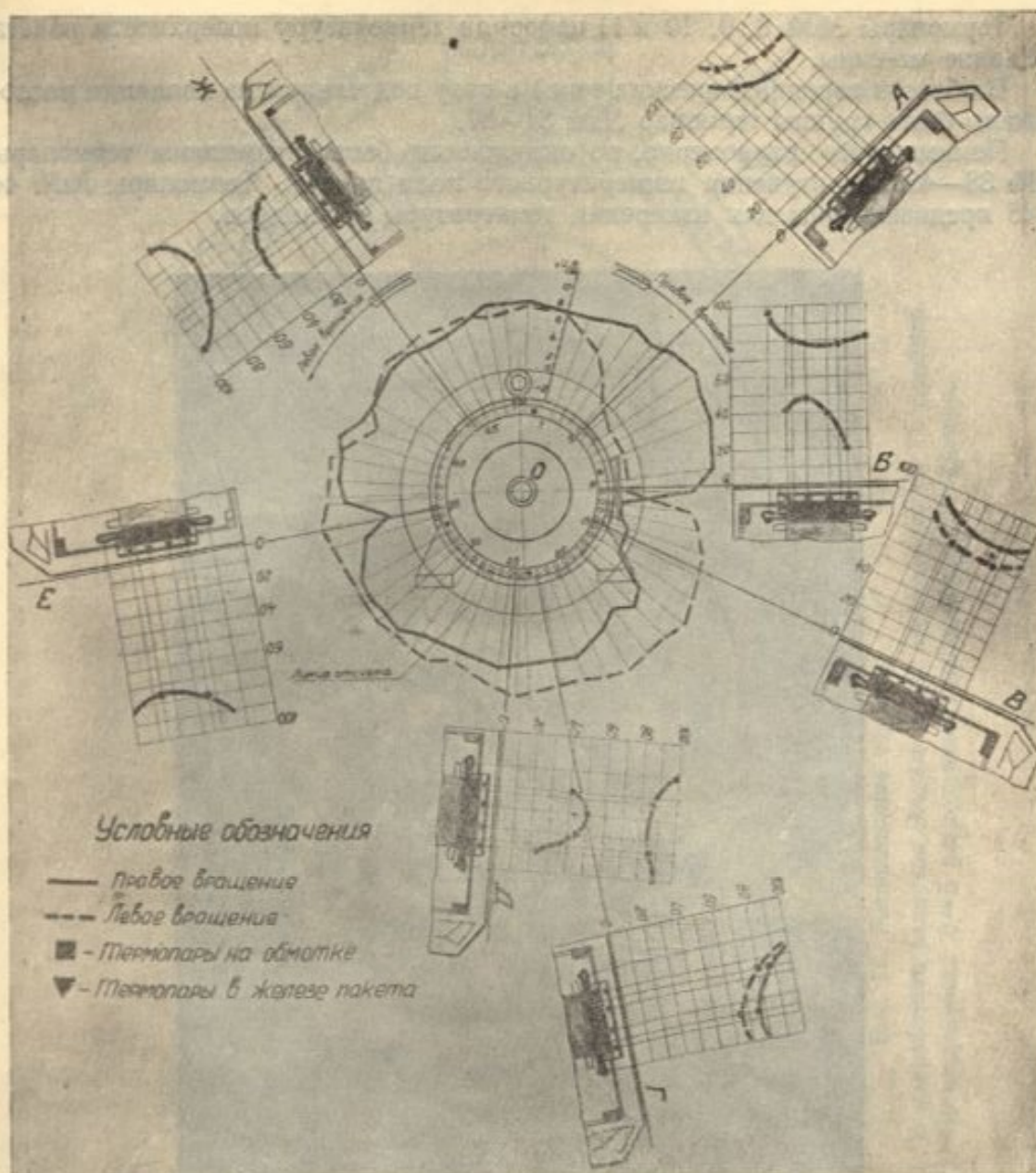


Рис. 20. Результаты аэродинамических и тепловых испытаний машины МА-145-1/8.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ НА СТАТОРЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

В результате данных исследований установлены следующие основные особенности скоростного и теплового полей для статора электродвигателей серии МА-140.

1) Воздушный поток, поступающий в машину, сильно закручен реверсивным вентилятором. Вследствие больших гидравлических потерь количество воздуха, проходящее через отверстие в пакете статора, составляет треть общего количества воздуха, проходящего через машину.

2) Охлаждение обмотки статора отличается большой неравномерностью как по длине машины, так и по различным радиальным направлениям. Это в значительной степени вызвано неудачным расположением на переднем цилиндре выводной коробки, создающей аэродинамическую тень на большом участке обдуваемой поверхности и вызывающей обратные воздушные потоки

в каналах статора. Например, местный перегрев железа в зубцовой зоне на плохо обдуваемых участках машины значительно превосходит пределы, установленные ГОСТ 183-41 и требует снижения мощности машины, в то же время средний перегрев обмотки статора, определённый по сопротивлению, укладывается в нормы ГОСТа с большим запасом $12 \div 15^\circ\text{C}$.

3) Часть тепла с головок обмотки статора и значительная часть тепловых потерь ротора передаётся на щиты посредством воздуха, приведённого во вращение лопатками ротора.

Результаты аэродинамических и тепловых исследований статора машины МА-145-1/8 представлены на рис. 20.

8. ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ РОТОРА

Основная трудность при измерении температур во вращающихся частях состоит в локализации ЭДС (электродвижущая сила) промежуточных термопар. В электрической цепи, состоящей из любого числа металлических

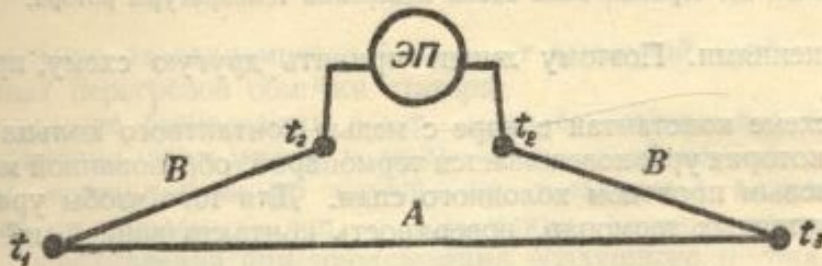


Рис. 21. Схема включения термопары.

проводников A, B, C, N в том случае, когда температуры мест их соединения t_1, t_2, \dots, t_n не одинаковы, возникает термоэлектродвижущая сила, величина которой зависит от значения данных температур. В цепи, состоящей из двух проводников, ЭДС является функцией температур в местах соединений и если

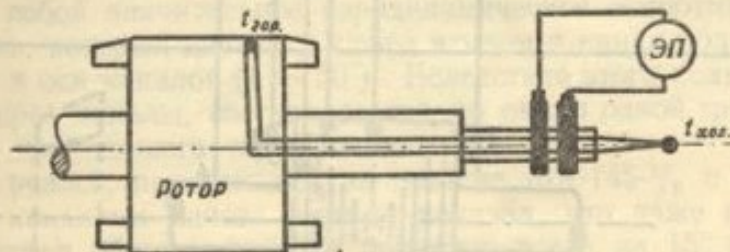


Рис. 22. Пробная схема измерения температуры ротора.

температура одного конца спая будет постоянной, то ЭДС цепи будет функцией температур так называемого горячего спая. Для присоединения прибора разрывается один из термоэлектродов, тогда у термопары оказывается 4 спая. На рис. 21 видны: один холодный t_0 , один горячий t_1 и два нейтральных t_2 . В таком виде схема и применяется при измерении температур с помощью термопар. Важным и необходимым условием при тарировке является поддержание постоянной температуры холодного спая. При измерении достаточно только знать температуру холодного спая, чтобы потом, вводя поправки, производить отсчёт. При измерении температур во вращающихся частях цепь термопары разрывается в нескольких местах и для возможности отсчёта необходимо разрывать либо только один проводник, либо вводить в цепь термопары проводники, имеющие одинаковую температуру на концах его, так как только тогда термоэлектродвижущая сила не изменится. При измерении первым способом схема будет иметь вид, представленный на рис. 22.

В этом случае температура холодного спая будет близка к температуре окружающего воздуха и отсчёт можно производить по тарировочному графику, вводя соответствующие поправки. Однако точность отсчёта при этом будет недостаточна. Недостаток этот можно устранить, поместив вращающийся холодный спай в масляную ванну и принимая температуру масла, измеренную термометром, за температуру спая. Но это связано с некоторыми конструктив-

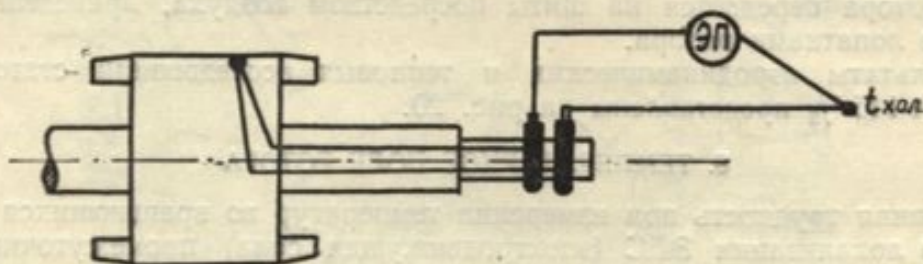


Рис. 23. Применяемая схема измерения температуры ротора.

ными усложнениями. Поэтому лучше принять другую схему, приведённую на рис. 23.

В этой схеме константан в паре с медью контактного кольца даёт некоторую ЭДС, которая уравнивается термопарой, образованной медью щётки и константановым проводом холодного спая. Для того чтобы уравнять ЭДС этих промежуточных термопар, поверхность контакта данной щётки увели-

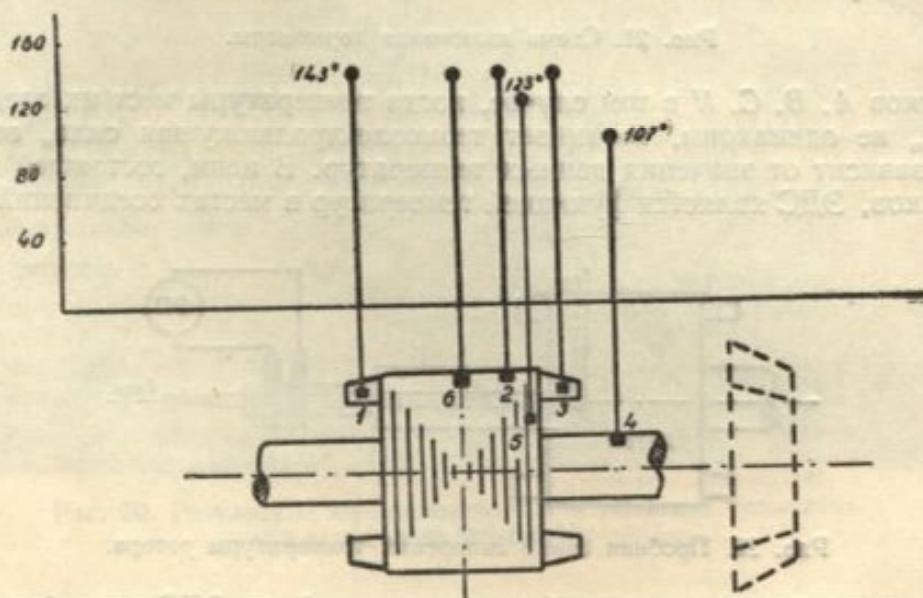


Рис. 24. Расположение термопар в роторе.

чена вдвое по сравнению с остальными, а кольцо поставлено в поток воздуха, одинаково охлаждающий как щётку, так и кольцо. Спай помещён в неподвижную масляную ванну и температура его измеряется термометром. Для измерения температурного поля ротора машины МА-145-1/8 было заложено 6 термопар в местах, показанных на рис. 24. Здесь термопары №№ 1 и 3 предназначены для измерения температур лопаток, №№ 2 и 6 — для измерения температуры железа ротора на поверхности, № 4 — для измерения температуры вала, а № 5 — для измерения температуры железа ротора между его каналами. Вал ротора был просверлен со стороны вентилятора сверлом диаметром в 15 мм до его пакета. В него был впрессован полый валик с контактными кольцами. Нагрузка на щётки осуществлялась с помощью рычагов из пле-

кисласса, вращающихся на шарикоподшипниках, ось которых укреплена на коробке, жёстко соединенной с капотом машины. Общий вид установки приведён на рис. 19.

Результаты испытаний показывают, что перегрев ротора в машине достигает значительной величины и возможно является главной причиной местного перегрева лобовых частей обмотки ротора.

9. РЕКОМЕНДАЦИИ ИНСТИТУТА ПО УПРОЩЕНИЮ КОНСТРУКЦИИ И УЛУЧШЕНИЮ ОХЛАЖДЕНИЯ

Аэродинамические и тепловые испытания электродвигателя МА-145-1/8 показали, что его охлаждение отличается большой неравномерностью как в осевом направлении, так и по окружности. Главным источником неравномерности является выводная труба и лапы. Поэтому первым мероприятием по улучшению охлаждения электродвигателя является перенос выводной трубы на задний цилиндр. Это мероприятие должно привести к следующим результатам:

1) устранение аэродинамической тени от выводной трубы и связанных с ней местных перегревов обмотки статора;

2) уменьшение бесполезных потерь напора, создаваемых вентилятором, за счёт устранения щели между кожухом и выводной трубой.

Вторым мероприятием по улучшению охлаждения является создание конструкции «продуваемых» лап, то есть таких, которые оказывали бы минимальное сопротивление при прохождении воздушного потока, а также не создавали затенённых участков. Эти мероприятия, по мнению института, должны не только улучшить качество охлаждения, но также привести к некоторому снижению общего среднего перегрева обмотки статора.

Ещё один важный вывод, сделанный из результатов аэродинамических и тепловых испытаний, состоит в утверждении недостаточной эффективности вентиляционных каналов пакетов статора.

Шереховатые стенки каналов, к тому же малые по диаметру ($d = 20$ мм) представляют собой значительное аэродинамическое сопротивление для воздушного потока, который движется перед входом в канал под большим углом по отношению к оси каналов ($\varphi = 50^\circ$). Вследствие этого количество воздуха, проходящее через каналы, составляет только около одной трети общего расхода воздуха, проходящего через машину.

Тепловой режим, проведенный на машине МА-145-1/8 с заклеенными с обеих сторон каналами пакета статора показал, что даже в этих тяжёлых условиях перегрев обмотки статора поднялся всего на 15° по сравнению с нормальным перегревом. Следует также заметить, что, ввиду малых скоростей воздушного потока в каналах, в эксплуатации они часто засоряются, а поэтому ухудшается охлаждение машины.

На основании изложенного институт считает возможным и полезным мероприятием — устранение каналов в спинке пакета статора без ущерба для эффективности охлаждения. С производственной точки зрения такое мероприятие упрощает конструкцию штампов, увеличивает срок их службы, а также снижает трудоёмкость по изготовлению машины вследствие ликвидации операции по сверловке нажимных колец цилиндров.

10. ПРОВЕРКА ЗАВОДОМ РЕКОМЕНДАЦИЙ ИНСТИТУТА ПО УПРОЩЕНИЮ КОНСТРУКЦИИ И УЛУЧШЕНИЮ ОХЛАЖДЕНИЯ

Рекомендации института, коренным образом ломающие представление о значении и роли вентиляционных каналов, а отсюда и всей конструкции электродвигателя, были проверены в условиях завода на машине того же типа, который испытывался в институте.

Отличие заключалось только в её длине (точнее в длине пакета). Машины второй длины являются более напряжёнными в тепловом отношении, а поэтому предполагалось, что результаты опытов можно без всяких оговорок распространять и на меньшие (по длине пакета) электродвигатели.

Испытанный электродвигатель МА-145- $\frac{2}{8}$ серийного исполнения мощностью в $N=25$ квт при $n=740$ об/мин (синхронных имеет длину пакета железа статора $l=230$ мм, а не $l=180$ мм, как было на машине МА-145- $\frac{1}{8}$).

Результаты испытаний данного электродвигателя показали, что характер охлаждения в основных чертах остался таким же, как и на машине первой длины, а именно:

1) неравномерность охлаждения обмотки статора по длине колебалась в зависимости от места расположения секции в пределах от 12 до 20°C;

2) неравномерность охлаждения по окружности была такого же рода, как и на машине первой длины, то есть в зоне аэродинамической тени перегрев обмотки колебался в пределах 10÷12° в зависимости от направления вращения;

3) наиболее нагретыми участками обмотки являются головки со стороны противоположной вентилятору.

Руководство завода предложило выполнить и испытать машину МА-145- $\frac{2}{8}$ совсем без каналов в статоре.

Исполнение электродвигателя типа МА-145- $\frac{2}{8}$ без каналов в пакете статора представлял для завода чрезвычайно смелый шаг.

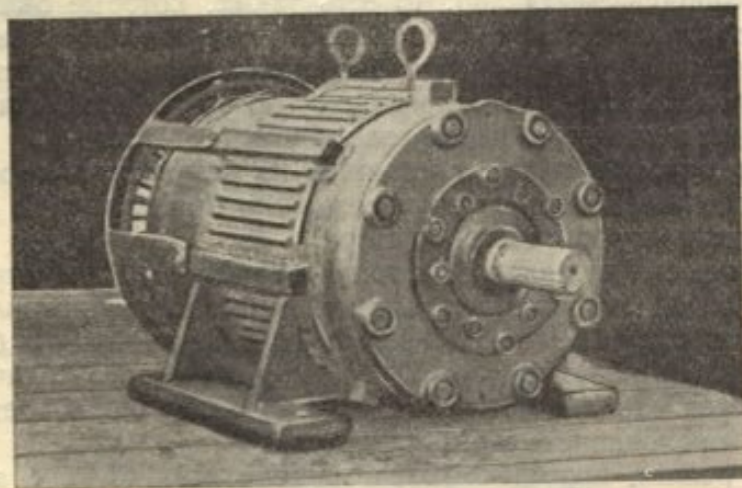


Рис. 25. Электродвигатель с обесеченными жестями статора.

Поверхность пакета статора с каналами для машины МА-145- $\frac{2}{8}$ составляет $F=10\,650$ см². Поверхность каналов $f=7080$ см². Таким образом, при отсутствии каналов поверхность пакета в зоне воздействия воздушного потока уменьшается в три раза. Такое уменьшение поверхности должно было бы привести к резкому увеличению перегрева электродвигателя при неизвестном коэффициенте теплоотдачи.

Поэтому из предосторожности вначале решили построить машину, в которой жести статора были обесечены по радиусу центров отверстий. В этом случае поверхность пакета статора составляет $F_1=4600$ см², то есть 44% по сравнению с поверхностью исходной машины.

Такая машина была построена заводом и испытана. Общий вид электродвигателя со снятым кожухом приведён на рис. 25.

Помимо новой формы пакета на данной машине были изготовлены новые лапы с прямоугольными отверстиями для лучшего охлаждения.

Измерения расходов воздуха, произведенные на этой машине, а также на машине серийного исполнения показали, что производительность венти-

лятора как в первом, так и во втором случае практически одинакова и составляет примерно $16 \text{ м}^3/\text{мин}$. Казалось бы, что при всех прочих равных условиях аэродинамическое сопротивление пакета статора в опытной машине резко уменьшено и должно было бы привести к увеличению расхода воздуха, однако измерения этого не подтвердили.

Влияние на расход воздуха отдельных конструктивных элементов машины было изучено после постановки ряда опытов как на машине серийного исполнения, так и на машине без каналов в пакете статора.

Результаты опытов представлены в таблице.

Расход воздуха в $\text{м}^3/\text{мин}$

№№ п/п	Изменения в машине	МА-145- $\frac{2}{8}$		МА-145- $\frac{2}{8}$	
		серийного исполнения		без каналов в пакете статора	
		правое	левое	правое	левое
1	Машина с полным комплектом деталей	16,3	16,1	15,5	15,85
2	Задняя часть кожуха снята .	16,9	16,8	15,35	15,70
3	Задняя и средняя часть кожуха сняты	16,6	16,8	15,35	15,88
4	Задняя и средняя часть кожуха сняты, направляющий щиток разрезан (см. эскиз рис. 26)	—	—	24,7	24,2

Опыты показали, что наличие или отсутствие кожуха в средней и задней части машины совершенно не сказывается на расходе в ней воздуха.

Основная потеря напора, создаваемого вентилятором, происходит в сетке направляющего щитка, в самом вентиляторе и в направляющем щитке, при входе на участок переднего цилиндра. Этим обстоятельством и можно объяснить отсутствие разницы в расходах воздуха при удалении средней и задней части кожуха.

Тщательные тепловые испытания, проведенные с закладкой 30 термопар, имели своей целью выяснить характер теплового поля машины и влияние на него отдельных конструктивных элементов (в частности нижнего щитка).

Результаты тепловых испытаний представлены на рис. 27.

Тепловые испытания МА-145- $\frac{2}{8}$ с полукруглыми отверстиями в жестях статора дают основание сделать следующие выводы:

1) средний перегрев обмотки статора, измеренный по сопротивлению в опытной машине по существу не отличается от перегрева обмотки машин серийного исполнения;

2) неравномерность охлаждения, вызванная наличием выводной трубы на переднем цилиндре, осталась неизменной;

3) прямоугольные отверстия в укосинах лап снизили местный перегрев на участке лап;



Рис. 26. Направляющий щиток.

4) наиболее нагретой частью обмотки статора являются головки на участке заднего цилиндра;

5) наилучшим образом обмотка статора охлаждается на участке первых 50 мм пакета железа статора, отсчитывая от переднего цилиндра;

6) наиболее нагретой точкой обмотки являются места головок на расстоянии $15 \div 20$ мм от железа пакета.

Используя эти выводы, на заводе был построен электродвигатель без отверстий в пакете статора (рис. 28).

В компаундном штампе были удалены только пуансоны для просечки отверстий. Соответственно отверстия в нажимных кольцах цилиндров также не были просверлены.

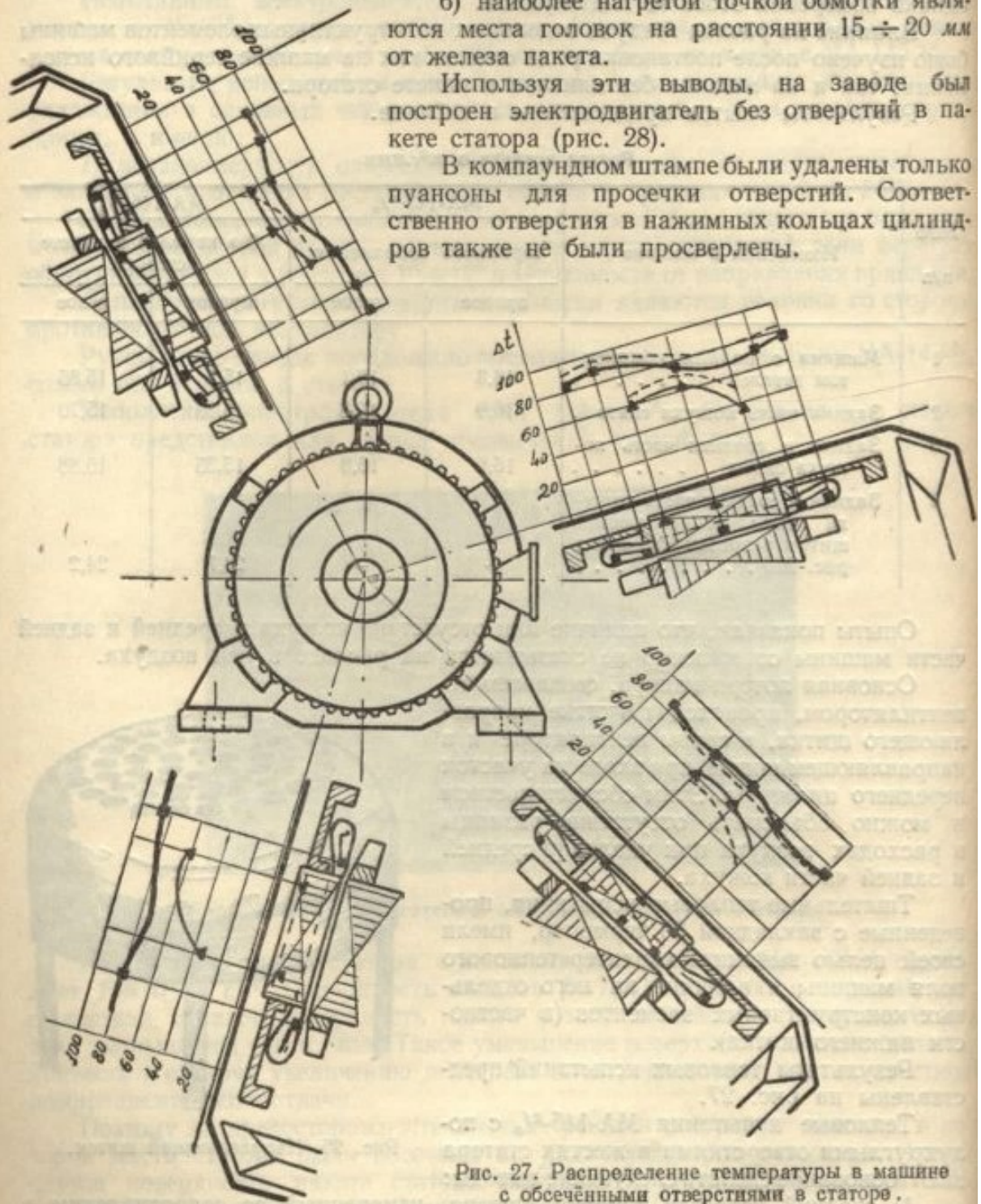


Рис. 27. Распределение температуры в машине с обесчёрнёнными отверстиями в статоре.

В остальном опытный электродвигатель не отличался от серийного исполнения.

В результате таких изменений поверхность пакета статора, обдуваемая воздухом, уменьшилась на 66,5%, а сечение воздухопроводов на участке пакета уменьшилось на 8%.

Тепловые испытания показали, что обмотка статора электродвигателя, измеренная по сопротивлению, перегревается в длительном режиме на 10°C больше, чем у машины серийного исполнения.

Материалы дополнительных испытаний опытных машин, проверенных заводом, дали основания сделать выводы, что заключение института в отношении недостатков системы охлаждения полностью подтвердилось.

Предложение института отказаться от устройства вентиляционных отверстий в статоре целесообразно, поскольку эффективность охлаждения, достигнутая за счёт уменьшения эффективной толщины спинки железа статора

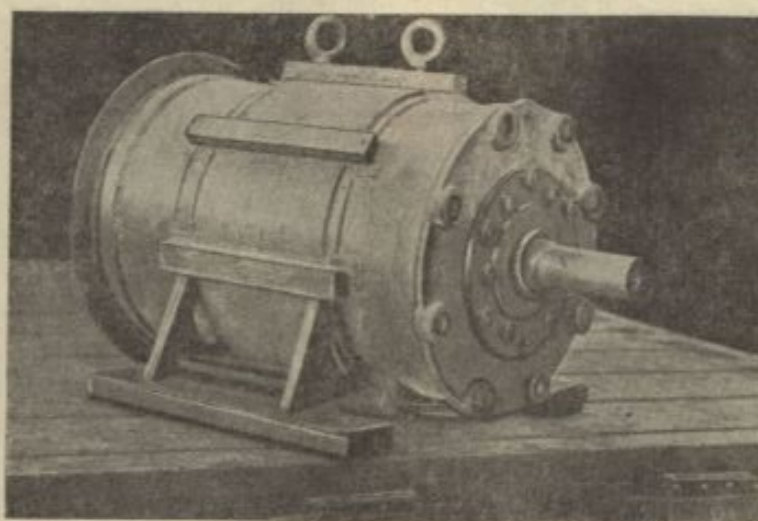


Рис. 28. Электродвигатель без каналов в статоре.

и расположения отверстий в железе пакета не компенсируют ухудшения энергетических показателей, получаемых за счёт снижения диаметров расточек.

Уменьшение обдуваемой поверхности пакета может быть компенсировано увеличением интенсивности обдува и ликвидацией неравномерности системы охлаждения.

Первым электродвигателем, на котором осуществлены все рекомендации института, был вертикальный двухскоростной электродвигатель для привода центрифуг. Попытки построить машину с отверстиями в пакете статора кончились неудачей, так как разместить две обмотки в статоре было довольно трудно и в длительном режиме электродвигатель перегревался выше норм, предусмотренных ГОСТ 183-41.

Новый электродвигатель, общий вид которого без кожуха представлен на рис. 29, не имел круглых отверстий в пакете статора. Пакет железа, зажатый между двумя цилиндрами, скреплён при помощи 8 планок, входящих в его углубление. Наружный неразъёмный кожух поддерживается бонками концентрично с поверхностью машины. Отличительной чертой данного электродвигателя является новая система вентиляции, получившая на заводе название винтовой.

Сущность её заключается в том, что воздух, поступающий в машину из вентилятора, сильно закручен и, не встречая на своём пути продольных планок, преграждающих его поток, омывает корпус машины по винтовой линии переменного шага. При таком способе обдува наилучшим образом используется скоростной напор вентилятора, так как скорость воздуха относительно нагретой поверхности в этом случае получается максимальной.

Увеличившаяся на 25 мм толщина спинки железа позволила не только свободно разметить две обмотки, но и увеличить расточку, что значительно улучшило технико-экономические показатели машины.

Проведенные тепловые испытания показали, что электродвигатель не только удовлетворяет нормам ГОСТ 183-41, но по теплосъему с единицы длины пакета превосходит аналогичный электродвигатель с отверстиями в пакете.

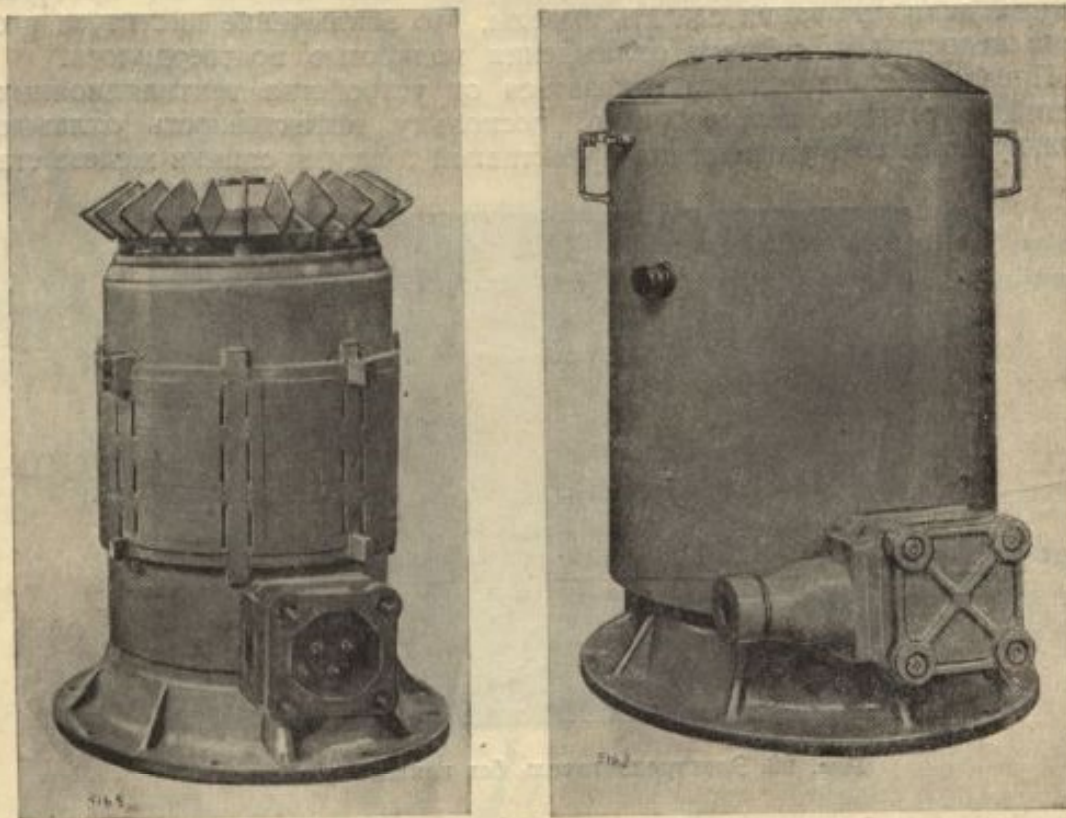


Рис. 29. Электродвигатель для центрифуги.

Таким образом, опыт проектирования электродвигателя с использованием всех рекомендаций института показал всю жизненность и целесообразность их.

За создание электродвигателя для привода центрифуг авторы проекта были премированы Центральным советом ВНИТОЭ.

III. Новая конструкция взрывобезопасного электродвигателя типа МА-36

1. КОНСТРУКТИВНЫЕ НЕДОСТАТКИ СЕРИИ МА-140 И УСТРАНЕНИЕ ИХ

Как известно, наружный диаметр жести определяет габарит электрической машины и строго обусловлен ГОСТом.

Использование спинки статора (ранее не использовавшийся из-за отверстий) дало возможность увеличить диаметр расточки на величину, ранее занимаемую отверстиями (40—45 мм) и тем самым либо увеличить мощность электродвигателя, либо её коэффициент полезного действия.

Поскольку это мероприятие требовало изготовления новых штампов и новых цилиндров, то руководством завода было принято решение коренным образом модернизировать конструкцию с внесением усовершенствований на основании накопившегося производственного и эксплуатационного опыта.

Помимо дефектов системы охлаждения, перечисленных в предыдущих разделах, основными конструктивными недостатками серии МА-140 были следующие:

1) недостаточная жёсткость корпуса, обусловленная креплением цилиндров только 7 — планками и 5 — шпильками. При транспортировке и ударе цилиндры смещались друг относительно друга, что влекло за собой смещение оси ротора и затиры.

2) Кожух электродвигателя, состоящий из двух частей, изготовленный из трёхмиллиметровой стали, служит слабой защитой машины от случайных ударов. Щиток вентилятора, не имея жёсткой базы для крепления, часто смещается, что и приводит к повреждению вентилятора.

3) Наружные конструктивные элементы (лапы, выводные устройства, транспортные ушки) не обладают достаточной прочностью и часто повреждаются при транспортировке «волоком».

4) Фетровые уплотнения и корпуса подшипников не отвечали современному состоянию машиностроения в части надёжности подшипниковых узлов.

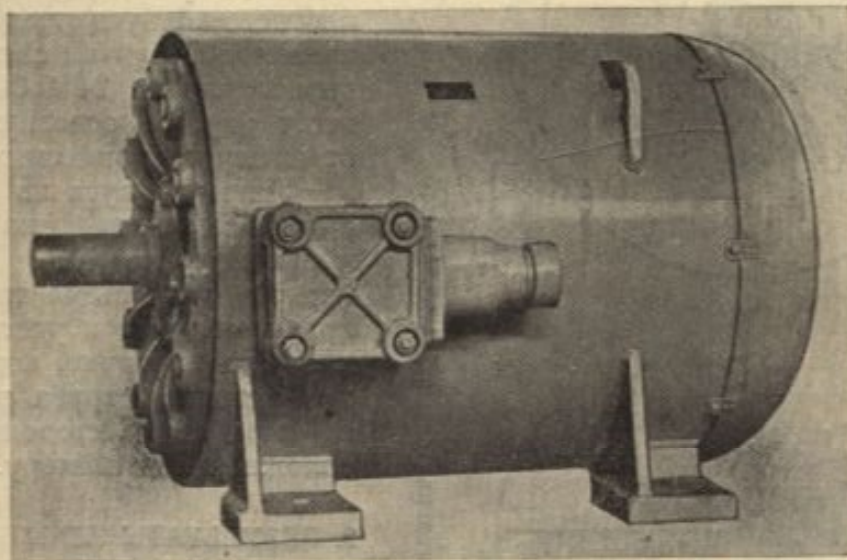


Рис. 30. Электродвигатель типа МА-36^{72/4}.

Энергетические показатели серии МА-140 (кпд, характеристика моментов, кратности пусковых токов) нуждались в некотором улучшении.

Взрывобезопасным электродвигателем, на котором были осуществлены все рекомендации института и воплощены усовершенствования завода, явилась машина МА-36-^{72/4}, мощностью $N=145 \text{ квт}$ при $n=1500 \text{ об/мин}$.

Общий вид машины, экспонированной заводом на областной выставке в 1950 году, представлен на рис. 30.

Конструктивная схема электродвигателя приведена на рис. 31.

Помимо винтовой системы вентиляции на этой модели был форсирован тепловой поток через щиты машины.

Особенностью конструкции щитов является конусообразная форма с сильно развитой как внутренней, так и наружной поверхностью. Внутренняя поверхность щитов хорошо омывается воздухом, приведённым во вращение лопатками ротора. Это способствует увеличению теплоотдачи от ротора и головок обмотки статора.

Кроме того, передний щит хорошо охлаждается внутренней струей, проходящей через диск вентилятора.

Применение щитов, вогнутых внутрь машины, помимо уменьшения габаритов машины привело к сокращению расстояния между опорами вала ротора. При заданных параметрах машины это сильно уменьшает деформации вала, что является немаловажным достоинством для взрывобезопасного синхронного электродвигателя, имеющего малый и к тому же неконтролируемый

зазор. На новом электродвигателе установлен также реверсивный вентилятор диагонального типа, отлитый из алюминиевого сплава. Большое внимание

было обращено на создание жёсткого и надёжного корпуса. Станина представляет собой двойной, прочно-плотный корпус. Внутренний плотный корпус выполняет условия взрывобезопасности. Он состоит из двух цилиндров и пакета жёстких, скреплённых между собой планками.

Наружный прочный корпус, изготовленный из 8-мм листового железа, служит надёжной защитой плотного корпуса от случайных повреждений. Будучи связан с плотным корпусом 24 бобышками, он несёт на себе основную нагрузку от внешних и массовых сил.

Лапы корпуса из толстой листовой стали надёжно приварены к прочному корпусу. Для равномерного теплосъёма транспортные приспособления и укосины размещены на наружном корпусе.

Выводная труба расположена на корпусе со стороны, противоположной вентилятору.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МА-36-7²/₄ И АНАЛИЗ ИХ

Лабораторные испытания электродвигателя показали, что расчётные и опытные характеристики вполне совпали.

Вентиляционные исследования заключались только в измерениях общего расхода воздуха и направления скоростного воздушного поля в кольцевой щели между плотным и прочным корпусом.

Результаты расхода воздуха представлены в нижеследующей таблице, а скоростное поле — на рис. 32.

Увеличение расхода воздуха на величину 2,1—2,7 м²/мин, связанное с наличием отверстий в диске вентилятора, не оказывает существенного влияния на средний перегрев обмотки статора, но весьма благоприятно сказывается на охлаждении переднего щита и связан-

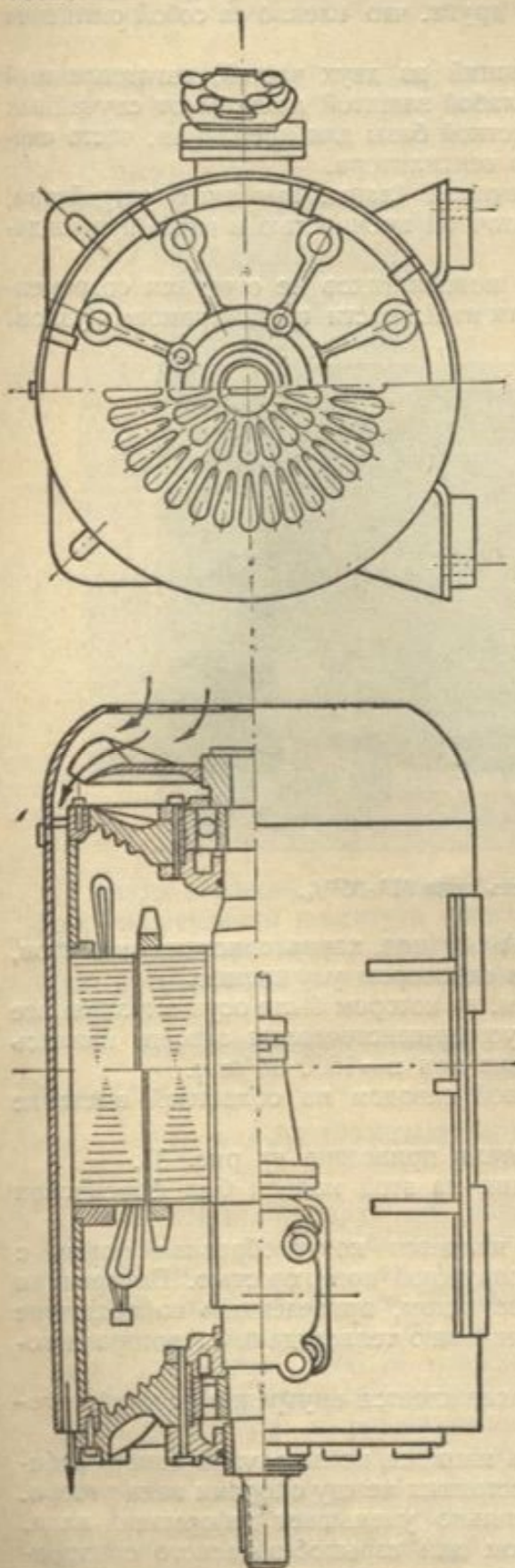


Рис. 31. Конструктивная схема МА-36-7²/₄.

№№ п/п	Направление вращения	Расход воздуха в м ³ /мин.	Примечание
1	Правое	55,9	отверстия в диске вентилятора открыты
2	Левое	57,5	
3	Правое	53,8	отверстия в диске вентилятора заклеены
4	Левое	54,8	

ного с этим перегреве головок обмотки. Помимо всего поток, проходящий через диск вентилятора у самой его ступицы, способствует лучшему заполнению межлопаточного пространства основного вентилятора.

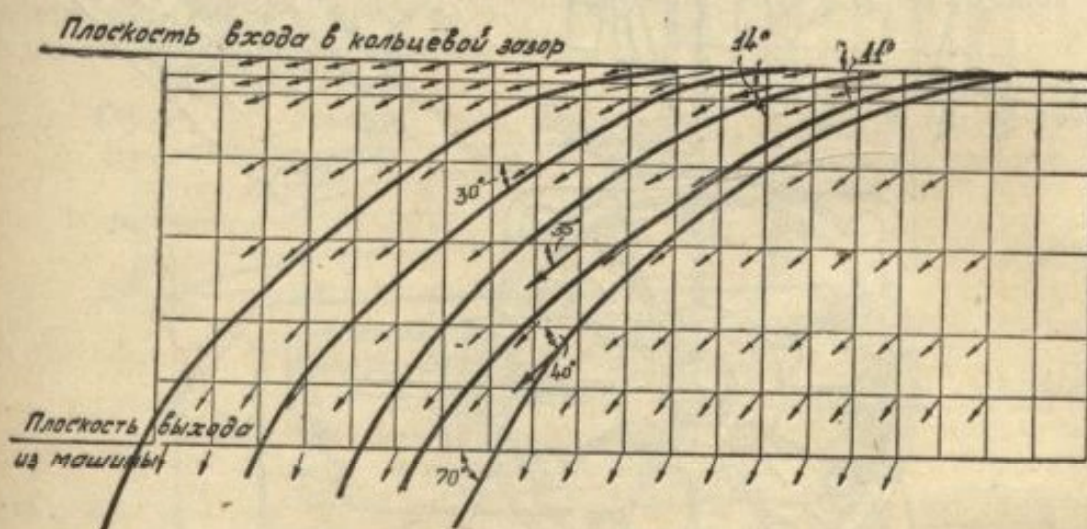


Рис. 32. Скоростное поле машины MA-36-72/4.

Анализ скоростного поля показывает, что струя воздуха с момента выхода из вентилятора и до выхода из машины совершает не менее $\frac{3}{4}$ оборота вокруг плотного корпуса.

Наиболее резкие изменения направления потоков происходят на участке переднего и заднего цилиндров (-30°) и наиболее медленный поворот на участке пакета.

Результаты тепловых испытаний машины M A-36-72/4 приведены на рис. 33.

Характеристика теплового поля обмотки статора отличается особенностями, которые не только выделяются в ряде взрывобезопасных электродвигателей, но и в закрытых асинхронных машинах вообще.

Эти особенности заключаются в следующем:

1) разница в перегревах точек обмотки, разноотстоящих от пакета, по длине, но в различных направлениях, не превышает $1 \div 2^\circ\text{C}$, в то время как в машинах конструкции MA-140 она составляла $8 \div 18^\circ\text{C}$.

2) неравномерность нагрева секций по длине в пазовой части (разность между наиболее горячей и наиболее холодной точкой) составляет $10 \div 11^\circ\text{C}$, в то время как в серии MA-140 $\Delta t = 12 \div 16^\circ$.

3) температура головок обмотки со стороны, противоположной вентилятору (на участке заднего цилиндра), на $8 \div 10^\circ\text{C}$ ниже, чем в середине паза. Последнее не встречалось в практике электромашиностроения вообще (для закрытых машин).

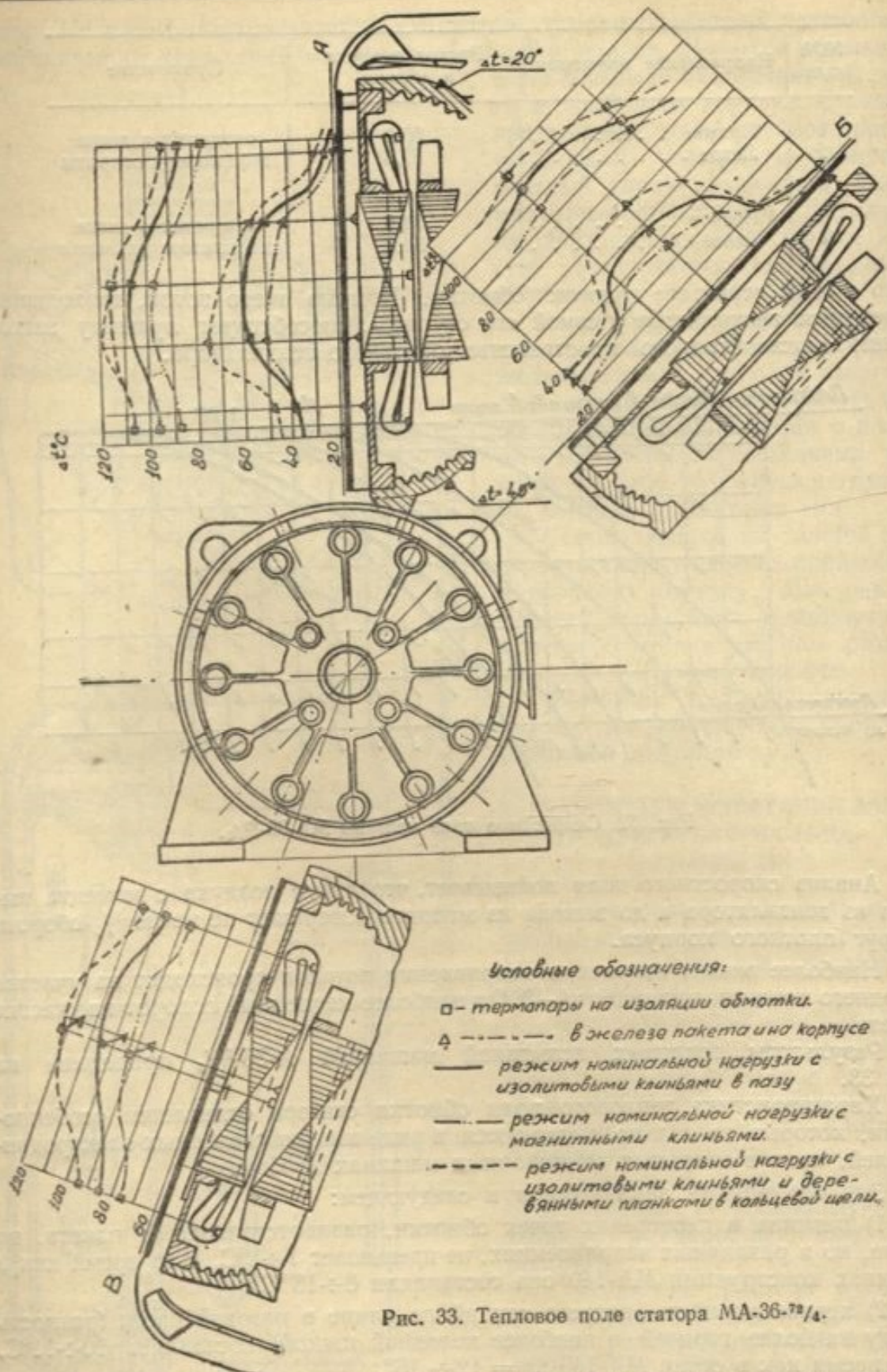


Рис. 33. Тепловое поле статора МА-36-72/4.

В процессе эксплуатации электродвигателей не исключена возможность попадания масла из подшипников внутрь машины, и, в первую очередь, на головки обмотки статора.

При воздействии масла на изоляцию, главными составляющими элементами которой являются органические вещества, срок службы изоляции заметно

сокращается. Если при этом и местный перегрев головок превышает значения, допустимые для данного класса изоляции, то срок службы изоляции головок обмотки сокращается в десятки раз. Отсюда вывод: насколько важным достижением является резкое снижение перегревов лобовых частей. Значения предельно допустимых перегревов обмотки установлены для каждого класса изоляции ГОСТ. При этом считается достаточным измерение среднего перегрева по сопротивлению.

В машинах серии МА-140 перегрев головок обмотки со стороны вентилятора был на уровне среднего перегрева, а перегрев головок со стороны, противоположной вентилятору, был на $15\div 20^\circ$ выше среднего.

В машине МА-36- $72/4$ перегрев головок со стороны вентилятора на $8\div 10^\circ$ ниже среднего перегрева, а со стороны противоположной — на уровне среднего перегрева. Таким образом, электродвигатели типа МА-36 при одинаковом с МА-140 среднем перегреве имеют перегрев головок на $15\div 20^\circ$ ниже, чем у серии МА-140. Это новое качество свидетельствует о более высокой надёжности изоляции головок машин типа МА-36.

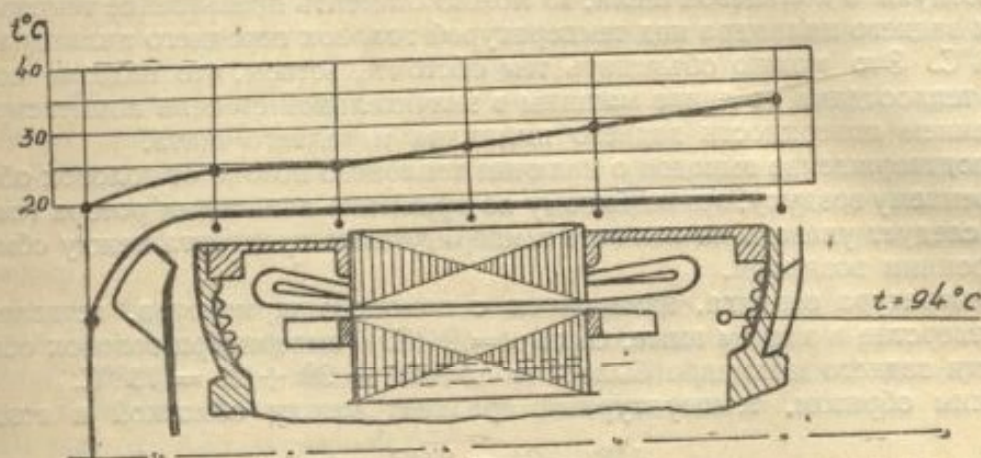


Рис. 34. Изменение температуры воздуха по длине машины МА-36- $72/4$.

Сравнивая две машины, имеющие одинаковый средний перегрев обмотки, нельзя еще утверждать, что и срок службы изоляции будет у них одинаков.

Пробой изоляции случается не по всей обмотке, а в наиболее слабом месте. При всех прочих равных условиях пробой произойдет на наиболее нагретом участке изоляции.

Поэтому одним из критериев надёжности изоляции должно быть количество участков местных повышенных перегревов и величина превышения местного перегрева над средним, замеренным по сопротивлению.

Если в машинах серии МА-140 превышение местных перегревов над средним составляло $20\div 25^\circ\text{C}$, то в машине МА-36- $72/4$ это превышение составляет $10\div 11^\circ\text{C}$.

Таким образом характер теплового поля нового электродвигателя обеспечивает более высокую эксплуатационную надёжность.

Помимо измерений перегревов обмотки и корпуса были также измерены температуры воздуха по длине машины в кольцевой щели, а также температура воздуха внутри машины со стороны заднего щита.

Изменение температуры воздуха по длине машины приведено на рис. 34.

Как видно, с момента поступления воздуха в машину и до входа его на передний цилиндр он уже нагревается на $4\div 4,4^\circ\text{C}$. Такой сравнительно высокий нагрев воздуха при его прохождении через вентилятор в первую очередь объясняется низким (по сравнению с промышленными типами) значением КПД вентилятора, который из условий реверсивности выполнен

с прямыми лопатками. Другой, более существенной и положительной причиной высокого нагрева является хороший отвод тепла как от поверхности вентилятора, так и от поверхности щита.

В дальнейшем на участке пакета и заднего цилиндра повышение температуры воздуха происходит равномерно.

Перегревы частей обмотки и корпуса, приведённые на рис. 33, отнесены к температуре входящего воздуха. Если перегревы участков пакета железа относить к местной температуре воздуха, то и в этом случае будет происходить нарастание перегрева пакета по длине на величину $5\div 7^\circ\text{C}$. Это обстоятельство даёт право сделать очень важный вывод, что в электрических машинах, в подавляющем большинстве случаев, имеет место гидродинамически неустановившееся движение воздуха, а следствием этого является неодинаковое значение коэффициента теплоотдачи по длине машины. Поэтому критериальная зависимость $Nu_l = cRe_l^m Pr^m$ без поправочных значений коэффициента «с» неприменима при тепловом расчёте электрических машин.

Если перегревы головок обмотки отнести к местным значениям температуры воздуха в кольцевой щели, то можно отметить превышение температуры головок заднего цилиндра над температурой головок переднего цилиндра всего на $3\text{—}4^\circ\text{C}$. Это можно объяснить тем обстоятельством, что падение коэффициента теплоотдачи по длине машины в значительной степени компенсируется увеличением поверхности заднего цилиндра и заднего щита.

В подтверждение выводов о наличии теплового потока от головок обмотки к внутреннему воздуху, приведённому во вращение лопатками ротора (см. раздел 2), следует указать на наличие температурного градиента между обмоткой и внутренним воздухом.

Температура воздуха, измеренная с помощью термометра, вставленного через отверстие в заднем щите, была $t = 94^\circ\text{C}$. Температура головок обмотки в области заднего цилиндра была $t = \Delta t + 20 = 98 + 20 = 118^\circ\text{C}$.

Таким образом, температурный градиент между обмоткой и воздухом

$$118 - 94 = 24^\circ\text{C}.$$

Известно, что открытые асинхронные электродвигатели единой всесоюзной серии типа А имеют радиальную систему вентиляции и перегрев головок обмотки порядка $45\text{—}50^\circ\text{C}$ (класс изоляции А). На этом основании можно предполагать, что тепловой поток с головкой закрытого электродвигателя типа МА-36 равен примерно половине потока двигателя типа А, соответствующего диаметра и аналогичной полюсности.

По данным опыта между внутренним воздухом и поверхностью цилиндра температурный напор равен $\Delta t = 35^\circ\text{C}$, а между воздухом и поверхностью щита $\Delta t = 30^\circ\text{C}$. Отсюда можно сделать вывод о необходимости развития не только наружных, но и внутренних поверхностей закрытой машины, что и выполнено на щитах электродвигателя МА-36- $^{72}/_4$.

3. ВАРИАНТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МА-36- $^{72}/_4$ С ПРОДОЛЬНЫМИ ПЛАНКАМИ НА ПЛОТНОМ КОРПУСЕ

Для оценки электродвигателя по сравнению винтовой системы вентиляции с простой аксиальной были проведены специальные опыты.

Чтобы исключить влияние случайных факторов на достоверность исследований решено было производить опыты на одной и той же машине и с теми же термомпарами, что и в исходной конструкции.

В межкорпусную кольцевую щель на участке пакета было вставлено 12 деревянных планок сечением 22×22 , разделивших обдуваемую поверхность плотного корпуса на 12 отсеков, изолированных в аэродинамическом отношении друг относительно друга.

Измерения расхода воздуха показали сравнительно небольшое его снижение (порядка 2%) по сравнению с исходной конструкцией, но характер движения воздуха заметно изменился.

При исследовании скоростного поля в месте выхода воздуха была обнаружена большая неравномерность скоростного поля. Наибольшее измеренное значение скорости на участке одного сектора отличалось от наименьшего более, чем в два раза.

Результаты тепловых испытаний при номинальной нагрузке представлены на рис. 35.

Как видно, перегрев участков обмотки в среднем увеличился на $8 \div 10^\circ\text{C}$. Перегрев обмотки в пазу сечения «ОВ» до значения $\Delta t = 122^\circ\text{C}$ объясняется наличием сухарей для крепления лап и связанным с этим уменьшением скорости потока в данном секторе.

Что касается перегревов железа, то здесь картина качественно меняется. Вначале пакета, когда направляющее действие планок еще не успело сказаться, происходит сравнительно незначительное увеличение перегрева порядка $6 \div 7^\circ\text{C}$. Термопара в конце пакета показывает увеличение перегрева уже на $14 \div 16^\circ\text{C}$. Очевидно в данном случае имеется неравномерное охлаждение пакета, особенно задней его половины.

Таким образом установка ребер только на участке пакета приводит к увеличению перегрева на $8 \div 10\%$.

Построенная затем специальная машина с металлическими ребрами по всей длине плотного корпуса, несмотря на некоторое фактическое увеличение охлаждающей поверхности, показала, примерно, такие же результаты по тепловому режиму.

Таким образом было экспериментально доказано, что винтовая система вентиляции превосходит качественно простую аксиальную вентиляцию.

Средний коэффициент теплоотдачи, отнесенный к наружной поверхности пакета и к средней температуре, при винтовой системе вентиляции на 20% выше, чем при простой аксиальной.

4. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ МА-36-72/4 С МАГНИТНЫМ КЛИНОМ

По данным лабораторных испытаний количество потерь, греющих воздух, проходящий через машину МА-36-72/4 с изолитовым клином, составляло величину порядка $\sigma P = 13,5 \text{ квт}$.

При этом средний перегрев обмотки статора по сопротивлению составлял $\Delta t = 98^\circ\text{C}$.

Если подсчитать количество тепла, уносимого воздухом, по формуле

$$\sigma P = C_p \gamma v (t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}),$$

где:

- C_p — теплоёмкость воздуха;
- γ — удельный вес воздуха;
- v — объёмный расход воздуха в единицу времени;
- $t_{\text{вх}}$ — температура входящего в машину воздуха;
- $t_{\text{вых}}$ — температура выходящего из машины воздуха,

то будем иметь величину $\sigma P = 15,4 \text{ квт}$.

Расхождение между этими двумя данными не могло быть объяснено только погрешностью измерений, которые произведены достаточно аккуратно. Кроме того, тепловой расчёт давал большие расхождения с опытом только в режиме номинальной нагрузки.

Возникло предположение, что в зубцовой зоне имеются добавочные потери, порядка $1,5 \div 2 \text{ квт}$, так называемые пульсационные, связанные

с наличием открытого паза в статоре и появляющиеся только при нагрузке. Эти добавочные потери при применяющейся в лаборатории методике измерений нельзя было учесть.

Поэтому решено было заменить в опытной машине изолятивные клинья магнитными и провести полные тепловые испытания. Распределение перегревов элементов машины с магнитным клином приведено на рис. 33.

При установке магнитных клиньев количество греющих потерь стало $\sigma P = 12,6 \text{ кВт}$, то есть уменьшилось всего на 6,65%.

Если бы это было в действительности, то и средний перегрев обмотки также уменьшился бы на 6,65%, а именно, вместо $\Delta t = 98^\circ\text{C}$ стал бы $\Delta t = 91,4^\circ\text{C}$.

В действительности средний перегрев по данным измерений был $\Delta t = 84,7^\circ\text{C}$, то есть снижен на 13,6%, что соответствует снижению греющих потерь на 2 кВт, чем и подтвердились наши предположения.

Таким образом следует рекомендовать исполнение электродвигателей с магнитным клином, начиная с диаметра $D = 590$, так как при этом не только значительно снижается перегрев обмотки, но и улучшается действительный КПД машины.

5. СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ МА-140 и МА-36

Устранение отверстий в жестах статора и связанное с этим увеличение диаметра расточки, а также новая система вентиляции и применение вогнутых щитов позволяют строить более совершенные электродвигатели в тех же габаритах.

Эффективность указанных факторов может быть оценена следующими цифрами:

№№ п/п	Наименование показателей	Тип машины		Примечание по новой конструкции
		МА-145- ² / ₄	МА-36- ⁵² / ₄	
1	Наружный диаметр жести (в мм)	493	493	
2	Длина пакета (в мм)	230	250	Увеличение на 8,7%
3	Мощность (в кВт)	45	65	Увеличение на 44,5%
4	Обороты в мин. (синхр.)	1500	1500	
5	КПД в %	89	91	Увеличение на 2%
6	Кратность пускового момента	3	3	
7	Удельный расход меди в кг/квт	0,53	0,48	
8	Удельный расход алюминия в кг/квт	0,165	0,128	Уменьшение на 21%
9	Удельный расход динами- стали в кг/квт	9,4	7,01	Уменьшение на 25,6%
10	Габариты машины в мм длина	965	955	Уменьшение на 7%
	ширина	740	688	» » 4%
	высота	615	593	» » 3,6%
11	Общий вес в кг	575	700	Увеличение » 21,8%
12	Относительный общий вес в кг/квт	12,8	10,8	Уменьшение » 15,6%

Достаточно сказать, что только экономия электроэнергии заказчиком, за счёт повышения КПД на 2%, на расчётный срок службы изоляции (10 лет) в три раза превосходит стоимость новой машины.

Помимо этого, за счёт снижения удельных расходов материалов и трудоёмкости, стоимость киловатта установленной мощности также значительно снизилась.

Заказчик также получит экономический эффект вследствие увеличения производительности механизма, приводимого в движение мотором более высокой мощности.

Электродвигатель МА-36-⁵²/₄, короткозамкнутый, $N = 65$ квт, при $n = 1500$ об/мин (синхр.) был построен в количестве 2 шт. и испытан. Общий вид пробной машины приведен на рис. 35. Испытания полностью подтвердили расчётные данные.

6. СЕРИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА МА-36

Успешный опыт модернизации машин типа МА-145, МА-146 и МА-147 привёл руководство завода к заключению о необходимости и целесообразности создания новой серии взрывобезопасных электродвигателей типа МА-36.

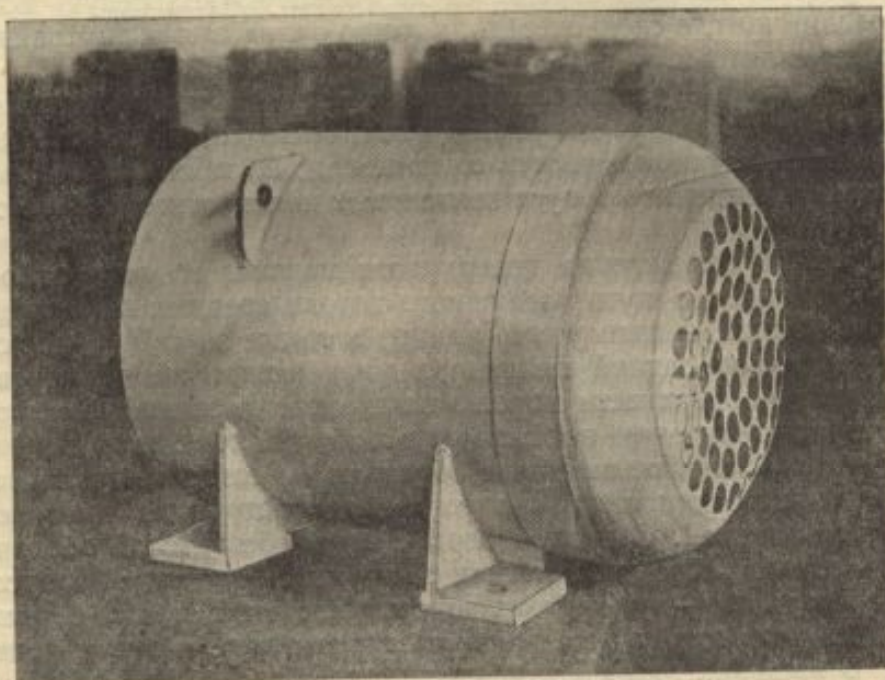


Рис. 35. Электродвигатель МА-36-⁵²/₄

Такой проект серии был разработан заводскими проектными организациями и представлен на рассмотрение технического совета МЭП.

При проектировании новой серии руководство завода исходило из следующих основных положений:

1) эксплуатация, надёжность и экономичность электродвигателя должны удовлетворять высоким требованиям, предъявляемым к рудничному электроприводу;

2) электродвигатели с короткозамкнутым и фазовым ротором для мощности от 40 квт и выше должны быть взаимозаменяемы;

3) унификация шкалы мощностей с единой серией электродвигателей А и АО даёт значительные преимущества при выборе электродвигателя для различных отраслей народного хозяйства.

Значительные технико-экономические показатели серии достигаются при высокой эксплуатационной надёжности и экономичности, при значительно меньшем общем весе и габаритах электродвигателей. Расчёт экономии материалов от внедрения серии МА-36 иллюстрируется следующим.

По фактическому выпуску ХЭМЗом электродвигателей серии МА-140 в 1950 году замена дала бы экономию черных и цветных металлов — 248 тонн, а за 10 месяцев 1951 года — 387 тонн.

7. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СЕРИИ МА-36

Система вентиляции. Одной из особенностей машин типа МА-36 является новая система вентиляции, наложившая резкий отпечаток на ее конструкцию в целом. Геометрия охлаждаемых поверхностей построена из соображений минимальных потерь статического напора и максимального КПД вентилятора. Реверсивный вентилятор диагонального типа построен по принципу постоянства межлопаточного пространства и имеет совершенную аэродинамическую форму. КПД такого вентилятора составляет, примерно, 25%, в то время как у вентиляторов серии МА-140 он не превышает 15 + 18%.

Профиль охлаждаемой поверхности выбран с учётом динамики потока и аэродинамического профиля скоростей в межкорпусном пространстве. Основной поток тепла от внутреннего воздуха, приведенного во вращение лопатками ротора, хорошо передаётся на развитую кольцевую поверхность щитов. Передний щит, в свою очередь, хорошо охлаждается внутренней струей наружного вентилятора.

Высокие удельные расходы воздуха и малое аэродинамическое сопротивление системы не только допускают увеличение длины пакета без ущерба для интенсивности и равномерности охлаждения, но также позволяют обеспечить хорошее охлаждение корпуса контактных колец относительно холодным воздухом.

Равномерность охлаждения поверхности машины во всех направлениях достигнута удалением с пути воздушного потока вредных аэродинамических сопротивлений (лапы, транспортные ушки), а также за счёт перенесения выводного устройства на задний цилиндр и уменьшения его размеров.

Охлаждаемые поверхности хорошо защищены от завалов и загрязнений, что способствует увеличению надёжности и стабильности системы охлаждения.

Станна. Большое внимание обращено на создание жёсткого и прочного корпуса электродвигателя, на усиление конструкции выводной трубы и лап электродвигателя. Основной корпус взрывобезопасной оболочки электродвигателя связан ребрами жёсткости с наружным прочным корпусом в виде трубы. Лапы корпуса — сварные из толстой листовой стали. Верхняя часть лап увязана с корпусом по всей длине электросваркой, а также поперечными укосинами. В машинах третьей длины установлены дополнительные укосины в средней части.

Для равномерного теплосъёма транспортные приспособления и укосины размещены на наружном корпусе в местах расположения рёбер жёсткости, а выводная труба расположена на корпусе со стороны, противоположной вентилятору. Размеры выводной трубы увеличены, по сравнению с серией МА-140, в первых двух габаритах по периметру в три раза при снижении веса выводной коробки также в три раза. В больших габаритах вес выводного устройства снижен в два раза, диаметр трубы увеличен и имеет она двойную приварку как к внутреннему, так и к наружному корпусу пакета.

Вентилятор и вентиляционный щиток. Вместо трудоёмкого штампованного вентилятора из листовой стали, привинчивающегося к отдельной ступице, применён менее трудоёмкий силуминовый вентилятор с залитой ступицей из модифицированного чугуна.

Вентиляционный щиток, цельноштампованный из 3 мм листовой стали, центрируется на заточках с упором на наружном прочном корпусе и укреплен по всему контуру пятью винтами. Такое крепление улучшает жёсткость щитка и увеличивает сопротивление к деформации при падении на машину кусков породы и угля.

Подшипниковые щиты и уплотнения подшипников. Особенностью конструкции щитов машины серии МА-36 является конусообразная форма с развитой как наружной, так и внутренней поверхностями.

При исполнении электродвигателей с фазовым ротором передний щит выполняется с цилиндрической частью по диаметру внутреннего корпуса, которая одновременно является частью взрывобезопасного колпака. По наружному диаметру щит имеет рёбра для лучшего охлаждения внутреннего воздуха колпака контактных колец. Выводное устройство ротора отливается вместе со щитом, что уменьшает поперечные габариты машин. Подшипниковые крышки, помимо длинных узких щелей в местах прохода вала, имеют войлочные уплотнения и дополнительные маслябойные кольца с целым рядом узких и длинных щелей в лабиринтах.

Рассмотрев проект серии МА-36 и материалы по испытаниям пробных машин верхнего участка серии, технический совет МЭПа одобрил конструкцию типа МА-36 в качестве основной конструктивной схемы для новой все-союзной серии взрывобезопасных электродвигателей для мощностей свыше 50 *квт* при $n = 1500$ об/мин. и предложил заводу представить рабочий проект этого участка серии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа по исследованию вопросов вентиляции и охлаждения взрывобезопасных электродвигателей была весьма успешной и намного вышла за рамки первоначально поставленной задачи.

Работа, начатая в институте и имевшая своим следствием рекомендации по улучшению системы вентиляции и охлаждения, на заводе была продолжена. Результатом этой работы было не только создание конструкции электродвигателя нового типа, но даже создание целой серии, которая обладает большими технико-экономическими и эксплуатационными преимуществами по сравнению с другими сериями взрывобезопасных электродвигателей.

Одним из существенных преимуществ новой конструкции является широкая возможность производства всевозможных модификаций основного исполнения, то есть — электродвигателей фланцевых, многоскоростных, с фазовым ротором и др. Конструктивная схема даёт возможность экономично исполнять машины одного диаметра различных длин. При этом основные детали (цилиндры, щиты, подшипниковые узлы, выводное устройство, вентилятор, лапы и др.) остаются без изменений, а остальные элементы (наружный корпус, вал, рёбра) отличаются только длиной.

Это обстоятельство создаёт большие удобства в производстве и снижает стоимость машин.

Вместе с тем каждая машина содержит только минимум необходимого материала и обладает минимально-необходимыми габаритами. Эти достоинства являются немаловажными при эксплуатации машин в шахтных условиях при отсутствии специальных транспортных средств и ограниченности пространств для размещения шахтных механизмов.

Систематичная и более определённая, чем раньше, система вентиляции и охлаждения позволяет не только строить машины с равномерным температурным полем, но и дала возможность создать схему теплового расчёта для этих машин, более надёжную и точную, чем существующие.

Отдельные положения, изученные и обобщённые для машин типа МА-140 и МА-36, имеют большое значение и для закрытых асинхронных электродвигателей вообще и широко используются заводом. К этим положениям следует в первую очередь отнести вопросы местных переговоров и вопросы охлаждения фазовых роторов, а также оценку роли щитов в охлаждении. Работа по созданию новой конструкции велась на заводе с 1948 по 1952 год в тесном содружестве с НИСом Харьковского авиационного института.

Как видно из изложенного, результаты этого содружества достаточно плодотворны и позволили заводу избежать ошибки при заводских исследованиях.