

## IV. ТЕПЛООБМЕН И ТЕПЛООТДАЧА В ГТД

**А. Г. Гилерсон, К. В. Каховский, Ф. М. Мингалеев,  
Е. Д. Нестеров, А. Е. Трянов**

### **МЕТОД КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ ТЕПЛООТДАЧИ В МАСЛО И ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА НА ВХОДЕ В ДТРД ДЛЯ ПОЛЕТНЫХ УСЛОВИЙ**

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $F$  — поверхность теплообмена;  
 $G$  — расход топлива, прокачка масла;  
 $H$  — высота полета;  
 $H_{и0}$  — низшая теплотворная способность топлива;  
 $k$  — коэффициент теплопередачи от масла к топливу в топливо-масляном радиаторе;  
 $t$  — температура;  
 $C_p$  — удельная теплоемкость;  
 $Q$  — теплоотдача в масло;  
 $V$  — скорость полета.

#### ИНДЕКСЫ

ВХ — вход;  
ВЫХ — выход;  
ДВ — двигатель;

М — масло;  
ТМР — топливо-маслянный радиатор;  
Т — топливо.

Важной характеристикой системы смазки ГТД является теплоотдача в масло, которая в значительной мере определяет тепловое состояние узлов смазки, а также влияет на степень подогрева топлива, подаваемого в камеру сгорания.

При выборе конструкции топливо-масляного радиатора (ТМР) необходимо знать теплоотдачу в масло на всех эксплуатационных режимах работы двигателя, чтобы провести поверочные расчеты эффективности радиатора в полетных условиях и определить входную температуру масла по режимам. Известно, что теплоотдача в масло зависит от режима работы двигателя и обуславливается интенсивностью тепловыделения в узлах трения (подшипниках, зубчатых зацеплениях, контактных уплотнениях) и теплообмена через стенки масляных полостей опор. Вследствие влияния

большого числа факторов процесс тепловыделения в масло не поддается точному расчету [1, 2]. Тем не менее для выбора ТМР, для оценки величины температуры масла на входе в двигатель и подогрева топлива в ТМР уже на этапе проектирования двигателя требуется хотя бы приближенно определить уровень теплоотдачи по режимам работы двигателя. Но, в свете вышесказанного, у конструктора всегда есть определенное сомнение в достоверности расчетов. Поэтому в процессе доводки двигателя часто приходится уточнять величину теплоотдачи в масло для всех высотных режимов в соответствии с экспериментальными данными.

В настоящей статье предложен метод определения теплоотдачи в масло и входной температуры масла для различных режимов полета ДТРД, основанный на знании фактических экспериментальных характеристик теплоотдачи в некоторой узкой области полетных условий и знании характеристик ТМР.

### **ЗАВИСИМОСТЬ ТЕПЛОТДАЧИ В МАСЛО ОТ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДТРД В ВЫСОТНЫХ УСЛОВИЯХ**

На подавляющем большинстве авиационных двигателей применяется циркуляционная система смазки. Масло, циркулирующее по замкнутому контуру, перед поступлением к узлам смазки охлаждается в ТМР. Для расчета теплоотдачи в масло в высотных условиях необходимо определить тепловыделение в каждом узле трения с учетом его температурного состояния и действующих нагрузок, а также оценить теплопередачу из газозоодушного тракта через стенки масляных полостей опор. Такие расчеты производятся методом последовательных приближений и отличаются высокой трудоемкостью и, к сожалению, низкой точностью, поскольку не всегда известны точные значения нагрузок и коэффициентов трения в узлах смазки, а тепловое состояние опор также достоверно неизвестно.

Экспериментальное определение теплоотдачи в масло отличается существенной простотой и высокой точностью. Для определения теплоотдачи на любом режиме работы двигателя достаточно замерить прокачку масла через двигатель и температуру масла на входе и выходе из двигателя. Количество тепла, подведенное к маслу в двигателе, определяется по известной зависимости

$$Q = G_m \cdot C_{pm} (t_{m \text{ вых}}^{\text{ДТРД}} - t_{m \text{ вх}}^{\text{ДТРД}}). \quad (1)$$

По формуле (1) была определена теплоотдача в масло в некоторой узкой области эксплуатационных режимов одного из дозвуковых ДТРД (см. табл.).

Как видно из таблицы, теплоотдача в масло существенно зависит от режима работы двигателя и условий полета, возрастая

Таблица 1

Теплоотдача в масло при различных условиях полета, квт

Скорость	Режим работы двигателя	Высота, км				
		2,25	4	8	10	12
Минимальная	Малый газ	15,4	15,2	18,8	16,4	18,5
	0,4 номинального	29,6	25,9	—	—	—
	0,6 номинального	36,1	35,8	30,25	27,4	26,6
	0,7 номинального	41,8	38,7	33,4	29,8	27,8
	0,85 номинального	51,6	45,5	39,5	34,8	33,6
	Номинальный Взлетный	53,9 62,8	48,4 —	41,4 —	37,3 —	37,5 —
Максимальная	Малый газ	14,9	15,9	17,8	17,4	18,2
	0,4 номинального	26,6	27,7	—	—	—
	0,6 номинального	37,3	37,9	32,4	31,7	25,7
	0,7 номинального	40,4	41,0	36,5	32,7	29,7
	0,85 номинального	45,7	46,5	41,6	39,3	35,1
	Номинальный Взлетный	55,7 62,7	51,1 —	44,9 —	40,7 —	36,8 —

с увеличением режима, скорости и с уменьшением высоты полета. Целесообразно в таком случае установить закономерность изменения теплоотдачи в масло для высотных режимов работы исследованного ДТРД.

#### ОБОБЩЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОТДАЧИ В МАСЛО ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПОЛЕТА

Уровень теплоотдачи в масло в известной мере зависит от условий охлаждения масла в ТМР. Поэтому логично установить взаимосвязь теплоотдачи в масло и расхода топлива. Следует отметить, что через ТМР идет весь расход топлива, поступающий в камеру сгорания. Однако для уменьшения гидравлических потерь при больших расходах топлива в ТМР предусмотрен перепускной клапан. При работе двигателя на высоких режимах в земных условиях клапан перепускает часть топлива мимо теплопередающих элементов ТМР. В высотных условиях клапан закрыт, поэтому все топливо участвует в охлаждении масла в ТМР.

Экспериментальные данные по теплоотдаче, приведенные в таблице, удовлетворительно обобщаются в виде функциональной зависимости  $Q=f(G_T)$ . Полученная для исследованного ДТРД зависимость теплоотдачи от часового расхода топлива (рис. 1) может быть описана уравнением  $Q=0,35 G_T^{0,6}$ .

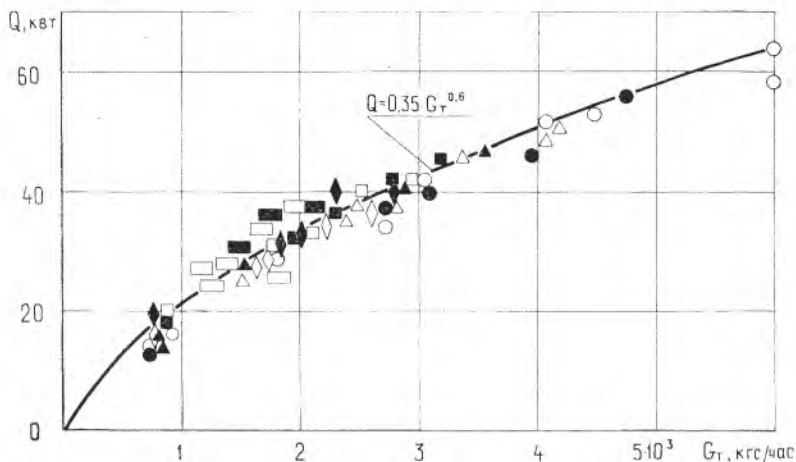


Рис. 1. Обобщенная зависимость теплоотдачи в масле от расхода топлива для различных условий полета:

$H, \text{ км}$	2,25	4	8	10	12
$V_{\text{min}}$	○	△	□	◇	▭
$V_{\text{max}}$	●	▲	■	◆	■

Обобщив полученные результаты, можно представить зависимость теплоотдачи в масле от расхода топлива для любого ДТРД в виде

$$Q = n \cdot G_T^m \quad (2)$$

Коэффициенты  $m$  и  $n$  могут быть определены аналогичным образом для каждого двигателя.

Уравнение (2) удобно для практического использования, так как оно исключает в явном виде зависимость теплоотдачи в масле от режима работы двигателя, высоты и скорости полета.

Можно отметить, что тепло, вносимое в масло, отнесенное к общему теплу, выделенному в камере сгорания, т. е.

$$\bar{Q} = \frac{Q}{G_T H_{\text{то}}} \cdot 100 \%,$$

представляет собой также функцию только расхода топлива (рис. 2). Но это по существу является следствием установленной зависимости (2).

#### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА НА ВХОДЕ В ДВИГАТЕЛЬ

Температурное состояние узлов смазки в значительной мере зависит от входной температуры масла, подаваемого для их ох-

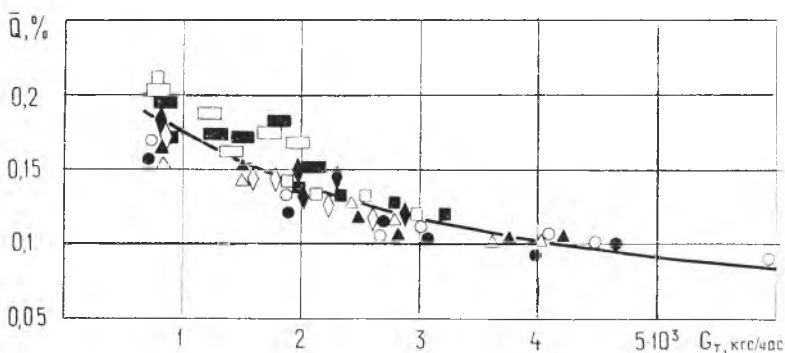


Рис. 2. Зависимость относительной теплоотдачи в масло от расхода топлива:

<i>H, км</i>	2,25	4	8	10	12
<i>V<sub>min</sub></i>	○	△	□	◇	▭
<i>V<sub>max</sub></i>	●	▲	■	◆	■

лаждения. Поэтому важно знать характер изменения температуры масла на всех эксплуатационных режимах работы двигателя.

Температура масла на входе в двигатель при заданных прокачке масла и теплоотдаче зависит от условий охлаждения масла в ТМР. Количество тепла, рассеиваемого в атмосферу через стенки коммуникаций и ТМР, пренебрежимо мало, поэтому можно принять, что тепло от масла полностью передается топливу и что температура масла на выходе из двигателя равна температуре масла на входе в ТМР:

$$t_{M, \text{ВЫХ}}^{\text{ДВ}} = t_{M, \text{ВХ}}^{\text{ТМР}}.$$

При известной теплоотдаче и при заданных геометрических размерах радиатора, прокачке масла, расходе и температуре топлива температуру масла на входе в ТМР можно легко определить по формуле

$$t_{M, \text{ВХ}}^{\text{ТМР}} = t_{T, \text{ВХ}}^{\text{ТМР}} + A Q, \quad (3)$$

где  $A = \frac{1}{kF} + \frac{1}{2G_T C_{pT}} + \frac{1}{2G_M C_{pM}}$ .

Параметр  $A$  в известной мере характеризует эффективность процесса теплопередачи в ТМР. Анализ изменения членов, входящих в параметр  $A$ , показывает, что этот параметр практически зависит только от величины  $G_T$ .

Действительно, прокачка масла через двигатель и теплоемкости меняются в чрезвычайно малых пределах. Можно принять, что

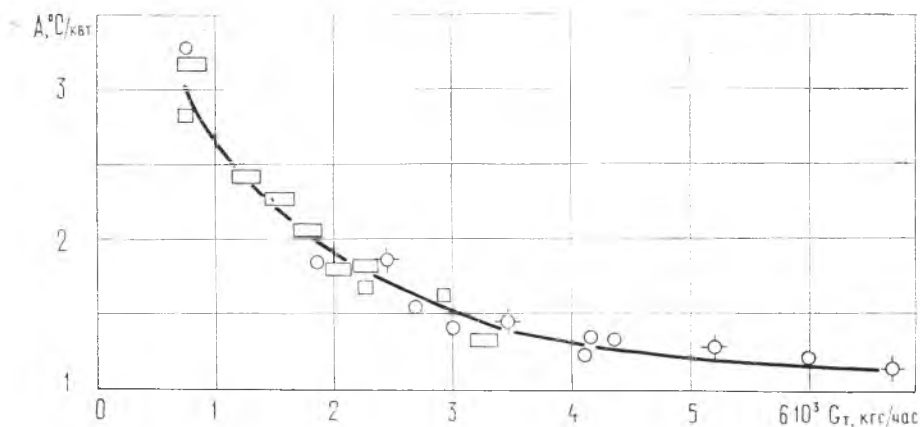


Рис. 3. Тепловая характеристика ТМР при минимальной скорости полета на различной высоте  $H$ :

⊙ - 0 км; ○ - 2,25 км; □ - 8 км; ◻ - 12 км.

$G_M \cdot G_{DM} = \text{const}$ , а величина коэффициента теплопередачи  $k$  будет изменяться в соответствии с изменением расхода топлива.

На рис. 3 приведена зависимость  $A = f(G_T)$ , построенная по результатам эксперимента, проведенного при упомянутых летных испытаниях. Как видно из рисунка, все точки замеров могут быть с удовлетворительной для практики точностью аппроксимированы одной кривой.

Параметр  $A$  позволяет при заданной теплоотдаче в масло легко определить температуру масла на входе в ТМР (т. е. температуру масла на выходе из двигателя). Далее, используя уравнение (1), легко определить температуру масла на входе в двигатель.

#### МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТЕПЛОТДАЧИ В МАСЛО И ТЕМПЕРАТУРЫ МАСЛА НА ВХОДЕ В ДТРД В ПОЛЕТНЫХ УСЛОВИЯХ

С помощью полученных зависимостей можно легко рассчитать теплоотдачу в масло и температуру масла на входе в двигатель для любых условий полета по следующей методике:

1. Для заданных условий полета, используя высотно-скоростные характеристики двигателя, определить часовой расход топлива  $G_T$ .

2. С помощью зависимости теплоотдачи в масло от расхода  $G_T$  (см. рис. 1) определить теплоотдачу в масло.

3. По тепловой характеристике ТМР (см. рис. 3) найти параметр  $A$ .

4. Используя найденные значения теплоотдачи  $Q$  и параметра  $A$ , по известному значению температуры топлива на входе в ТМР  $t_{Т.ВХ}^{ТМР}$  определить температуру масла на выходе из двигателя, т. е. на входе в ТМР, по формуле (3).

5. Из соотношения  $t_{М.ВХ}^{ДВ} = t_{М.ВЫХ}^{ДВ} - \frac{Q}{G_M C_{PM}}$ , определить температуру масла на входе в двигатель.

## ВЫВОДЫ

1. Данные экспериментального определения теплоотдачи в масло ДТРД в условиях полета удовлетворительно обобщаются зависимостью типа  $Q = nG_T^m$ .

2. Предложенный полуэмпирический метод расчета дает возможность сравнительно просто и с достаточной для практики точностью определить теплоотдачу в масло и температуру масла на входе в двигатель при различных режимах работы двигателя в полетных условиях.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Скубачевский Г. С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. М., «Машиностроение», 1969.

2. Демидович В. М. Тепловой режим газотурбинных роликоподшипников при внешнем подогреве. В сб. «Труды КАИ», Вып. 86, Казань, КАИ, 1964.

## Г. М. Горелов

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНОЙ ЖИДКОСТИ

#### УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $P$  — давление потока;  
 $u$  — скорость потока;  
 $G$  — расход;  
 $P_{кр}$  — критическое давление;  
 $\Delta P$  — потери давления;  
 $l$  — длина канала;  
 $d_r$  — гидравлический диаметр канала;  
 $F$  — площадь поперечного сечения канала радиусом  $r$ ;  
 $\gamma$  — плотность потока;  
 $\mu$  — вязкость потока;  
 $x = \frac{G_{II}}{G}$  — относительное паросодержание;  
 $\varphi = \frac{F_{II}}{F}$  — относительная площадь пара;