

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ ПОДШИПНИКОВ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВОЗДУШНО-ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМОЙ СМАЗКИ

В. Н. Климов, Д. Я. Дудьев, В. Я. Сигайло, Н. И. Климов

Филиал ПАО «ОДК—Сатурн» — ОМКБ,  
Россия, 644021, г. Омск, ул. Богдана Хмельницкого, 283

Статья посвящена проблеме выбора оптимальных параметров воздушно-топливной смеси в газотурбинных двигателях (ГТД) с воздушно-топливной системой смазки. В настоящее время определение оптимальных параметров воздушно-топливной смеси, обеспечивающих работоспособность роторных подшипников ГТД при минимальных расходах воздуха и топлива через них, существенно осложняется невозможностью расчета температурного состояния подшипников. При этом от количества воздуха и топлива, отбираемых из проточной части и топливной магистрали двигателя, значительно зависят его основные удельные характеристики. В связи с этим определение зависимости температуры подшипников от условий их эксплуатации (параметров воздушно-топливной смеси и режимов работы) является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка расчетного метода определения температуры смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью подшипника.

В работе выполнен анализ теплового состояния подшипников, установленных в опоры ротора ГТД с воздушно-топливной системой смазки. На основании результатов испытаний гибридных шариковых радиально-упорных подшипников 45-126205РЯ определены зависимости момента трения и коэффициента конвективной теплоотдачи в них от параметров воздушно-топливной смеси и режимов эксплуатации, разработан метод расчета температуры смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью подшипника.

Использование полученных в данной работе результатов при проектировании перспективных короткоресурсных ГТД с воздушно-топливной системой смазки приведет к улучшению характеристик двигателей, а также будет способствовать расширению области их применения.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, воздушно-топливная смесь, система смазки, метод, температура подшипника.

## 1. Введение

В последнее время все большее распространение получают беспилотные летательные аппараты (БПЛА). В качестве силовой установки для БПЛА часто используются газотурбинные двигатели (ГТД), большинство из которых созданы по традиционным схемам [1], обеспечивающим высокую надежность и большой ресурс двигателей, но способствующим формированию относительно высокой их стоимости, больших габаритов и массы. Эффективность ГТД, устанавливаемых на короткоресурсные БПЛА, во многом определяется их стоимостью, в то время как требования к ресурсу двигателя существенно снижены [2]. Одним из основных способов решения проблемы снижения стоимости, а также улучшения габаритно-массовых характеристик короткоресурсных ГТД является упрощение их конструкции (включая системы и агрегаты). В части системы смазки ГТД это может быть достигнуто за счет перехода от традиционной масляной системы смазки двигателя [3] к разомкнутой воздушно-топливной системе смазки [4], что позволяет отказаться от маслобака, радиатора, маслонасоса, маслоотделителя, суфлера и магистралей откачки.

В настоящее время наибольшее распространение воздушно-топливная система смазки получила в микро-ТРД (с тягой до 510 Н (52 кгс)) [5–8]. Схема используемой в них воздушно-топливной системы смазки представлена на рис. 1.

В данной схеме охлаждение подшипников производится воздухом, отбираемым за компрессором (количество отбираемого воздуха не регулируется). Топливо (керосино-масляная смесь) отбирается из топливной магистрали и подается в переднюю (компрессорную) опору ротора для смазки установленного в ней подшипника. Далее смесь воздуха и топлива по полуму валу поступает в заднюю (турбинную) опору ротора и, пройдя через установленный в ней подшипник, выбирается перед рабочим колесом турбины.

В работе [9] представлена перспективная схема воздушно-топливной системы смазки (рис. 2), позволяющая регулировать параметры отбираемого для охлаждения подшипников воздуха. В данной схеме системы смазки воздушно-топливная смесь получается в специальном смесителе. Топливо к смесителю подается от топливного насоса, установленного в топливной магистрали. Воздух отбирается из проточной части компрессора через кольцевой коллектор. Воздушно-топливная смесь подается в заднюю

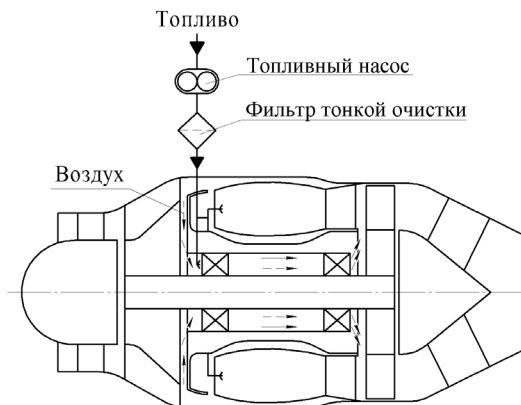


Рис. 1. Схема воздушно-топливной системы смазки ГТД  
 Fig. 1. Scheme of the air-fuel lubrication system of the GTE

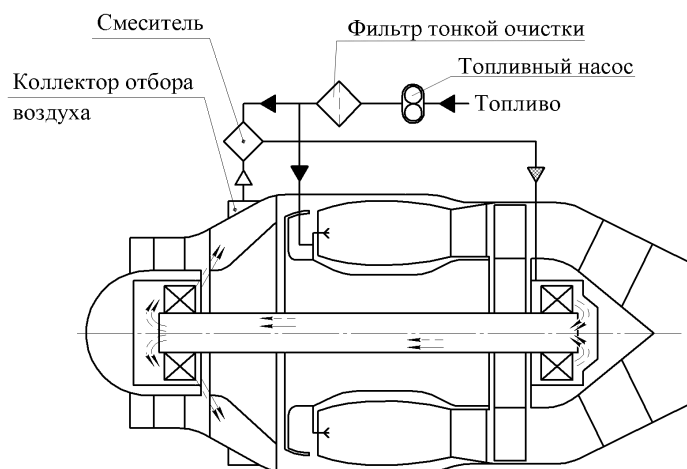


Рис. 2. Схема воздушно-топливной системы смазки ГТД со смесителем  
 Fig. 2. Scheme of the air-fuel lubrication system with a mixer for gas turbine engine

(турбинную) опору ротора для смазки и охлаждения установленного в ней подшипника. Прошедшая через подшипник воздушно-топливная смесь через полый вал ротора подается в переднюю (компрессорную) опору ротора для смазки и охлаждения установленного в ней подшипника. Отработанная воздушно-топливная смесь отводится на вход в компрессор в зону наименьшего статического давления.

Выбор расхода воздуха и топлива, отбираемых из проточной части и топливной магистрали ГТД для смазки и охлаждения подшипников, оказывает существенное влияние на его удельные параметры. При этом определение оптимальных параметров получаемой воздушно-топливной смеси, обеспечивающих работоспособность роторных подшипников при минимальных расходах воздуха и топлива через них, теоретическим методом в настоящее время невозможно.

В качестве топлива в ГТД традиционно используется керосин, физико-химические свойства и трибологические характеристики которого существенно отличаются от аналогичных

свойств масел [10, 11]. При смазке топливом, вязкость которого существенно ниже вязкости масла, подшипник в большом диапазоне частот вращения и нагрузок работает в условиях граничного трения [12, 13], при котором происходит частичное касание поверхностей его движущихся деталей, приводящее к их интенсивному износу и повышенному тепловыделению. Для прогнозирования долговечности подшипника в данных условиях эксплуатации необходимо определить условия его смазки, которые существенно зависят от температуры подшипника. При этом расчет температуры смазываемых и охлаждаемых воздушно-топливной смесью подшипников по существующим методам, созданным для случая смазки и охлаждения подшипников маслом при полном разделении их деталей смазочным слоем [14, 15], невозможен.

Таким образом, определение зависимости температуры подшипника от параметров продуваемой через него воздушно-топливной смеси и режимов эксплуатации является актуальной задачей.

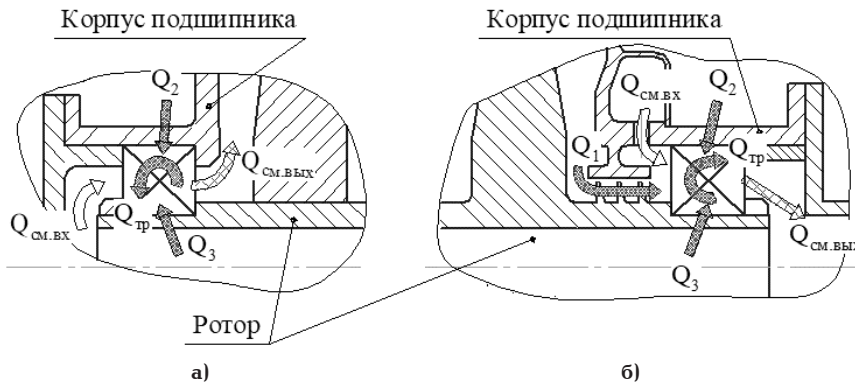


Рис. 3. Схема теплового состояния роторных подшипников ГТД:  
 а) компрессорная опора ротора; б) турбинная опора ротора  
 Fig. 3. Scheme of the thermal state of GTD rotary bearings:  
 а) compressor support of the rotor; б) turbine support of the rotor

## II. Постановка задачи

Целью данной работы является разработка расчетного метода определения температуры смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью подшипника.

## III. Теория

Тепловое состояние установленных в опоры ротора ГТД подшипников зависит от количества подведенной и отведенной от них теплоты, а также количества тепла, генерируемого в самих подшипниках в процессе трения их деталей. Схема теплового состояния подшипников, установленных в опорах ротора ГТД с воздушно-топливной системой смазки, представлена на рис. 3, где  $Q_{см.вых}$  — мощность теплового потока смеси на выходе из опоры ротора;  $Q_{см.вх}$  — мощность теплового потока смеси на входе в опору ротора;  $Q_1$  — мощность теплового потока, подводимого из тракта двигателя;  $Q_2$  — мощность теплового потока, подводимого через стенки опоры подшипника;  $Q_3$  — мощность теплового потока, подводимого через вал;  $Q_{тр}$  — мощность теплового потока, генерируемого в подшипнике в процессе трения между его деталями.

Запишем уравнение теплового баланса в подшипнике в следующем виде:

$$Q_{см.отв} = Q_{пог} + Q_{тр}, \quad (1)$$

где  $Q_{см.отв} = Q_{см.вых} - Q_{см.вх}$  — мощность теплового потока, отводимого от подшипника воздушно-топливной смесью;  $Q_{пог} = Q_1 + Q_2 + Q_3$  — мощность теплового потока, подводимого к подшипнику из внешней среды.

$$Q_{тр} = N_{тр}, \quad (2)$$

где  $N_{тр}$  — потери мощности на трение в подшипнике [16]:

$$N_{тр} = \frac{M_{тр} \cdot n}{9550}, \quad (3)$$

где  $n$  — частота вращения вала, об/мин;  $M_{тр}$  — момент трения в подшипнике, Н·мм, зависимость которого от режимов его работы и параметров воздушно-топливной смеси неизвестна.

Мощность теплового потока, отводимая от подшипника воздушно-топливной смесью  $Q_{см.отв}$ , может быть определена по формулам [17]:

$$Q_{см.отв} = k_m \cdot F_{пл} \cdot (T_n - T_{см}); \quad (4)$$

$$Q_{см.отв} = G_{см} \cdot C_{p,см} \cdot (T_{см.вых} - T_{см.вх}), \quad (5)$$

где  $k_m$  — коэффициент конвективной теплоотдачи в подшипнике, зависимость которого от режимов его работы и параметров воздушно-топливной смеси неизвестна;  $F_{пл}$  — площадь поверхности подшипника, обдуваемой воздушно-топливной смесью;  $T_n$  — температура подшипника;  $T_{см}$  — средняя температура воздушно-топливной смеси в подшипнике;  $G_{см}$  — расход воздушно-топливной смеси через подшипник;  $C_{p,см}$  — адиабатическая теплоемкость воздушно-топливной смеси;  $T_{см.вых}$  — температура воздушно-топливной смеси на выходе из подшипника;  $T_{см.вх}$  — температура воздушно-топливной смеси на входе в подшипник.

$$T_{см} = (T_{см.вых} + T_{см.вх})/2. \quad (6)$$

Анализ уравнений (1–6) показывает, что для определения температуры  $T_n$  смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью подшипника необходимо определить зависимость момента трения  $M_{тр}$  и коэффициента конвективной теплоотдачи  $k_m$  в подшипнике от условий его эксплуатации (параметров воздушно-топливной смеси и режима работы), что требует проведения экспериментальных работ.

Экспериментальные работы по определению работоспособности роторных подшипников, смазываемых и охлаждаемых воздушно-топливной смесью, проводились в филиале ПАО «ОДК — Сатурн» — ОМКБ на специальной установке, конструкция которой имитировала опору ротора ГТД. Схема установки и принцип ее работы представлены в работе [18].

Таблица 1. Результаты испытания подшипника 45-126205РЯ при смазке и охлаждении «холодной» воздушно-топливной смесью  
 Table 1. Test results of bearing 45-126205RЯ when lubricated and cooled with a «cold» air-fuel mixture

Частота вращения вала $n$ , об/мин	Время работы на режиме $t$ , мин	Эквивалентная динамическая нагрузка $P_{экв,дин}$ , Н	Массовая концентрация топлива в смеси $K$ , %	Перепад давления на подшипнике $\Delta P_{пн}$ , кПа	Температура смеси на входе в подшипник $T_{см,вх}$ , К (°С)	Температура наружного кольца подшипника $T_{пн}$ , К (°С)	Температура смеси на выходе из подшипника $T_{см,вых}$ , К (°С)
Испытание 1							
0	7	1536,2	10,7 %	107	286,0 (13,0)	286,5 (13,5)	285,5 (12,5)
10000	17	1545,2			286,0 (13,0)	289,0 (16,0)	289,5 (16,5)
20000	13	1572,2			283,5 (10,5)	289,5 (16,5)	290,5 (17,5)
30000	15	1617,1			291,0 (18,0)	302,0 (29,0)	300,0 (27,0)
43000	8	1702,3			291,5 (18,5)	305,0 (32,0)	310,0 (37,0)
Испытание 2							
0	7	1536,2	8,7 %	107	282,0 (9,0)	282,0 (9,0)	285,0 (12,0)
10000	7	1545,2			288,0 (15,0)	290,5 (17,5)	291,0 (18,0)
20000	5	1572,2			287,0 (14,0)	293,0 (20,0)	293,0 (20,0)
30000	7	1617,1			290,0 (17,0)	301,0 (28,0)	298,5 (25,5)
43000	8	1702,3			291,5 (18,5)	306,0 (33,0)	311,0 (38,0)
Испытание 3							
0	2	1536,2	7,0 %	107	285,5 (12,5)	285,5 (12,5)	286,0 (13,0)
10000	8	1545,2			284,0 (11,0)	288,0 (15,0)	287,0 (14,0)
20000	8	1572,2			287,5 (14,5)	294,5 (21,5)	293,5 (20,5)
30000	9	1617,1			292,0 (19,0)	305,0 (32,0)	300,5 (27,5)
43000	6	1702,3			293,5 (20,5)	309,0 (36,0)	310,0 (37,0)
Испытание 4							
0	5	1536,2	4,9 %	107	298,0 (25,0)	298,0 (25,0)	296,0 (23,0)
10000	3	1545,2			288,0 (15,0)	291,5 (18,5)	292,0 (19,0)
20000	7	1572,2			291,0 (18,0)	297,0 (24,0)	296,0 (23,0)
30000	7	1617,1			289,5 (16,5)	303,0 (30,0)	298,0 (25,0)
43000	8	1702,3			294,0 (21,0)	312,0 (39,0)	312,0 (39,0)
Испытание 5							
0	6	1536,2	0	107	289,0 (16,0)	290,0 (17,0)	294,0 (21,0)
10000	4	1545,2			289,0 (16,0)	296,0 (23,0)	295,0 (22,0)
20000	7	1572,2			290,0 (17,0)	303,0 (30,0)	298,5 (25,5)
30000	6	1617,1			289,5 (16,5)	320,0 (47,0)	305,5 (32,5)

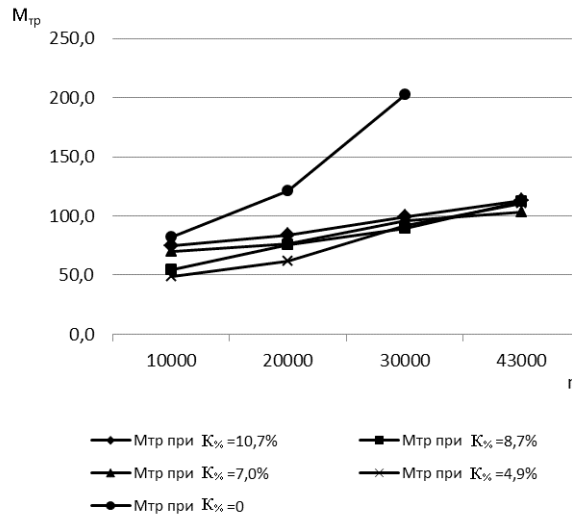


Рис. 4. Зависимость момента трения в подшипнике от условий эксплуатации  
Fig. 4. Dependence of the friction moment in the bearing on the operating conditions

В качестве объекта испытания был выбран гибридный шариковый радиально-упорного подшипник 45-126205РЯ с керамическими телами качения из нитрида кремния  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Использование керамических шариков было обусловлено меньшими силами трения и меньшим тепловыделением в подшипнике по сравнению с подшипниками со стальными шариками [19]. В качестве топлива использовался керосин ТС-1 с добавлением 5% масла МС-8П. Осевая нагрузка  $F_a$  составляла 1765,8 Н (180 кгс). Дисбаланс ротора в местах установки подшипников составлял 20 г·мм.

Результаты испытаний подшипника 45-126205РЯ в условиях  $n = 10000 \dots 43000$  об/мин,  $P_{\text{экв.гун}} = 1545,2 \dots 1702,3$  Н,  $K_{\%} = 0 \dots 10,7\%$ ,  $\Delta p_n = 107$  кПа,  $T_{\text{см.вх}} = 10,5 \dots 21,0$  °С, представлены в работе [20] (табл. 1), где  $P_{\text{экв.гун}}$  — эквивалентная динамическая нагрузка на подшипник [16];  $K_{\%}$  — массовая концентрация топлива в воздушно-топливной смеси;  $\Delta p_n$  — перепад статического давления на подшипнике. Расчетная зависимость момента трения  $M_{\text{тр}}$  в подшипнике, полученная по формулам (1–3, 5), в данных условиях эксплуатации представлена на рис. 4.

Результаты испытаний подшипника в условиях  $n = 10000 \dots 43000$  об/мин,  $P_{\text{экв.гун}} = 1545,2 \dots 1702,3$  Н,  $\Delta p_n = 59 \dots 80$  кПа,  $K_{\%} = 4,5 \dots 12,2\%$ ,  $T_{\text{см.вх}} = 74 \dots 98$  °С представлены в работе [21] (табл. 2). Зависимость момента трения  $M_{\text{тр}}$  в подшипнике от условий его эксплуатации не определялась в связи с интенсивным испарением керосина и невозможностью расчета мощности теплового потока, отводного от подшипника воздушно-топливной смесью  $Q_{\text{см.отв}}$  по формуле (5).

Анализ зависимости момента трения  $M_{\text{тр}}$  в работающем без смазки подшипнике при  $n = 10000 \dots 30000$  об/мин,  $P_{\text{экв.гун}} = 1545,2 \dots 1617,1$  Н,  $\Delta p_n = 107$  кПа,  $T_{\text{см.вх}} = 16,0 \dots 17,0$  °С выполнен в работе [22]. Установлено, что момент трения в работающем без смазки и охлаждаемом воздухом подшипнике может быть определен по формуле:

$$M_{\text{тр}} = f_p \cdot P_{\text{экв.гун}} \cdot \frac{d}{2} + \mu \cdot n^2 \cdot d_m^4 \cdot d, \text{ Н}\cdot\text{мм}, \quad (7)$$

где  $f_p$  — приведенный к внутреннему диаметру подшипника коэффициент трения под действием внешней нагрузки;  $d$  — внутренний диаметр подшипника, мм;  $\mu$  — приведенный к внутреннему диаметру подшипника коэффициент, учитывающий конструкцию подшипника, коэффициенты трения между шариками и сепаратором, сепаратором и кольцами подшипника и зависящий от материала шариков и сепаратора;  $d_m$  — средний диаметр подшипника.

Для случая смазки подшипника воздушно-топливной смесью формула (7) должна быть дополнена коэффициентом  $K_1$ , учитывающим условия его смазки:

$$M_{\text{тр}} = K_1 \left( f_p \cdot P_{\text{экв.гун}} \cdot \frac{d}{2} + \mu \cdot n^2 \cdot d_m^4 \cdot d \right). \quad (8)$$

Условия смазки подшипника характеризуются параметром смазки  $\Lambda$  [16]:

$$\Lambda = \frac{h_0}{\sqrt{Ra_1^2 + Ra_2^2}},$$

где  $h_0$  — минимальная толщина смазочного слоя в подшипнике, рассчитанная по методике, представленной в [13];  $R_{a1}$ ,  $R_{a2}$  — среднеарифметические отклонения профиля поверхности, то есть параметр шероховатости тел (шарика и кольца). При этом расход смазки через подшипник считается достаточным для образования максимальной в данных условиях эксплуатации толщины смазочного слоя  $h_0$ .

Для выбранного подшипника 45-126205РЯ зависимость коэффициента  $K_1$  от  $\Lambda$  и  $K_{\%}$  при  $\Delta p_n = 107$  кПа, рассчитанная по формуле (8) на основании полученных результатов экспериментов (рис. 4), представлена на рис. 5.

Таблица 2. Результаты испытания подшипника 45-126205РЯ при смазке и охлаждении «горячей» воздушно-топливной смесью  
 Table 2. Test results of bearing 45-126205РЯ when lubricated and cooled with a «hot» air-fuel mixture

Частота вращения вала n, об/мин	Время работы на режиме t, мин	Эквивалентная динамическая нагрузка R <sub>экв.дин</sub> , Н	Концентрация топлива в смеси K <sub>%</sub>	Перепад Давления на подшипнике ΔP <sub>п</sub> , кПа	Температура смеси в входе в подшипник T <sub>см,вх</sub> , К (°С)	Температура наружного кольца подшипника T <sub>пн</sub> , К (°С)	Температура смеси на выходе из подшипника T <sub>см,вых</sub> , К (°С)
Испытание 6							
0	4	1536,2	9,5 %	80	350,0 (77,0)	351,0 (78,0)	346,0 (73,0)
10000	10	1545,2			351,0 (78,0)	352,0 (79,0)	347,0 (74,0)
20000	7	1572,2			352,0 (79,0)	353,0 (80,0)	349,0 (76,0)
30000	2	1617,1			356,0 (83,0)	361,0 (88,0)	354,0 (81,0)
43000	7	1702,3			359,0 (86,0)	371,5 (98,5)	365,0 (92,0)
Испытание 7							
0	10	1536,2	7,7 %	80	355,5 (82,5)	357,0 (84,0)	353,0 (80,0)
10000	3	1545,2			356,0 (83,0)	357,0 (84,0)	352,5 (79,5)
20000	6	1572,2			357,0 (84,0)	358,0 (85,0)	353,0 (80,0)
30000	7	1617,1			359,0 (86,0)	366,0 (93,0)	357,0 (84,0)
43000	7	1702,3			362,5 (89,5)	377,5 (104,5)	367,5 (94,5)
Испытание 8							
0	4	1536,2	6,3 %	80	350,0 (77,0)	349,0 (76,0)	352,0 (79,0)
10000	10	1545,2			359,0 (86,0)	358,0 (85,0)	351,5 (78,5)
20000	7	1572,2			360,5 (87,5)	363,0 (90,0)	354,0 (81,0)
30000	8	1617,1			362,5 (89,5)	369,0 (96,0)	358,0 (85,0)
43000	12	1702,3			367,5 (94,5)	385,0 (112,0)	371,0 (98,0)
Испытание 9							
0	5	1536,2	4,5 %	80	369,0 (96,0)	367,0 (94,0)	361,0 (88,0)
10000	9	1545,2			370,0 (97,0)	369,0 (96,0)	359,0 (86,0)
20000	7	1572,2			369,0 (96,0)	372,0 (99,0)	360,0 (87,0)
30000	7	1617,1			371,0 (98,0)	380,0 (107,0)	364,0 (91,0)
43000	8	1702,3			367,0 (94,0)	389,5 (116,5)	378,0 (105,0)
Испытание 10							
0	3	1536,2	12,2 %	59	347,0 (74,0)	345,5 (72,5)	344,0 (71,0)
10000	8	1545,2			347,0 (74,0)	346,0 (73,0)	344,5 (71,5)
20000	5	1572,2			347,0 (74,0)	349,0 (76,0)	346,0 (73,0)
30000	9	1617,1			348,0 (75,0)	355,0 (82,0)	352,0 (79,0)
43000	8	1702,3			352,5 (79,5)	367,0 (94,0)	362,0 (89,0)

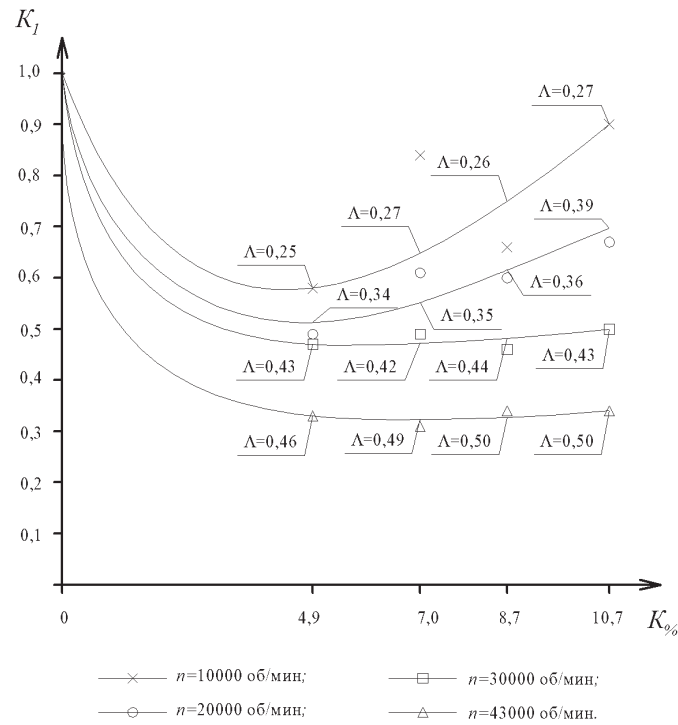


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $K_1$  от условий эксплуатации  
 Fig. 5. Dependence of coefficient  $K_1$  on operating conditions

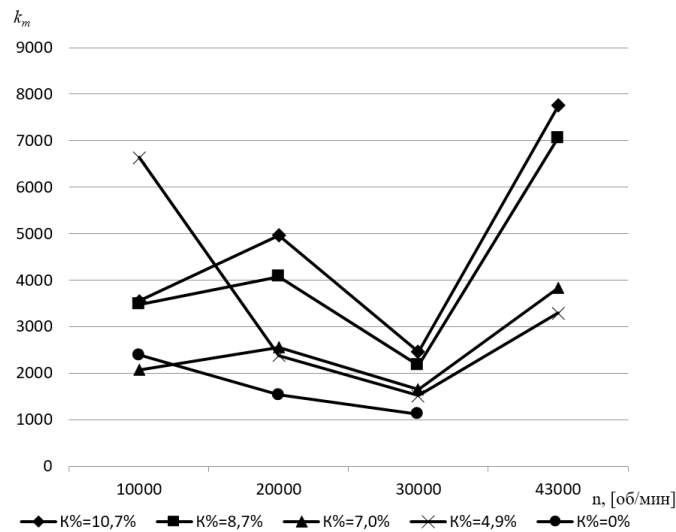


Рис. 6. Зависимость коэффициента теплоотдачи  $k_m$  в подшипнике от условий эксплуатации  
 Fig. 6. Dependence of the heat transfer coefficient  $k_m$  in the bearing on the operating conditions

Зависимость коэффициента конвективной теплоотдачи  $k_m$  от условий эксплуатации при  $n = 10000 \dots 43000$  об/мин,  $P_{\text{экр.гид}} = 1545,2 \dots 1702,3$  Н,  $\Delta p_n = 107$  кПа,  $K\% = 0 \dots 10,7\%$ ,  $T_{\text{см.вх}} = 10,5 \dots 21,0^\circ\text{C}$ , определенная по формуле (4) на основании полученных результатов экспериментов, представлена на рис. 6.

Таким образом, температура смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью подшипника  $T_n$  может быть определена следующим методом (при решении системы уравнений):

$$\begin{cases} Q_{\text{см.омв}} = Q_{\text{пог}} + Q_{\text{мп}}; \\ Q_{\text{см.омв}} = G_{\text{см}} \cdot C_{p\text{см}} \cdot (T_{\text{см.вых}} - T_{\text{см.вх}}); \\ Q_{\text{см.омв}} = k_m \cdot F_{n,n} \cdot (T_n - T_{\text{см}}), \end{cases} \quad (9)$$

где  $T_{\text{см}} = \frac{T_{\text{см.вх}} + T_{\text{см.вых}}}{2}$ ;

$$Q_{\text{мп}} = N_{\text{мп}} = \frac{M_{\text{мп}} \cdot n}{9550}$$

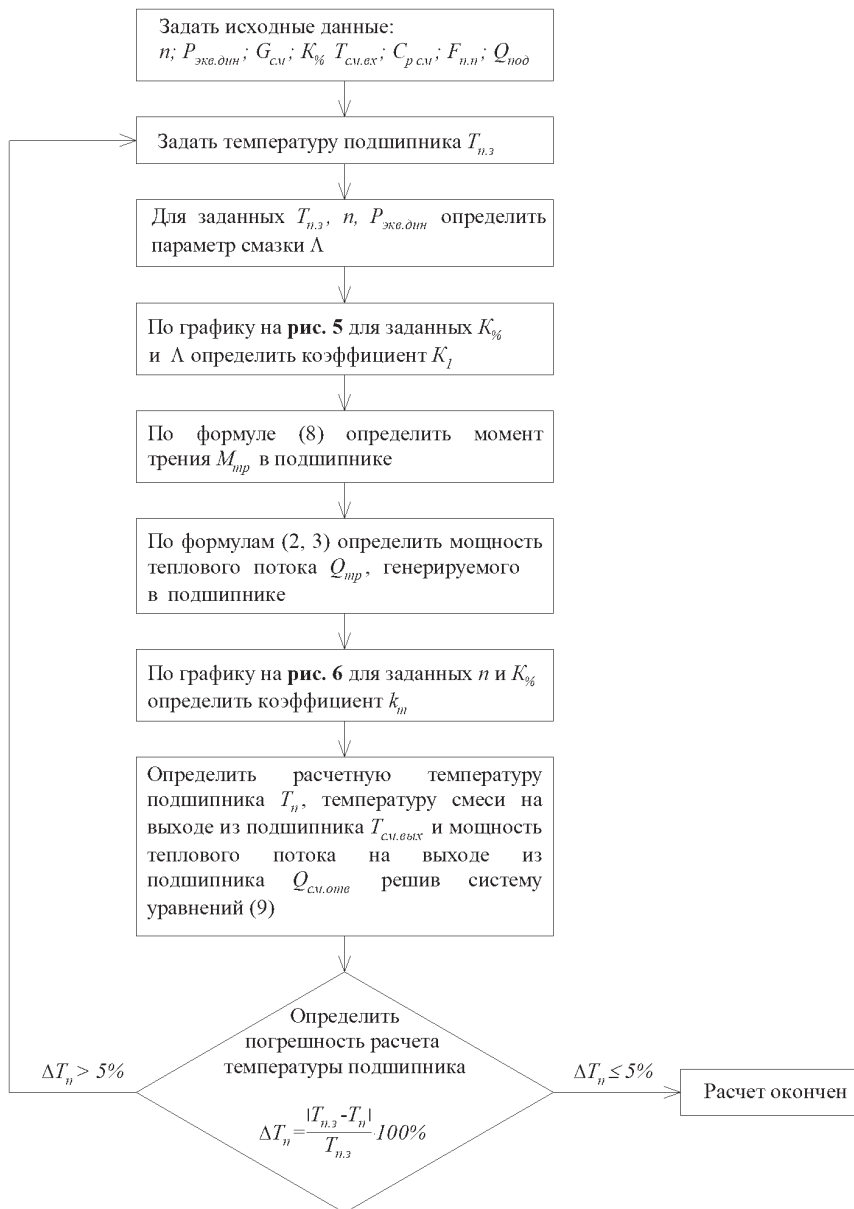


Рис. 7. Схема расчета температуры подшипника  
Fig. 7. Calculation scheme of the bearing temperature

$$M_{тр} = K_1 \left( f_p \cdot P_{экв.дин} \cdot \frac{d}{2} + \mu \cdot n^2 \cdot d_m^4 \cdot d \right);$$

$$K_1 = f(\Lambda, K_{\%}, \Delta p_n);$$

$$k_m = f(K_{\%}, \Delta p_n, n, T_{вх}).$$

Методика расчета температуры подшипника в заданных условиях эксплуатации представлена на рис. 7.

За весь комплекс испытаний подшипника 45-126205РЯ в условиях  $n = 10000 \dots 43000$  об/мин,  $P_{экв.дин} = 1545,2 \dots 1702,3$  Н,  $\Delta p_n = 59 \dots 107$  кПа,  $K_{\%} = 0 \dots 12,2\%$ ,  $T_{см.вх} = 10,5 \dots 98$  °С его наработка составила 5 часов. При этом состояние подшипника после испытаний признано удовлетворительным (величина радиального зазора в подшипнике соответствовала требованиям чертежа, следы выкрашивания на кольцах и телах качения отсутствовали).

#### IV. Обсуждение результатов

Для оценки температурного состояния подшипника в настоящее время используются методы, базирующиеся на результатах экспериментальных исследований в определенном диапазоне эксплуатационных условий. При этом практически все разработанные методы определения  $T_n$  созданы для случая смазки и охлаждения подшипника маслом. При использовании данных методов исходят из того, что весь тепловой поток от подшипника практически полностью расходуется на повышение температуры охлаждающей жидкости  $Q_{тр} = Q_{м.отв}$ , где  $Q_{м.отв}$  — мощность теплового потока, отводимого маслом. При этом рабочая температура подшипника приравнивается к температуре масла на выходе из подшипника  $T_n = T_{м.вых}$  и может быть определена по формуле:



$$T_n = T_{м.вх} + \frac{Q_{мп}}{C_{р.м} \cdot G_m},$$

где  $T_{м.вх}$  — температура масла на входе в подшипник;  $C_{р.м}$  — адиабатическая теплоемкость масла;  $G_m$  — расход масла через подшипник.

Анализ полученных в результате экспериментов данных (табл. 1, 2) показывает, что, в зависимости от частоты вращения  $n$ , перепада давления на подшипнике  $\Delta p_n$ , концентрации топлива в смеси  $K_{\%}$ , а также температуры смеси на входе в подшипник  $T_{см.вх}$  его температура может существенно отличаться от температуры смеси на выходе из подшипника. То есть для случая смазки и охлаждения подшипника воздушно-топливной смесью допущение  $T_n = T_{см.вых}$  неверно. Кроме того, при смазке воздушно-топливной смесью подшипник в большом диапазоне частот вращения и нагрузок работает в условиях граничного трения, что не позволяет рассчитывать мощность теплового потока  $Q_{мп}$ , генерируемого в нем, по эмпирическим зависимостям, полученным для случая смазки подшипника маслом, при котором происходит полное разделение поверхностей его движущихся деталей смазочным слоем.

Таким образом, традиционный метод расчета не позволяет определять температуру подшипника, смазываемого и охлаждаемого воздушно-топливной смесью. При этом разработанный метод обеспечивает наиболее близкое соответствие расчетных значений экспериментальным данным.

## V. Выводы и заключение

В данной работе впервые в отечественной практике исследовано тепловое состояние гибридных подшипников качения, смазываемых и охлаждаемых воздушно-топливной смесью. На основании результатов испытаний шарикового радиально-упорного подшипника 45-126205РЯ разработан расчетный метод определения его температурного состояния. Использование данного метода при проектировании перспективных короткоресурсных ГТД с воздушно-топливной системой смазки позволит выбирать оптимальные параметры воздушно-топливной смеси, обеспечивающие работоспособность роторных подшипников двигателя при минимальных расходах воздуха и топлива, отбираемых для их смазки и охлаждения. Это приведет к улучшению характеристик данных двигателей и будет способствовать расширению области их применения.

### Список источников

- Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. В 5 т. Т. 1. Общие сведения. Основные параметры и требования. Конструктивные и силовые схемы. М.: Машиностроение, 2008. 208 с. ISBN 978-5-94275-400-6.
- Ахметов Ю. М., Ахмедзянов Д. А., Михайлова А. Б., Михайлов А. Е. Особенности функционального проектирования газотурбинных двигателей для беспилотных летательных аппаратов // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 3 (56). С. 78–86.

- Бич М. М., Вейнберг Е. В., Сурнов Д. Н. Смазка авиационных газотурбинных двигателей. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
- Schreckling K. Home Built. Model turbines. UK: Traplet Publications Limited, 2005. 101 p. ISBN 1-900371-37-5.
- AMT Netherlands. Products. Overview. Turbines compared. URL: <http://www.amtjets.com/specs.php> (дата обращения: 17.03.2020).
- JetJoe. Products. URL: <http://www.jetjoe.com/cp.html?nowmenuid=52330> (дата обращения: 17.03.2020).
- KingTech turbines. Turbines. URL: <https://www.kingtechturbine.lu/Turbines> (дата обращения: 17.03.2020).
- JetCat. Produkte JetCat PRO Turbinen. URL: <https://www.jetcat.de/en/products/produkte/jetcat/kategorien/professional> (дата обращения: 17.03.2020).
- Климов В. Н., Климов Н. И. Перспективная схема смазки и охлаждения подшипников короткоресурсного газотурбинного двигателя воздушно-топливной смесью // Омский научный вестник. 2017. № 3 (153). С. 39–43.
- Резников М. Е. Авиационные топлива и смазочные материалы (авиационная химмотология) / под ред. А. Г. Крутилина. М.: Военное издательство Министерства обороны России, 2003. 234 с.
- Дубовкин Н. Ф., Маланичева В. Г., Массур Ю. П., Федоров Е. П. Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив. М.: Химия, 1985. 240 с.
- Силаев Б. М. Трибология деталей машин в маловязких смазочных средах: моногр. Самара: Изд-во СГАУ, 2008. 264 с. ISBN 978-5-7883-0564-6.
- Коднир Д. С. Контактная гидродинамика смазки деталей машин. М.: Машиностроение, 1976. 304 с.
- Демидович В. Н. Исследование теплового режима подшипников ГТД. М.: Машиностроение, 1978. 172 с.
- Петров Н. И., Лаврентьев Ю. А. Сравнение различных методик расчета тепловыделения в радиально-упорных шарикоподшипниках // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2018. Т. 17, № 2. С. 154–163. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-154-163.
- Черменский О. Н., Федотов Н. Н. Подшипники качения. Справочник-каталог. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
- Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. Теплотехника. 2-е изд. М.: Высшая школа, 2000. 671 с. ISBN 5-06-003958-7.
- Климов В. Н., Дудьев Д. Я., Сигаило В. Я., Климов Н. И. Особенности испытания воздушно-топливной системы смазки газотурбинного двигателя // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2018. Т. 2, № 4. С. 42–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-42-50.
- Петров Н. И., Лаврентьев Ю. А. Исследование работоспособности гибридных подшипников качения разных конструкций в ожидаемых условиях эксплуатации // Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сб. тр. конф. 2016. Ч. 2. С. 218–219. ISBN 978-5-7883-1084-8.
- Климов В. Н., Дудьев Д. Я., Сигаило В. Я., Климов Н. И., Машков Ю. К. Исследование работоспособности системы смазки и охлаждения роторных подшипников газотурбинного двигателя воздушно-топливной смесью // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2019. Т. 18, № 1. С. 55–66. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-55-66.
- Климов В. Н., Дудьев Д. Я., Сигаило В. Я., Климов Н. И. Повышение эффективности воздушно-топливной системы смазки газотурбинного двигателя // Авиационные двигатели и силовые установки: сб. тр. конф. Москва: ЦИАМ, 2019. С. 21–22.

22. Климов В. Н., Климов Н. И. Исследование работоспособности подшипников роторных опор при запуске газотурбинного двигателя с воздушно-топливной системой смазки // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2018. № 52. С. 16 – 26. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.52.02.

---

**КЛИМОВ Виталий Николаевич**, начальник конструкторской бригады отдела турбин и камер сгорания.

Адрес для переписки:

Klimov-Vitaliy-asp@yandex.ru

**ДУДЬЕВ Дмитрий Яковлевич**, главный конструктор.

**СИГАЙЛО Владимир Яковлевич**, заместитель главного конструктора по малоразмерным ГТД.

**КЛИМОВ Николай Иванович**, начальник отдела маслосистем и зубчатых передач.

Адрес для переписки:

Klimov.nik.omsk@gmail.com

#### Для цитирования

Климов В. Н., Дудьев Д. Я., Сигайло В. Я., Климов Н. И. Определение температурного состояния роторных подшипников газотурбинного двигателя с воздушно-топливной системой смазки // Омский научный вестник. Сер. Авиационно-ракетное и энергетическое машиностроение. 2020. Т. 4, № 2. С. 117 – 128. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-117-128.

Статья поступила в редакцию 07.04.2020 г.

© В. Н. Климов, Д. Я. Дудьев, В. Я. Сигайло, Н. И. Климов

## DETERMINATION OF TEMPERATURE MODE OF ROTARY BEARINGS OF GAS TURBINE ENGINE WITH AIR AND FUEL LUBRICATION SYSTEM

V. N. Klimov, D. Ya. Dud'ev, V. Ya. Sigaylo, N. I. Klimov

Branch of PJSC «UEC Saturn» – OEDB,  
Russia, Omsk, Bogdana Hmel'nitskogo St., 283, 644021

The article is devoted to the problem of choosing the optimal parameters of the air-fuel mixture in gas turbine engines (GTE) with the air-fuel lubrication system. Currently, determining the optimal parameters of the air-fuel mixture is significantly complicated by the inability to calculate the temperature mode of the bearings. The main specific characteristics of the gas turbine engine significantly depend on the amount of air and fuel taken from the flow part and the fuel line of the engine. Therefore, determining the dependence of the bearing temperature on their operating conditions (parameters of the air-fuel mixture and operating modes) is an urgent task.

The purpose of this work is to develop a method for determining the temperature of a bearing that is lubricated and cooled by an air-fuel mixture.

The paper analyzes the thermal state of bearings installed in the rotor supports of a gas turbine engine with an air-fuel lubrication system. On the basis of the test results of hybrid ball radial thrust bearings 45-126205PЯ the dependences of the friction moment and the coefficient of convective heat transfer on the parameters of the air-fuel mixture and operating modes are determined. A method for calculating the temperature of a bearing that is lubricated and cooled by an air-fuel mixture has been developed. The use of the obtained results in the design of promising short-life gas turbine engines with air-fuel lubrication system will lead to improved engine performance and will contribute to expanding the scope of its application.

**Keywords:** gas turbine engine, air-fuel mixture, lubrication system, method, bearing temperature.

### References

1. Inozemtsev A. A., Nikhamkin M. A., Sandratskiy V. L. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok. V 5 t. T. 1. Obshchiye svedeniya. Osnovnyye parametry i trebovaniya. Konstruktivnyye i silovyye skhemy [Fundamentals of designing aircraft engines and power plants. In 5 vols. Vol. 1. General information. Key parameters and requirements. Constructive and power schemes]. Moscow, 2008. 208 p. ISBN 978-5-94275-400-6. (In Russ.).
2. Akhmetov Yu. M., Akhmedzyanov D. A., Mikhailova A. B., Mikhailov A. E. Osobennosti funktsional'nogo proyektirovaniya gazoturbinnnykh dvigateley dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov [Functional design features of gas turbine engines for unmanned aerial vehicles] // Vestnik UGATU. *Vestnik USATU*. 2013. Vol. 17, no. 3 (56). P. 78–86. (In Russ.).
3. Bich M. M., Veynberg E. V., Surnov D. N. Smazka aviatsionnykh gazoturbinnnykh dvigateley [Lubrication of aircraft gas turbine engines]. Moscow, 1979. 176 p. (In Russ.).
4. Schereckling K. Home Built. Model turbines. UK: Traplet Publications Limited, 2005. 101 p. ISBN 1-900371-37-5. (In Engl.).
5. AMT Netherlands. Products. Overview. Turbines compared. URL: <http://www.amtjets.com/specs.php> (accessed: 17.03.2020). (In Engl.).
6. JetJoe. Products. URL: <http://www.jetjoe.com/cp.html?nowmenuid=52330> (accessed: 17.03.2020). (In Engl.).
7. KingTech turbines. Turbines. URL: <https://www.kingtechturbine.lu/Turbines> (accessed: 17.03.2020). (In Engl.).
8. JetCat. Produkte JetCat PRO Turbinen. URL: <https://www.jetcat.de/en/products/produkte/jetcat/kategorien/professional> (accessed: 17.03.2020). (In Engl.).
9. Klimov V. N., Klimov N. I. Perspektivnaya skhema smazki i okhlazhdeniya podshipnikov korotkoresurnogo gazoturbinnogo dvigatelya vozdušno-toplivnoy smes'yu [Promising lubrication and cooling scheme for small resource GTE bearings by air-fuel mixture] // Omskiy nauchnyy vestnik. *Omsk Scientific Bulletin*. 2017. No. 3 (153). P. 39–43. (In Russ.).
10. Reznikov M. E. Aviatsionnyye topliva i smazochnyye materialy (aviatsionnaya khimotologiya) [Aviation fuels and lubricants (aviation chemistry)] / Ed. A. G. Krutinin. Moscow, 2003. 234 p. (In Russ.).
11. Dubovkin N. F., Malanicheva V. G., Massur Yu. P., Fedorov E. P. Fiziko-khimicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva reaktivnykh topliv [Physicochemical and operational properties of jet fuels]. Moscow, 1985. 240 p. (In Russ.).
12. Silayev B. M. Tribologiya detaley mashin v malovyazkikh smazochnykh sredakh [Tribology of machine parts in low-viscosity lubricating media]. Samara, 2008. 264 p. ISBN 978-5-7883-0564-6. (In Russ.).
13. Kodnir D. S. Kontaktnaya gidrodinamika smazki detaley mashin [Contact hydrodynamics of machine parts lubrication]. Moscow, 1976. 304 p. (In Russ.).
14. Demidovich V. N. Issledovaniye teplovogo rezhima podshipnikov GTD [Investigation of the thermal regime of gas turbine engine bearings]. Moscow, 1978. 172 p. (In Russ.).
15. Petrov N. I., Lavrentyev Yu. L. Sravneniye razlichnykh metodik rascheta teplovydeleniya v radial'no-upornykh sharikopodshipnikakh [Comparison of heat generation estimation methods for angular contact ball bearings] //

Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2018. Vol. 17, no. 2. P. 154–163. DOI: 10.18287/2541-7533-2018-17-2-154-163. (In Russ.).

16. Chermenskiy O. N., Fedotov N. N. Podshipniki kacheniya. Spravochnik-katalog [Rolling bearings. Directory]. Moscow, 2003. 576 p. (In Russ.).

17. Lukanin V. N., Shatrov M. G., Kamfer G. M. Teplo tekhnika [Heat engineering]. 2nd ed. Moscow, 2000. 671 p. ISBN 5-06-003958-7. (In Russ.).

18. Klimov V. N., Dud'ev D. Ya., Sigaylo V. Ya., Klimov N. I. Osobennosti ispytaniya vozdušno-toplivnoy sistemy smazki gazoturbinnogo dvigatelya [Features of test of air-fuel system of gas turbine engine] // Omskiy nauchnyy vestnik. Ser. Aviatsionno-raketnoye i energeticheskoye mashinostroyeniye. *Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering*. 2018. Vol. 2, no. 4. P. 42–50. DOI: 10.25206/2588-0373-2018-2-4-42-50. (In Russ.).

19. Petrov N. I., Lavrentyev Yu. L. Issledovaniye rabotosposobnosti gibridnykh podshipnikov kacheniya raznykh konstruktivnykh v ozhidayemykh usloviyakh ekspluatatsii [Analysis of different design hybrid rolling bearings efficiency in expected service conditions] // Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroyeniya. *Problemy i Perspektivy Razvitiya Dvigatelayev*. 2016. Part. 2. P. 218–219. ISBN 978-5-7883-1084-8. (In Russ.).

20. Klimov V. N., Dud'ev D. Ya., Sigaylo V. Ya., Klimov N. I., Mashkov Yu. K. Issledovaniye rabotosposobnosti sistemy smazki i okhlazhdeniya rotornykh podshipnikov gazoturbinnogo dvigatelya vozdušno-toplivnoy smes'yu [Research of the operability of an air-fuel lubrication and cooling system of gas turbine engine rotor bearings] // Vestnik Samarskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika, tekhnologii i mashinostroyeniye. *Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2019. Vol. 18, no. 1. P. 55–66. DOI: 10.18287/2541-7533-2019-18-1-55-66. (In Russ.).

21. Klimov V. N., Dud'ev D. Ya., Sigaylo V. Ya., Klimov N. I. Povysheniye effektivnosti vozdušno-toplivnoy

sistemy smazki gazoturbinnogo dvigatelya [Improving the efficiency of the air-fuel lubrication system of a gas turbine engine] // Aviatsionnyye dvigateli i silovyye ustanovki. *Aviatsionnyye Dvigateli i Silovyye Ustanovki*. 2019. Moscow. P. 21–22. (In Russ.).

22. Klimov V. N., Klimov N. I. Issledovaniye rabotosposobnosti podshipnikov rotornykh opor pri zapuske gazoturbinnogo dvigatelya s vozdušno-toplivnoy sistemoy smazki [Research of working capacity of bearings of rotor supports at start-up of a gas-turbine engine with an air-fuel lubrication system] // Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika. *PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*. 2018. No. 52. P. 16–26. DOI: 10.15593/2224-9982/2018.52.02. (In Russ.).

---

**KLIMOV Vitaliy Nikolayevich**, Head of the Design Team of Turbines and Combustion Chambers Department.

Address for correspondence:

Klimov-Vitaliy-asp@yandex.ru

**DUD'EV Dmitriy Yakovlevich**, Chief Designer.

**SIGAYLO Vladimir Yakovlevich**, Deputy Chief Designer for small-size GTE.

**KLIMOV Nikolay Ivanovich**, Head of Oil Systems and Gears Department.

Address for correspondence:

Klimov.nik.omsk@gmail.com

#### For citations

Klimov V. N., Dud'ev D. Ya., Sigaylo V. Ya., Klimov N. I. Determination of temperature mode of rotary bearings of gas turbine engine with air and fuel lubrication system // Omsk Scientific Bulletin. Series Aviation-Rocket and Power Engineering. 2020. Vol. 4, no. 2. P. 117–128. DOI: 10.25206/2588-0373-2020-4-2-117-128.

Received April 7, 2020.

© V. N. Klimov, D. Ya. Dud'ev, V. Ya. Sigaylo, N. I. Klimov