

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ, ПОКРЫТИЙ И ДРУГИХ ВИДОВ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОСНОВНЫХ ДЕТАЛЕЙ И СБОРОЧНЫХ ЕДИНИЦ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Кишалов А. Е.¹, Маркина К. В.¹, Игнатьев О. И.¹

¹*ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Республика Башкортостан, Россия (450000, Уфа, ул. К. Маркса, 12), e-mail: kishalov@ufanet.ru*

Описываются результаты экспериментальной проверки работоспособности разработанной экспертной системы и базы данных для автоматизированного выбора материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности основных деталей и сборочных единиц проточной части авиационных газотурбинных двигателей. Рассматриваются результаты подбора материала основных узлов ТРДДФсм: входного устройства, компрессоров и турбин низкого и высокого давлений, основной и форсажной камер сгорания, реактивного сопла. Приводятся результаты моделирования на различных режимах полёта – на земле (высота полёта 0, число Маха полёта 0) и в полёте на высоте 2,5 км с числом Маха 2,35. Приводятся результаты выбора различных покрытий и других видов подготовки поверхности для основных деталей проточной части двигателя. Полученные результаты сравниваются с материалами конструкции ТРДДФсм четвертого поколения.

Ключевые слова: авиационные двигатели, экспертная система, база данных, авиационные материалы.

EXPERIMENTAL CHECK OF EXPERT SYSTEM FUNCTIONALITY FOR AUTOMATED SELECTION OF MATERIALS, COATINGS AND OTHER PREPARATION TYPES OF THE MAIN SURFACE PARTS AND AVIATION GAS TURBINE ENGINE ASSEMBLIES

Kishalov A. E.¹, Markina K. V.¹, Ignatev O. I.¹

¹*«Ufa state aviation technical university», Ufa, Republic Bashkortostan (450000, Ufa, K. Marksa str., 12), e-mail: kishalov@ufanet.ru*

This article describes results of experimental functionality check of the developed expert system and database for automated selection of materials, coatings and other preparation types of the main surface parts and assemblies of aviation gas turbine engine air-gas channel. The choice materials results of the main elements of two spool mixed flow turbofan engine are considered: input unit, compressors and high and low pressure turbines, combustion chamber and afterburner, jet nozzle. The simulation of different flight regimes results are shown – on the ground (flight altitude is 0, flight Mach number is 0) and on the flight altitude 2.5 km with Mach number 2.35. The selection results of different coatings and other preparation types of the main surface parts and engine air-gas channel assemblies are shown. Findings are compared with materials of two spool mixed flow turbofan engine of the fourth generation construction.

Keywords: aviation engines, expert system, database, aviation materials.

Введение

Для современных авиационных воздушно-реактивных двигателей важным является высокий уровень абсолютных и удельных параметров – большие значения тяги, низкие расходы топлива, высокая удельная тяга, высокая лобовая производительность, низкий удельный вес. Высокие значения параметров возможно достичь, применяя на всех стадиях жизненного цикла современные компьютерные технологии проектирования.

Разработанная авторами экспертная система (ЭС) и база данных (БД) позволяют выполнять термогазодинамические расчёты авиационных двигателей различных схем, создавать конструктивный облик его основных узлов, оценивать нагрузки, действующие на

элементы проточной части двигателя и их температуры, выполнять приближенные прочностные расчёты. На основании этих данных формируется список из пяти материалов, наиболее подходящих для использования в элементах конструкции. Для первого материала выдаются рекомендации по различным видам обработки, покрытия и других видов подготовки поверхности [4, 5].

Целью данного исследования является проверка работоспособности разработанной экспертной системы и базы данных на примере моделирования турбореактивного двухконтурного двигателя с форсажной камерой со смешением потоков (ТРДДФсм) четвёртого поколения.

Моделирование ТРДДФсм

На рис. 1 представлена топологическая схема ТРДДФсм в разработанной ЭС. Топологическая модель двигателя представляется набором структурных элементов (СЭ), моделирующих основные узлы двигателя (СЭ 1 – 13), СЭ для прочностного анализа (СЭ 15, 18), СЭ для обращения к БД и подбора материала (СЭ 14, 16, 17, 19 – 21).

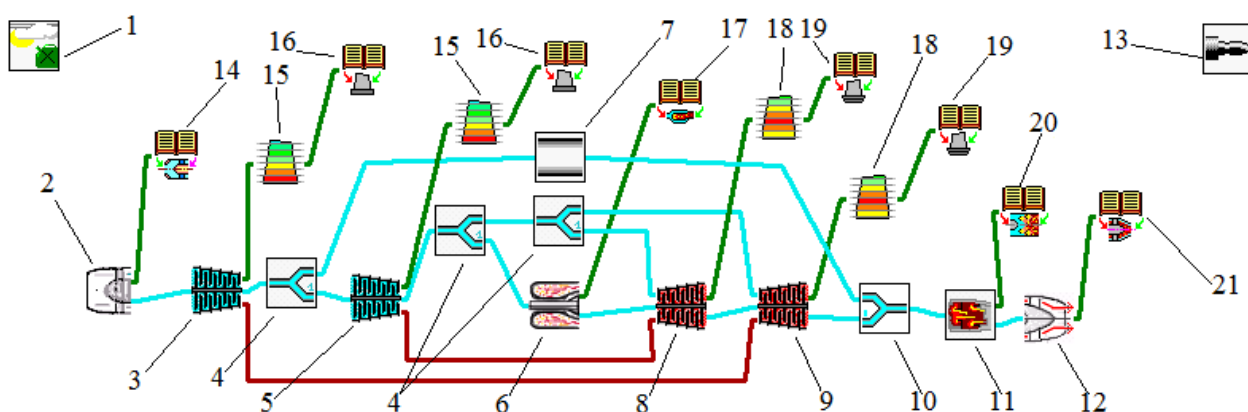


Рис. 1. Топологическая модель ТРДДФсм в ЭС для выбора материала, покрытия и других видов подготовки поверхности, где 1 – СЭ начальные условия; 2 – СЭ входное устройство; 3 – СЭ КНД; 4 – СЭ отбор воздуха; 5 – СЭ КВД; 6 – СЭ КС; 7 – СЭ канал; 8 – СЭ ТВД; 9 – СЭ ТНД; 10 – СЭ смеситель; 11 – СЭ ФК; 12 – СЭ реактивное сопло; 13 – СЭ общие результаты; 14 – СЭ для выбора материала входного устройства; 15 – СЭ для прочностного анализа рабочих лопаток компрессора; 16 – СЭ для выбора материала для рабочих лопаток компрессора; 17 – СЭ для выбора материала корпуса и жаровой трубы КС; 18 – СЭ для прочностного анализа рабочих лопаток турбины; 19 – СЭ для выбора материала рабочих лопаток турбины; 20 – СЭ для выбора материала корпуса и теплозащитных экранов ФК; 21 – СЭ для выбора материалов выходного устройства

На рис. 2 представлены результаты моделирования входного устройства ТРДДФсм на взлётном режиме (высота $H = 0$, число M полёта 0). На рис. 3 представлены результаты моделирования на полётном режиме на высоте $H = 2,5$ км и $M = 2,35$. В обоих вариантах моделирования рекомендуется использовать магниевые сплавы.

Список рекомендуемых материалов				Мероприятия, повышающие стойкость материала №1 к воздействию среды:
Место	Порядковый номер материала в БД	Сумма баллов	Материал	
1	153	4.92	ВМЛ17-Т61	Радиопоглощающее покрытие Гидрофобное нанопокрывтие Антиабразивные покрытия на основе полиуретановых и полимочевинных эластомеров Оксидирование Хромирование Никелирование
2	146	4.91	МЛ8-Т6	
3	154	4.91	WE54(Англия)	
4	152	4.90	ВМЛ14-Т61	
5	149	4.89	ZK61(США)	

<p><u>Рекомендуемые режимы обработки поверхности:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - литьё в песчаные формы (Ra=100) - точение/фрезерование (Ra=12.5 - 0.4) - обтачивание чистовое (Ra=20 - 1.25) - шлифование предварительное (Ra=2.5 - 1.25) - электроэрозсионная обработка (Ra=3.2 - 0.4) 	<p><u>Рекомендуемые варианты ППД:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - дробеструйная обработка - пневмодинамическая обработка - пескоструйная обработка - обработка роликами и шариками - упрочнение микрошариками - выглаживание - алмазное выглаживание - обработка механической щёткой - виброупрочнение
	<ul style="list-style-type: none"> - виброшлифование - галтовка - гидрогалтовка - дронование - накатывание - чеканка

Рис. 2. Результаты работы ЭС для входного устройства при $H = 0$, $M = 0$

Список рекомендуемых материалов				Мероприятия, повышающие стойкость материала №1 к воздействию среды:
Место	Порядковый номер материала в БД	Сумма баллов	Материал	
1	154	4.91	WE54(Англия)	Радиопоглощающее покрытие Гидрофобное нанопокрывтие Антиабразивные покрытия на основе полиуретановых и полимочевинных эластомеров Оксидирование Хромирование Никелирование
2	153	4.91	ВМЛ17-Т61	
3	152	4.84	ВМЛ14-Т61	
4	151	4.84	МЛ19-Т6	
5	112	3.53	ВАЛ18	

<p><u>Рекомендуемые режимы обработки поверхности:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - шлифование тонкое (Ra=0.32 - 0.16) - притирка тонкая (Ra=0.16 - 0.01) - суперфиниширование (Ra=0.16 - 0.04) - доводка тонкая (Ra=0.05) - алмазное выглаживание (Ra=0.16 - 0.02) - электролитно-плазменное полирование (Ra=0.06 - 0.04) - электрохимическая обработка (Ra=0.32 - 0.02) - полирование (Ra=0.16) - глянецвание (Ra=0.16) 	<p><u>Рекомендуемые варианты ППД:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - дробеструйная обработка - пневмодинамическая обработка - пескоструйная обработка - обработка роликами и шариками - упрочнение микрошариками - выглаживание - алмазное выглаживание - обработка механической щёткой - виброупрочнение
	<ul style="list-style-type: none"> - виброшлифование - галтовка - гидрогалтовка - дронование - накатывание - чеканка

Рис. 3. Результаты работы ЭС для входного устройства при $H = 2,5$ км, $M = 2,35$

При выборе материала для рабочих лопаток компрессора и турбины выполняется профилирование узла и расчёт статической прочности [2]. Результаты моделирования компрессоров и турбин и их сравнение с конструкцией ТРДДФсм приведены в табл. 1 и 2. При этом следует учесть, что на 1–3 ступенях КНД выполнены antivибрационные полки, на ТВД выполнена бандажная полка. Относительные толщины рабочих лопаток компрессора на среднем диаметре выбраны в пределах 5,5–7,5 %. Относительные толщины охлаждаемых рабочих лопаток турбины на среднем диаметре выбраны в пределах 11–13 %.

Система охлаждения рабочих лопаток турбин – конвективно-плёночная. Моделирование выполнялось для взлётного режима.

Таблица 1

Результаты моделирования компрессоров ТРДДФсм 4-го поколения

Узел	Номер ступени	Конструкция ТРДДФсм 4-го поколения				Материал РЛ	Результат моделирования					
		Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Число РЛ	Хорда на среднем диаметре, мм		Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Число РЛ	Хорда на среднем диаметре, мм	Относительная максимальная толщина профиля на среднем диаметре, %	Предлагаемые варианты материала РЛ
КНД	1	893,3	365	37	69,4	ВТ-3-1	892,9	364,3	33	54,2	7,5	ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-5Л; ВТ5-1; ВТ-6
	2	837,6	551	45	57,8		845,3	411,9	45	53,1	7,5	ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-9, ВТ-18; ВТ-22
	3	779,8	494,4	57	46,4		801,2	456	55	40,4	7,5	ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-9, ВТ-18; ВТ-22
	4	778,3	512	43	52,0		768,5	488,7	43	49,0	6,5	ВТ-6; ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-4; ВТ-5Л
КВД	1	600	409	47	30,4	ВТ-3-1	600,1	409	46	26,2	6,5	ВТ-6; ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-4; ВТ-5
	2	600	444,2	62	27,2		600,1	443,2	62	26,7	6,5	ВТ-6; ВТ-20; ВТ3-1; ВТ-5; ВТ-5Л
	3	600	474	73	26,8	ВТ-18	600,1	474,7	70	25,6	5,5	ВТ-18; ВТ-22; ВТ-6; ВТ-20; ВТ3-1
	4	600	500	94	22,4		600,1	497,0	85	19,4	6,5	ВТ-9; ВТ-18; ВТ-22; ВТ-6; ВТ-20
	5	600	520	99	20,2		600,1	513,5	95	17,4	6,5	ВТ-9; ВТ-18; ВТ-22; ВТ-6; ВТ-20
	6	600	532	101	18,8	ЭП-718ИД	600,1	526,1	106	15,6	5,5	ВТ-8; ВТ-25; ЭП517; ЖС26ВСНК; ВЖ172
	7	600	542	103	16,4		600,1	535,9	102	16,3	5,5	ВТ-18; ВТ-25; ВЖ175; ВЖ175У; ВКЛС20
	8	600	548	105	16,2		600,1	543,7	108	15,5	5,5	
	9	600	553	107	16,6		600,1	550	109	13,9	5,5	

При моделировании компрессора и турбины значения приведённых скоростей выбирались, исходя из площади сечений на входе и выходе из узлов ТРДДФсм. Задавались относительные диаметры втулки на входе в узел, количество ступеней, количество сверхзвуковых ступеней. Выбирался закон профилирования проточной части и закон профилирования по высоте, близкий к использованному в ТРДДФсм. При моделировании ЭС делит работы и КПД по ступеням, определяет геометрические, термогазодинамические и кинематические параметры каждой ступени. Моделирование выполнялось для взлётного режима.

Результаты моделирования камеры сгорания и форсажной камеры приведены в табл. 3.

Таблица 2

Результаты моделирования турбин ТРДДФсм 4-го поколения

Узел	Конструкция ТРДДФсм 4-го поколения						Результат моделирования					
	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Число РЛ	Хорда на среднем диаметре, мм	Материал РЛ	Покрытие	Наружный диаметр, мм	Внутренний диаметр, мм	Число РЛ	Хорда на среднем диаметре, мм	Предлагаемые варианты материала РЛ	Предлагаемые варианты покрытий для материала №1
ТВД	730,0	620,0	90	34,2	ЖС-32	Алитирование, NiCrAlY	728,8	618,8	89	32,7	ЖС6У; ЖС32ВНК; ЖС6-КП; ЖС6К; ЭП874	Алитирование; Хромоалитирование; Хромосилицирование; КХП-Н; ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ ; Ni-Co-Cr-Al-Y; (Ni, Co, Fe)-Cr-Al-Y
ТНД	735,4	603,0	90	35,5	ЖС-6У	ЖС-6У	735,5	603,1	79	32,2	ЭИ618; ЖС6-КП; ЖС6К; ЖС6У; ЖС6Ф	Цементация; Алитирование; Хромоалитирование; Хромосилицирование; КХП-Н; ZrO ₂ -Y ₂ O ₃ ; Ni-Co-Cr-Al-Y; (Ni, Co, Fe)-Cr-Al-Y

Таблица 3

Результаты моделирования камеры сгорания и форсажной камеры ТРДДФсм 4-го поколения

Узел	Элемент	Конструкция ТРДДФсм 4-го поколения		Результат моделирования	
		Материал	Покрытие	Предлагаемые варианты материала	Предлагаемые варианты покрытий для материала №1
КС	ЖТ	ЭП-648	ВКНП-5	ЭП-648, ВЖ155, ВЖ159, ЭИ618, ВЖЛ12У	Эмаль ЭВ-55, Алитирование, Хромоалитирование, Хромосилицирование, КХП-Н, Al ₂ O ₃ , ZnO ₂ -Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃ , Ni-Cr-Co-Al-Y
	Корпус	ХН62ВМЮТ-ВД (ЭП-718)	-	ЭП718, ЭП-648, ВЖЛ8, ЭИ969А, ЭИ618	Цементация, Нитроцементация, Алитирование, Хромоалитирование, Хромосилицирование, Нанесение нитрида Ti, Mo, V, ПГЮ-10Н, КХП-Н, Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃ , Ni-Cr-Co-Al-Y, ZnO ₂ -Y ₂ O ₃ , Искровое упрочнение, Микродуговое оксидирование, Ионная имплантация
ФКС	ЖТ	ЭП-99	-	ВЖЛ12У, ЭП-648, ВЖ155, ВЖ159, ЭИ868	Эмаль ЭВ-55, Al ₂ O ₃ , ZnO ₂ -Y ₂ O ₃ , ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃ , Ni-Cr-Co-Al-Y
	Корпус	ВТ-20	-	ВТ-18, ВТ-9, ЖС-30, ВТ3-1, ВТ-20	Альфирование, Никелирование, Азотирование, Анодирование, Нанесение нитрида Ti, Mo, V

При моделировании камеры сгорания необходимо задавать коэффициент избытка воздуха в первичной зоне горения [3]. При моделировании камеры сгорания и форсажной камеры ЭС определяет температуру газа в первичной зоне, количество воздуха, идущего на

охлаждение жаровой трубы (ЖТ), определяет температуры ЖТ и корпуса. Моделирование выполнялось для взлётного режима.

При моделировании выходного устройства ТРДДФсм, в данном случае – реактивного сопла (РС), ЭС определяет, какой тип сопла моделируется (сопло Лаваля, суживающееся, сопло-патрубок; с теплозащитными экранами или без них и т.п.). Для моделирования необходимо задавать эффективность охлаждения (в данном случае принято 0,5). В результате расчёта ЭС определяет температуру корпуса (для суживающегося сопла в схеме двигателя без форсажной камеры или для сопла патрубка) или температуру створок (для суживающегося или сопла Лаваля в схемах с форсажной камерой). Результаты моделирования реактивного сопла приведены на рис. 4. Моделирование выполнялось для взлётного режима.

Список рекомендуемых материалов				<u>Мероприятия, повышающие стойкость материала №1 к воздействию среды:</u>	
Место	Порядковый номер материала в БД	Сумма баллов	Материал	Радиопоглощающее покрытие Al ₂ O ₃ , ZrO ₂ -8Y ₂ O ₃ Ni-Cr-Co-Al-Y-ZrO ₂ -Y ₂ O ₃	
1	26	3.56	ВЖЛ12У	Искровое упрочнение	
2	81	3.07	ЗИ652	Микродуговое оксидирование	
3	97	3.06	ВКНА-4У	Ионная имплантация	
4	98	3.06	ВКНА-4УР		
5	96	3.04	ВКНА-1В		

<p><u>Рекомендуемые режимы обработки поверхности:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - литьё в кокиль (Ra=25) - обтачивание тонкое (Ra=1.25 - 0.32) - шлифование чистовое (Ra=0.63 - 0.32) - притирка грубая (Ra=0.63 - 0.32) - отделка абразивным полотном (Ra=0.63 - 0.08) - доводка (Ra=0.4 - 0.1) - виброшлифование (Ra=0.63 - 0.32) - электрополирование (Ra=1.25 - 0.63) 	<p><u>Рекомендуемые варианты ППД:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - дробеструйная обработка - пневмодинамическая обработка - пескоструйная обработка - обработка роликами и шариками - упрочнение микрошариками - выглаживание - алмазное выглаживание - обработка механической щёткой - виброупрочнение 	<ul style="list-style-type: none"> - виброшлифование - галтовка - гидрогалтовка - дронование - накатывание - чеканка
--	--	--

Рис. 4. Результат работы ЭС для РС

Как можно видеть из приведённых результатов моделирования, для входного устройства ЭС предложила в основном материалы из магниевых сплавов, у которых достаточная степень прочности и низкий вес (рабочие температуры материала выше, чем температуры на этих режимах). При моделировании лопаточных машин можно заметить, что материалы, использованные в конструкции ТРДДФсм, находятся в списке предлагаемых ЭС материалов. Относительная погрешность ЭС при расчёте внутреннего и наружного диаметров лежит в пределах 0,02–1,25 %. При моделировании второй ступени КНД относительная погрешность составила 25 %, что объясняется отклонением закона профилирования проточной части ступени от общего закона профилирования проточной части компрессора. Относительная

погрешность ЭС при моделировании числа лопаток в ступени достигает 10 %. Относительная погрешность ЭС при определении хорды на среднем диаметре рабочих лопаток 0,6–14 %. Относительная погрешность при определении хорды на рабочей лопатки первой сверхзвуковой ступени составила 21,9 %, что объясняется отклонением конструкции и законов профилирования ТРДДФсм от заложенных в ЭС [1, 6].

При моделировании камеры сгорания и форсажной камеры материалы и покрытия, использованные в конструкции ТРДДФсм, находятся в списке рекомендуемых материалов ЭС (или там предлагаются их аналоги).

При моделировании выходного устройства ЭС предложила различные сплавы на никелевой основе (исходя из рабочей температуры материала и прочности), которые являются аналогами или имеют схожие характеристики с применённым в конструкции РС материалом.

Выводы

Для проверки работоспособности экспертной системы и базы данных выполнено моделирование ТРДДФсм, произведено сравнение с материалами и покрытиями, использованными в его конструкции. Как показывают результаты проверки, в основном ЭС выдаёт результаты моделирования, близкие к реальной конструкции ТРДДФсм, предлагает материалы и покрытия, использованные в реальной конструкции (или их аналоги). Относительная погрешность в определении диаметров лопаточных машин – порядка 1,25 % (кроме второй ступени КНД), в определении числа лопаток – достигает 10 %, в определении хорды на среднем диаметре – достигает 14 % (кроме первой ступени КНД). С учётом того, что предлагаемая ЭС конструкция и варианты материалов, покрытий и других видов подготовки поверхности носят оценочный и предварительный характер. На дальнейших этапах проектирования двигателя выполняются уточняющие расчёты, конструкция узлов уточняется.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение 14.В37.21.1848.

Список литературы

1. Емин О. Н. Выбор параметров и газодинамический расчёт компрессоров и турбин авиационных ГТД: Учебное пособие / О. Н. Емин, В. Н. Карасев, Ю. А. Ржавин – М.: «Дипак», 2003. – 156 с.

2. Кишалов А. Е. Анализ нагрузок, действующих на элементы конструкции ГТД / А. Е. Кишалов, В. М. Кудоярова, К. В. Маркина, О. И. Игнатъев // Молодой ученый, Чита, 2012. – Т. 1. № 11 (46). – С. 52–60.
3. Кишалов А. Е. Обзор и анализ параметров потока в основных узлах авиационных двигателей / А. Е. Кишалов, Д. А. Ахмедзянов, Ю. А. Шабельник, К. В. Маркина, Н. И. Полежаев // Молодежный Вестник УГАТУ. Ежемесячный научный журнал № 4 (5), Уфа: УГАТУ. – 2012. – С. 25–36.
4. Кишалов А. Е. Обзор и анализ существующих баз данных и экспертных систем принятия решения по выбору материала основных элементов конструкции / А. Е. Кишалов, Ю. А. Шабельник, К. Е. Рожков, А. А. Шамсутдинов // Молодой ученый, Чита, 2012. – Т. 1. – № 11. (46). – С. 49–52.
5. Кишалов А. Е. Экспертная система по выбору материала, покрытия и других видов подготовки поверхности элементов основных узлов авиационного ГТД / А. Е. Кишалов, Д. А. Ахмедзянов, К. В. Маркина // Молодежный Вестник УГАТУ. Ежемесячный научный журнал № 4 (5), Уфа: УГАТУ. – 2012. – С. 17–25.
6. Холщевников К. В. Теория и расчёт авиационных лопаточных машин: Учебник для студентов вузов по специальности «Авиационные двигатели» / К. В. Холщевников, О. Н. Емин, В. Т. Митрохин – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

Рецензенты:

Ахмедзянов Д. А., д-р техн. наук, профессор кафедры авиационных двигателей факультета авиационных двигателей, ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.

Бакиров Ф. Г., д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой авиационной техники и теплоэнергетики факультета авиационных двигателей ФГБОУ ВПО УГАТУ, г. Уфа.