

УДК 621.438-226.001.63

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПУСТОТЕЛЫХ ДИСКОВ ТУРБИН И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

А. В. Сальников<sup>1</sup>, Б. Е. Васильев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>salnikov@ciam.ru, <sup>2</sup>b\_vasilyev@ciam.ru

ФГУП «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова» (ЦИАМ)

Поступила в редакцию 07.06.2017

**Аннотация.** Приведены результаты анализа эффективности применения пустотелых дисков турбин (дисков с двумя полотнами). Расчетные исследования проведены для трех типовых дисков с разными габаритными размерами и условиями работы с использованием параметризованных моделей и методов многокритериальной оптимизации. Продемонстрированы величины выигрыша в массе и характеристиках прочности для каждого из типовых дисков. Рассмотрены и проанализированы достоинства и недостатки различных способов изготовления пустотелых дисков, которые условно можно поделить на два класса: традиционные методы и методы, основанные на применении аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** пустотелый диск; турбина; оптимизация; минимизация массы, производство дисков.

### ВВЕДЕНИЕ

Улучшение характеристик прочности дисков и снижение их массы возможно вследствие оптимизации их конструктивного облика, применения новых материалов и/или использования новых конструктивно-технологических решений.

Одним из таких решений является диск с двумя полотнами (пустотелый диск). Различные варианты, способы изготовления и применения пустотелых дисков рассмотрены во множестве работ и патентов [1–3]. Несколько вариантов пустотелых дисков приведены на рис. 1.

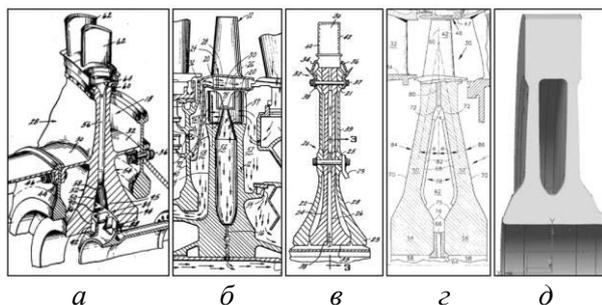


Рис. 1. Различные варианты пустотелой конструкции диска ТВД

Проведенный авторами данной статьи анализ показал, что целью внедрения пустотелой конструкции для большей части вариантов является изменение организации подвода охлаждающего воздуха в лопатку (варианты *а*, *б*, *в* и *з*): через ступицу (отверстия или полости), далее по полости между полотнами, потом через вертикальные отверстия в ободе. Однако, прочностная проработка данных вариантов не была проведена. Наличие отверстий в ступице и ободе приводит к возникновению концентраторов напряжений, которые значительно снижают статическую и циклическую прочность диска.

Одним из преимуществ перехода к пустотелой конструкции является снижение массы диска [4, 5] за счет разделения полотна на две части и их оптимального расположения вдоль обода (варианты *з* и *д*). Из-за этого контурная нагрузка равномерней передается на ступицу, что позволяет уменьшить ее габариты, а значит, снизить массу рабочего колеса в целом. Дополни-

тельные возможные преимущества, такие как, например, повышение выявляемости дефектов в тонких полотнох пустотелых дисков, в данной работе не рассматривались.

Поиск оптимальной конфигурации полотно и полости между ними является сложной и трудоемкой задачей, качественно решить которую можно только используя автоматизированные подходы к проектированию [4]: параметризация применяемых конечно-элементных моделей (КЭМ) и поиск оптимальной конструкции при помощи современных методов многокритериальной оптимизации [6].

Проблемой, препятствующей широкому внедрению пустотелых дисков, является необходимость разработки способов их изготовления вследствие наличия полости.

Целью данной работы является расчетное исследование эффективности применения пустотелых дисков с точки зрения снижения уровня напряжений и уменьшения массы, а также анализ возможности изготовления таких дисков.

### ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПУСТОТЕЛОЙ КОНСТРУКЦИИ

Для оценки эффективности использования пустотелой конструкции применяется следующая последовательность действий:

1. Для каждой из сравниваемых конструктивных схем (стандартная и пустотелая) разрабатывается своя схема параметризации: реальная конструкция упрощается и представляется в виде набора размеров.

2. Выбираются характеристики диска, по которым будет проводиться оценка эффективности (условие минимизации массы и условие максимизации циклической долговечности).

3. Разрабатываются параметризованные осесимметричные КЭМ, которые используются для анализа характеристик прочности и массы стандартной и пустотелой конструкции диска.

4. Решается задача многокритериальной оптимизации конструкции диска стандартной и пустотелой конфигурации.

5. Проводится анализ и сравнение Парето множеств, полученных в результате оптимизации. Делаются выводы об эффективности использования пустотелой конструкции.

Предложенный подход дает возможность оценить пустотелую конструкцию диска, так как поиск оптимальных конструкций проводится с использованием методов конечного элемента и многокритериальной оптимизации IOSO – технологии многомерной нелинейной оптимизации, использующей алгоритмы на основе самоорганизации и регрессионные модели [7]. Принципиальная схема автоматизированного проектирования приведена на рис. 2. В модуле оптимизации создается вектор варьируемых параметров и запускается модуль модификации и анализа используемой расчетной модели, в котором проводятся необходимые вычисления и формируется вектор выходных параметров. На базе полученных результатов с учетом используемых алгоритмов поиска создается новый вектор варьируемых параметров. Начинается следующая итерация оптимизации. Процесс поиска завершается при удовлетворении всех критериев и ограничений с заданной точностью или при превышении заданного количества итераций.



Рис. 2. Обобщенная блок-схема задачи оптимизации

### ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для полноценного анализа преимуществ и недостатков пустотелой конструкции исследования проводятся на трех типовых дисках турбин с разными габаритными размерами и условиями работы (табл. 1):

- №1 – диск большой размерности низкооборотной турбины;
- №2 – диск средней размерности турбины со средней скоростью вращения;
- №3 – диск малой размерности высокооборотной турбины.

Габаритные размеры исследуемых дисков приведены на рис. 3. Условия работы дисков приведены в табл. 1. Центробежная сила от лопаток и выступов дисков заменяется эквивалентным давлением ( $S_{rb}$ ), которое прикладывается к ободу. Тепловое состояние диска определяется на базе граничных условий I рода, которые прикладываются к ступице и ободу дисков. Материал дисков – никелевый сплав ЭП741НП.

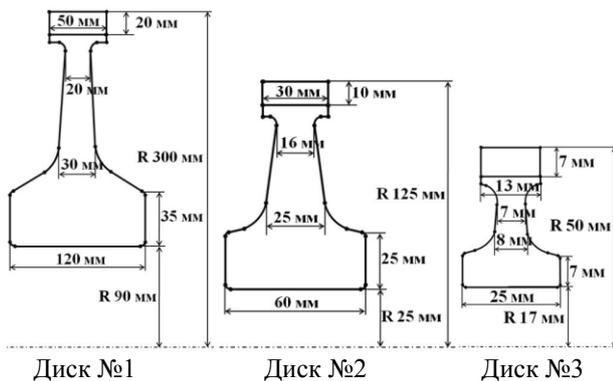


Рис. 3. Объекты оптимизации

Таблица 1

Параметры дисков			
	Диск №1	Диск №2	Диск №3
$n$ , об/мин	13 380	30 000	65 000
$S_{rb}$ , МПа	165	180	190
$T$ ступица, °С	250	100	180
$T$ обод, °С	650	530	650
Диаметр, мм	600	250	100

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ

При проектировании трех дисков стандартной и пустотелой конфигурации используется одна и та же постановка задачи оптимизации.

В качестве критериев оптимизации используются условия минимизации массы

конструкции и максимизации циклической долговечности. В качестве ограничений используется требование к запасам по несущей способности.

Применение двухкритериальной оптимизации дает общее представление о «размене» требуемого значения циклической долговечности на массу диска, что позволяет получить более полную картину влияния пустотелой конфигурации на рассматриваемые характеристики диска, чем проектирование под одно требуемое значение циклической долговечности.

На каждой итерации оптимизации автоматически проводится модификация КЭМ и расчет прочности диска согласно схеме (рис. 4):

- 1) модификация КЭМ диска согласно новым значениям варьируемых параметров;
- 2) анализ теплового состояния модифицированной конструкции;
- 3) анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) диска в условиях нагружения;
- 4) анализ НДС диска при разгрузке с учетом предыдущего напряженного состояния;
- 5) анализ циклической долговечности с использованием кривых малоциклового усталости (МЦУ).

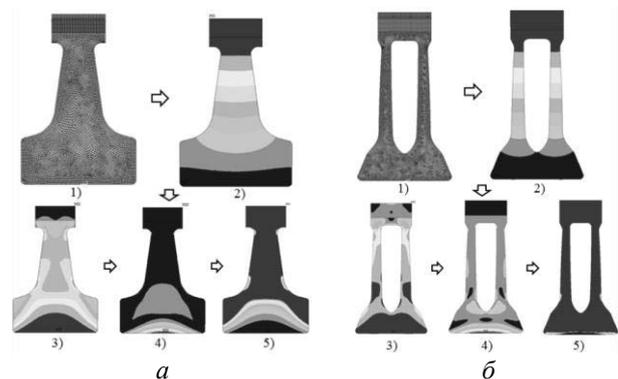


Рис. 4. Схема работы с параметризованной моделью: а – стандартный диск; б – пустотелый

### ОПИСАНИЕ СХЕМЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ

Используемая схема параметризации стандартной конструкции диска приведена на рис. 5. Красным цветом выделены варьируемые параметры, черным цветом выделе-

ны неварьируемые параметры, определяемые из конструктивных ограничений.

При оптимизации варьируются:

- толщины полотна у обода и ступицы –  $y_1$  и  $y_2$ ;
- ширина ступицы возле полотна и радиуса расточки –  $y_3$  и  $y_5$ ;
- высота ступицы –  $x_4$ ,  $x_3$  и  $x_2$ ;
- радиусы сопряжения полотна с ободом и ступицей –  $Rd_1$ ,  $Rd_2$ .

Схема параметризации позволяет за счет варьирования дополнительных параметров  $y_4$ ,  $x_4$  и  $Rd_5$  придавать дну ступицы искривленную форму, что расширяет область поиска оптимальных конфигураций и дает возможность дополнительного снижения массы. Таким образом, в процессе оптимизации стандартной конфигурации варьируется 12 параметров диска.

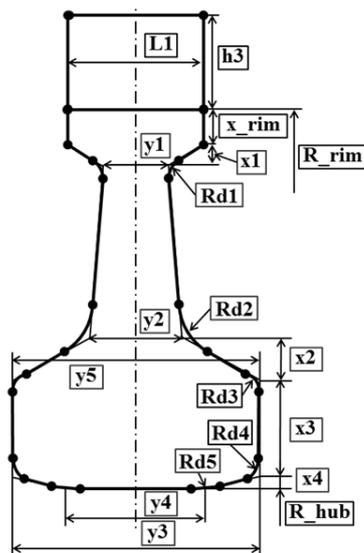


Рис. 5. Схема параметризации стандартной конфигурации диска

Схема оптимизации пустотелой конструкции приведена на рис. 6. Рассматривается симметричная конфигурация диска с криволинейными полотнами. Для качественного описания полости вводятся еще 9 параметров:

- высота ступицы под полостью –  $x_{b2}$ ,  $x_{b3}$ ;
- высота обода –  $x_{b1}$ ;
- смещение центра полотна возле обода и ступицы –  $y_{ca1}$  и  $y_{ca2}$ ;
- радиусы сопряжения внутри полости –  $Rdb_1$ ,  $Rdb_2$ ,  $Rdc_1$ ,  $Rdc_2$ ;

- параметр, отвечающий за кривизну полотен –  $y_{саб}$ .

Толщина полотна в месте смещения определяется по линейному закону на базе значений толщин полотна у обода и ступицы (параметры  $y_{a1}$  и  $y_{a2}$ ).

Использование криволинейных полотен позволяет уменьшить уровень напряжений в полости, а также приводит к более равномерной передаче нагрузки с обода на ступицу, чем при прямолинейной конфигурации полотна [4, 5].

Таким образом, в процессе оптимизации пустотелой конструкции с криволинейными полотнами варьируется 22 параметра.

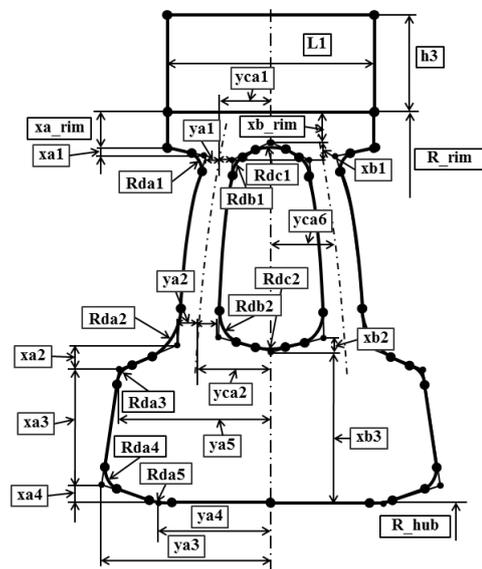


Рис. 6. Схема параметризации пустотелой конфигурации диска

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПТИМИЗАЦИИ

Для решения каждой задачи оптимизации дисков стандартной конфигурации проведено 800 итераций (обращений к модели). Время одной итерации – 30 секунд. Общее время получения Парето множества – 7 часов.

Решение каждой задачи оптимизации пустотелой конструкции получено за 1500 итераций. Время одной итерации – около 1 минуты. Общее время получения Парето множества – около суток.

На рис. 7–9 приведены Парето множества, полученные в результате оптимизации стандартной и пустотелой конструкций рассматриваемых дисков.

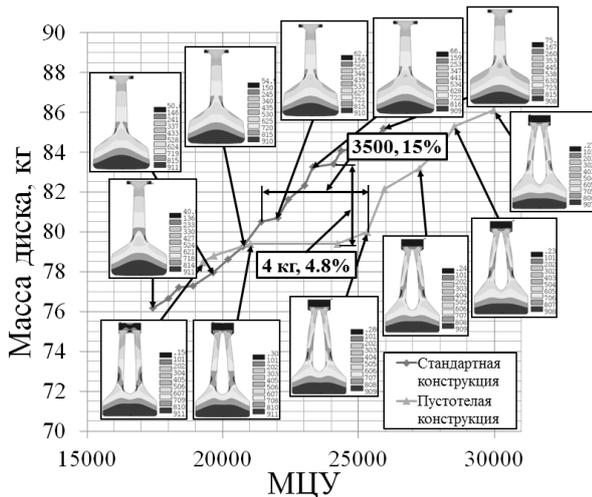


Рис. 7. Результаты оптимизации диска №1 стандартной и пустотелой конструкции

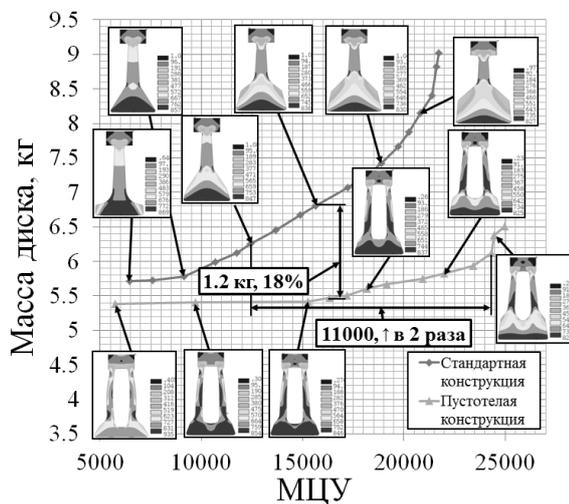


Рис. 8. Результаты оптимизации диска №2 стандартной и пустотелой конструкции

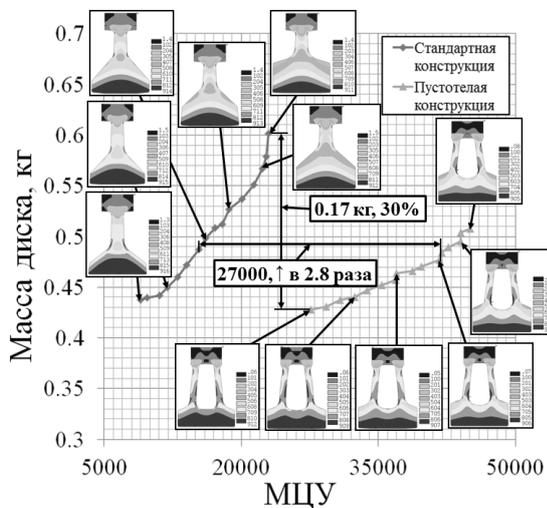


Рис. 9. Результаты оптимизации диска №3 стандартной и пустотелой конструкции

Анализ полученных результатов показал, что внедрение пустотелой конструкции с криволинейными полотнами эффективно как с точки зрения снижения массы, так и с точки зрения увеличения циклической долговечности по сравнению со стандартной конфигурацией диска. При этом чем выше частота вращения и меньше размеры диска, тем пустотелая конструкция эффективнее с точки зрения снижения массы и уровня напряжений.

Переход к пустотелой конструкции для диска №1 приводит к снижению массы на 5% (4 кг) и увеличению циклической долговечности до 15% в зависимости от поставленных требований к МЦУ. Для диска №2 относительные показатели выше: снижение массы до 18% (1,2 кг), увеличение циклической долговечности в 2 раза. Наиболее эффективно использовать пустотелую конструкцию в малоразмерных дисках высокооборотных турбин (диск №3): массу можно снизить до 30% (0,17 кг), циклическую долговечность увеличить в 2,8 раза.

При этом во всех случаях, кроме диска №3, использование пустотелой конструкции не приводит к существенному эффекту, если к дискам ставятся низкие требования к значению циклической долговечности, при которых отсутствует необходимость делать массивную ступицу, чтобы обеспечить нужный уровень напряжений. При увеличении требуемого значения циклической долговечности необходимо увеличивать размеры ступицы, что повышает эффективность использования пустотелой конструкции.

Высокий уровень относительного уменьшения массы среднеразмерного и малоразмерного дисков соответствует незначительным количественным значениям: 1,2 кг и 0,17 кг соответственно. Однако переход к пустотелой конструкции сопровождается не только уменьшением массы диска, но и снижением уровня напряжений в ступице. Указанное снижение уровня напряжений можно «разменять» на повышение параметров работы диска (увеличение частоты вращения, перепада температуры и т.д.), что в свою очередь можно использовать для уве-

личения эффективности работы ступени в целом. Таким образом, применение пустотелой конструкции может позволить диску сохранять работоспособность в таких условиях эксплуатации, при которых характеристики прочности дисков стандартной конструкции не будут удовлетворять поставленным требованиям.

### ОБЗОР ВОЗМОЖНЫХ МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПУСТОТЕЛЫХ ДИСКОВ ТУРБИН

Исследования в обеспечение разработки конструктивно-технологических решений по созданию пустотелых дисков должны проводиться исходя из применяемых методов изготовления, которые условно можно поделить на два класса: традиционные методы и методы, основанные на применении аддитивных технологий (АТ).

Отдельным направлением исследований должна являться разработка методов обработки поверхностей полости пустотелого диска.

Для изготовления пустотелых дисков могут быть применены два основных вида АТ: послойное и прямое формование детали из металлического порошка.

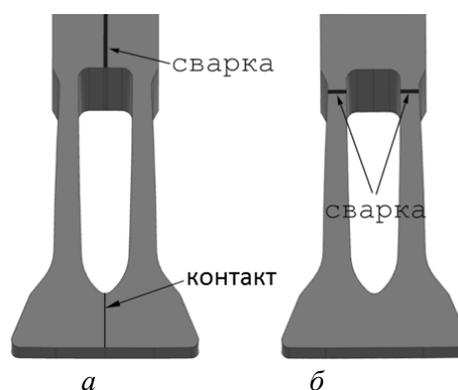
Несмотря на то, что применение методов АТ для изготовления сложных деталей открывает широкие возможности конструирования для этих методов тоже существуют технологические ограничения, которые необходимо прорабатывать с учетом применяемого оборудования и метода изготовления.

На текущий момент АТ имеют малое распространение в области производства вращающихся деталей. Также при использовании АТ возникают большие трудности с обработкой полости, которые ставят под сомнение целесообразность пустотелой конструкции.

В качестве альтернативы для изготовления пустотелых дисков можно использовать методы сварки (рис. 10).

При таком подходе пустотелый диск разделяется на две части, которые можно изготовить и обработать при помощи традиционных технологий производства (механические операции – деформирование, точение, мето-

ды гранульной металлургии и т.д.). Далее эти части соединяются вместе при помощи того или иного типа сварки.



**Рис. 10.** Варианты мест для сварки:  
а – сварка двух половинок в районе обода;  
б – сварка ободной и ступичной части

При реализации варианта изготовления полого диска из двух частей внутренние поверхности могут быть обработаны механическими способами до их соединения.

Результаты более подробного анализа возможных способов изготовления пустотелых дисков турбин, примеры их использования и описание проблем, возникающих при изготовлении таких дисков, будут опубликованы в следующей статье.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ полученных результатов показал, что внедрение пустотелой конструкции с криволинейными полотнами эффективно как с точки зрения снижения массы, так и с точки зрения увеличения циклической долговечности по сравнению со стандартной конфигурацией диска. При этом чем выше скорость вращения диска и меньше его габаритные размеры, тем лучше результаты: для диска больших размеров – снижение массы (до 4%), увеличение циклической долговечности до 15%, для диска средних размеров – снижение массы до 18%, увеличение циклической долговечности в 2 раза, для малоразмерного диска – снижение массы до 30% увеличение циклической долговечности в 2,8 раза.

Изготовление пустотелого диска методами АТ связано с большими сложностями из-за недостаточного уровня разви-

тия АТ, а также малого количества исследований прочности вращающихся конструкций, изготовленных таким способом. Дополнительной проблемой является обработка поверхностей полости пустотелого диска.

Альтернативой является изготовление пустотелого диска из двух частей, которые свариваются друг с другом при помощи различных методов сварки.

В обоих случаях необходимо проводить множество предварительных исследований, связанных с оценкой прочности и разработкой технологии изготовления пустотелой конструкции.

*Авторы выражают благодарность д-ру техн. наук Л. А. Магеррамовой и канд. техн. наук В. В. Исакову за высказанные замечания и пожелания по данной работе.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 3982852 США, Bore vane assembly for use with turbine discs having bore entry cooling / Richsrud H. Andersen; Carl R. Dins & Co. № 528023; Заявлено 29.11.74; Оpubл. 28.09.76. 6 с. [ Richsrud H. Andersen; Carl R. Dins & Co., "Bore vane assembly for use with turbine discs having bore entry cooling" Pat. 3982852 USA, № 528023; Filed 29.11.74; Publish 28.09.76. 6 p. ]
2. Пат. 4102603 США, Multiple section rotor disc / James Smith, Richard Paul Johnson № 640766; Заявлено 15.12.75; Оpubл. 25.07.78. 7 с. [ James Smith, Richard Paul Johnson, "Multiple section rotor disc" Pat. 4102603 USA, № 640766; Filed 15.12.75; Publish 25.07.78. 7 p. ]
3. Сальников А. В., Васильев Б. Е. Применение методов многокритериальной оптимизации для оценки эффективности использования различных конструктивных решений в дисках ГТД // сборник тр. III Междунар. Научно-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара 2016, С. 123–125 [ А. В. Сальников, В. Е. Васильев, "Multicriteria optimisation methods Application for an estimation of efficiency of use various constructive decisions in GTE disks," (in Russian), in *Proc. 3th Problems and perspectives of engine-building development*, pp. 123-125, 2016. ]
4. Анализ опыта проектирования пустотелого диска ТВД с использованием методов параметрической и топологической оптимизации для аддитивного производства / Б. С. Васильев [и др.] // сборник тр. III Междунар. Научно-техн. конф. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения», г. Самара, 2016, С. 120–121 [ А. В. Сальников, В. Е. Васильев, " The designing experience analysis of hollow HPT disk with use parametric and topological optimisation methods for additive manufacture," (in Russian), in *Proc. 3th Problems and perspectives of engine-building development*, pp. 120-121, 2016. ]
5. Xiuli Shen, Shaojing Dong, Zhiying Chen. Research of an advanced turbine disk for high thrust-weight ratio engine // ASME Turbo Expo 2014, Dusseldorf, Germany, June, 2014, ASME-Paper GT2014-25715, p. 7. [ Xiuli Shen, Shaojing Dong, Zhiying Chen, "Research of an advanced turbine disk for high thrust-weight ratio engine", ASME Turbo Expo 2014, Dusseldorf, Germany, June, 2014, ASME-Paper GT2014-25715, p. 7. ]
6. Соболев И. М., Статников Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006. 175 с. [ I. M. Sobol, R. B. Statnikov, *Choice of optimum parametres in problems with many criteria*, (in Russian). М.: Drofa, 2006. ]
7. Егоров И. Н., Тюленев В. П., Павленко В. Ф. Методы непрямої статистической оптимизации на основе самоорганизации и их использование в оптимизационных задачах авиационных ГТД. ВИНТИ №2622-В89, 1989. [ I. N. Egorov, V. P. Tulenev, V. F. Pavlenkov, "Methods of indirect statistical optimisation on the basis of self-organising and their application in optimisation problems aviation GTE," (in Russian), in *VINITI*, 2622-В89, 1989. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**САЛЬНИКОВ Антон Владелинович**, дипл. инженер-исследователь (МЭИ (ТУ), 2008), аспирант, ведущий инженер отделения прочности ЦИАМ. Готовит дисс. о проблемах конструктивно-прочностной оптимизации деталей рабочих колес ГТД.

**ВАСИЛЬЕВ Борис Евгеньевич**, дипл. инженер (МГТУ им. Баумана), канд. техн. наук., начальник отдела отделения прочности ЦИАМ. Иссл. в области развития методов проектирования и расчета прочности деталей ГТД, в том числе монокристаллических лопаток турбин

#### METADATA

**Title:** Design of hollow turbine discs and analysis of their efficiency.

**Authors:** A. V. Salnikov<sup>1</sup>, B. E. Vasilyev<sup>2</sup>

**Affiliation:**

Central Institute of Aviation Motors, Russia.

**Email:** <sup>1</sup>salnikov@ciam.ru, <sup>2</sup>b\_vasilyev@ciam.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 21, no. 3 (77), pp. 40-46, 2017. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The paper provides results analysis of hollow turbines disks (twin-web disk) application efficiency. Analysis are carried out for three standard disks with different overall dimensions and working conditions with use parameterized models and multicriteria optimisation methods. Improvement in mass and strength for each of disks are shown. The advantages and disadvantages of various methods of hollow discs production that can be divided into two classes are considered and analyzed: traditional methods and methods based on the use of additive manufacturing.

**Key words:** hollow disk; twin-web disk; turbine; optimization; cyclic life; mass minimization, disk production.

**About authors:**

**SALNIKOV, Anton Vladelinovich**, Lead engineer Stress analyses, optimized solutions. Engineer-researcher (MPEI, 2008).

**VASILYEV, Boris Evgenevich**, PhD, Head of department, Developing of new methods of engine parts design and its calculation. Engineer (Bauman University, 2007)