

УДК 621.44.533.697

- Шакало Р. Ю.** инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ShakaloRYu@zmdb.ua;
- Якушев Ю. В.** начальник отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: YakushevYuV@zmdb.ua;
- Резник С. Б.** начальник расчетно-экспериментальной бригады отдела турбин ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: ReznikSB@zmdb.ua;
- Борис С. Б.** инженер-конструктор 1 категории ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: BorisSB@zmdb.ua;
- Придорожный Р. П.** канд. техн. наук, ведущий инженер ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина, e-mail: PridorozhnyyRP@zmdb.ua

## РАЗРАБОТКА ОХЛАЖДАЕМОЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ ТВД С ВНУТРИСТЕНОЧНОЙ СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ

*Охлаждаемые рабочие лопатки турбины являются одними из самых сложных и высоконагруженных деталей газотурбинного двигателя. Создание новых, перспективных двигателей во многом зависит от создания надежных, работоспособных рабочих лопаток турбины. В данной работе представлены результаты проектирования охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с внутрискребочной системой охлаждения. Изложены основные требования и методы их обеспечения при разработке данной лопатки. Приведены результаты теплового и прочностного расчета. Выполнен сравнительный анализ охлаждаемых рабочих лопаток ТВД с внутрискребочной и петлевой (серийной) системами охлаждения.*

**Ключевые слова:** рабочая лопатка, система охлаждения, внутрискребочное охлаждение.

### Введение

Одним из основных направлений повышения термического КПД газотурбинного двигателя является повышение температуры газа перед турбиной. Это позволяет существенно снизить удельный расход топлива, вес и размеры двигателя. Основным фактором, ограничивающим дальнейшее повышение температуры газа, является необходимость обеспечения работоспособности рабочих лопаток ТВД, а следовательно обеспечение допустимой температуры материала лопатки. Повышение работоспособности рабочих лопаток в условиях высоких температур и при высоких нагрузках обеспечивается применением новых жаростойких и жаропрочных материалов, новых теплозащитных (керамических) покрытий, а также созданием рабочих лопаток с высокоэффективными системами охлаждения [1].

Для современных высокотемпературных двигателей характерно использование рабочих лопаток с многоканальной петлевой конвективно-пленочной системой охлаждения с применением теплозащитных покрытий и большим количеством перфорационных отверстий. Однако, в публикациях все чаще появляется информация о создании передовыми зарубежными фирмами, такими как General Electric, Pratt&Whitney, RollsRoyce, ЦИАМ и другие, рабочих лопаток с внутрискребочными (проникающими) системами охлаждения.

В связи с этим создание рабочих лопаток с внутрискребочной системой охлаждения является одной из актуальных задач на сегодняшний день. В данной работе представлены результаты

разработки и изготовления рабочей лопатки ТВД с внутрискребочной системой охлаждения, разработанной на ГП «Ивченко-Прогресс».

### 1. Выбор схемы охлаждения разрабатываемой рабочей лопатки

В сравнении с серийной (базовой) рабочей лопаткой ТВД, разрабатываемая лопатка с внутрискребочной системой охлаждения должна обеспечить возможность повышения температуры газа перед турбиной или, при тех же параметрах работы двигателя, повысить ресурс лопатки. В качестве объекта сравнения выбрана серийная рабочая лопатка с петлевой конвективно-пленочной системой охлаждения, внешний вид которой представлен на рис. 1.

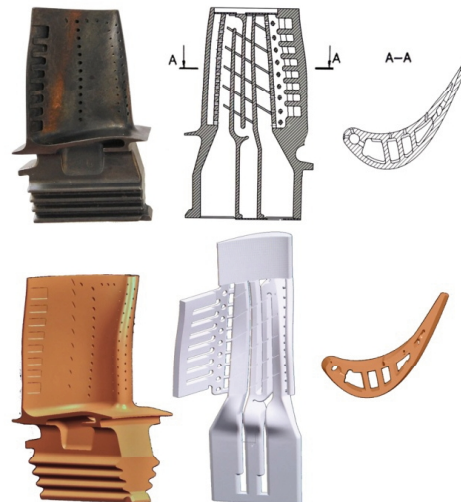


Рис. 1. Базовая рабочая лопатка

Основным отличием лопатки с внутрискелетной системой охлаждения от лопаток с петлевой системой охлаждения является наличие в центральной части лопатки системы радиальных каналов, охлаждающий воздух в которых перемещается из канала в канал посредством отверстий для струйного натекания.

При проектировании системы охлаждения внутрискелетной лопатки существовал ряд ограничений, которые необходимо было выдержать:

- система охлаждения спроектированной лопатки должна быть реализована без изменения наружной геометрии базовой рабочей лопатки;
- расход воздуха, идущего на охлаждения лопаток, не должен быть больше, чем в серийных лопатках;
- масса спроектированной лопатки не должна быть больше, чем базовой лопатки;
- спроектированная рабочая лопатка должна быть изготовлена на имеющемся оборудовании ГП «Ивченко-Прогресс».

Перед началом проектирования выполнен анализ существующих публикаций, который показывает, что наиболее распространенной среди рабочих лопаток с проникающим охлаждением, является схема с одним большим внутренним каналом, соединенным через отверстия струйного натекания с малыми каналами на корыте и спинке лопатки.

В работе [2] описана схема охлаждения лопатки с внутрискелетным охлаждением, предложенная Дэйли. Сечение пера этой лопатки представлено на рис. 2.



Рис. 2. Сечение рабочей лопатки, предложенной в работе Дэйли

В работе [3] описана схема охлаждения лопатки с проникающим охлаждением спроектированной в ЦИАМ. Сечение пера лопатки, разработанной в ЦИАМ, представлено на рис. 3.

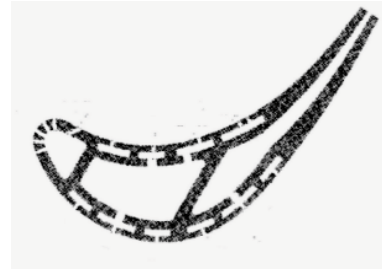


Рис. 3. Сечение рабочей лопатки, разработанной в ЦИАМ

После анализа существующих публикаций и учитывая требования к разработке и производству, спроектирована рабочая лопатка с наиболее эффективной системой охлаждения, не имеющей аналогов. Схема спроектированной лопатки представлена на рис. 4.

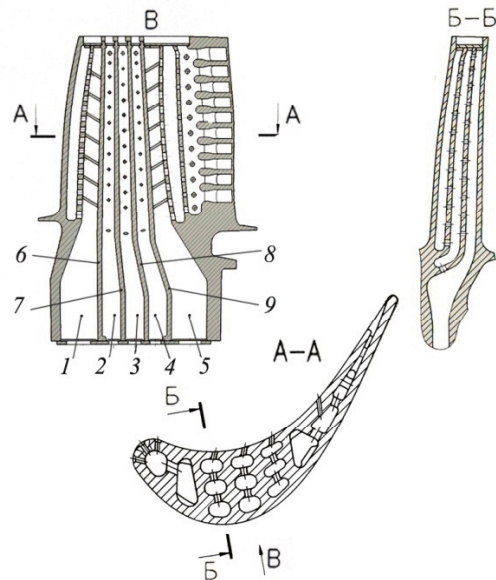


Рис. 4. Спроектированная рабочая лопатка

Система охлаждения рабочей лопатки (рис. 4) формируется пятью внутренними полостями 1, 2, 3, 4, 5, не имеющих между собой взаимного сообщения и разделёнными между собой поперечными рёбрами 6, 7, 8, 9. Каждая из внутренних полостей 1, 2, 3, 4, 5 состоит из каналов, соединённых между собой перемычками.

Повышенная интенсивность охлаждения обеспечивается за счет увеличенной площади внутренних каналов, участвующих в теплообмене.

Обеспечение оптимального охлаждения разных участков лопатки конвективным и заградительным охлаждением достигается тем, что все группы полостей не соединены ни между собой, ни с другими полостями лопатки и расход охладителя через каждую группу каналов может

регулироваться дросселем. Дроссель установлен на входе охладителя в каждую внутреннюю полость [4].

Также одной из задач при проектировании было сохранение напряжений от действия центробежных сил. Для обеспечения высокой точности расчетов массы, площади и других геометрических характеристик проектирование рабочей лопатки выполнялось с помощью системы трёхмерного моделирования Unigraphics. Твердотельная модель лопатки и стержня приведены на рис. 5.



Рис. 5. Твердотельная модель спроектированной лопатки и стержня

## 2. Тепловые и прочностные расчеты рабочей лопатки

Применение системы трёхмерного моделирования позволило оптимизировать геометрические размеры охлаждающих каналов с точки зрения массовых характеристик лопатки. Масса лопаток в расчетных сечениях приведена в таблице 1.

При проектировании, с целью более точного анализа изменения теплонапряженного состояния разрабатываемой рабочей лопатки с внутрискребочным охлаждением, результаты тепловых и прочностных расчетов сравнивались с расчетами базовой лопатки.

Выполнены тепловые и прочностные расчеты разработанной рабочей лопатки. Сравнительные результаты расчетов спроектированной и базовой рабочих лопаток представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные результаты расчетов

Лопатка	Сечение	Масса, гр	T <sub>ср</sub> , °C
Серийная	среднее	10,73	953
	корневое	24,69	911
	Над 1 зубом	65,27	652
Спроникающим охлаждением	среднее	11,73	924 (-29)
	корневое	26,35	831 (-80)
	Над 1 зубом	67,61	652 (0)

Как видно из результатов расчетов, за счет применения новой системы охлаждения, в среднем и корневом сечениях пера удалось снизить среднюю температуру на 29 °C и 80 °C соответственно. В результате снижения температуры запасы прочности в среднем и корневом сечениях повысились на 7% и 24% соответственно.

Температурное состояние над первым зубом замкового соединения не изменилось, но за счет увеличения площади сечения удалось повысить запас прочности на 5,8%.

Тепловое и напряженное состояние среднего сечения базовой и спроектированной лопаток приведены на рис.6.

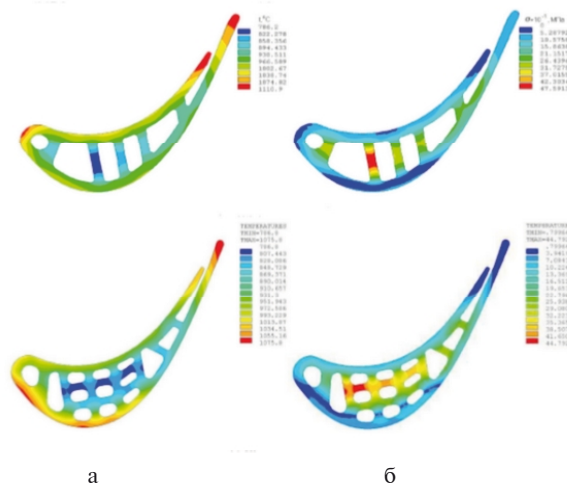


Рис. 6. Тепловое (а) и напряженное (б) состояние среднего сечения базовой и спроектированной лопаток

Применение модернизированной системы охлаждения позволит повысить ресурс рабочей лопатки с 6000 ч до 20000 ч.

## 3. Изготовление рабочих лопаток

Изготовление рабочих лопаток с подобными схемами охлаждения требует применения новых технологий и нового оборудования.

На рис.7 приведен стержень лопатки с внутрискребочным охлаждением.

На рис.8 приведена изготовленная рабочая лопатка с внутрискребочным охлаждением.

После отработки технологии изготовления лопаток с внутрискребочным охлаждением, на ГП «Ивченко-Прогресс» изготовлен комплект рабочих лопаток с внутрискребочным охлаждением (рис.9).



Рис. 7. Стержень рабочей лопатки с внутрискребочным охлаждением



Рис. 8. Рабочая лопатка с внутрискребочным охлаждением



Рис. 9. Колесо ТВД, укомплектованное рабочими лопатками с внутрискребочным охлаждением

### Заключение

В результате проведенной работы разработана конструкция рабочей лопатки ТВД с внутрискребочной системой охлаждения и выпущена конструкторская документация для ее изготовления.

На разработанную рабочую лопатку ТВД получены следующие патенты:

- Украинский патент “Охолоджувана робоча лопатка турбіни” № UA 62233 U, 25.08.2011.
- Патент РФ на полезную модель № RU 117505 U1, 27.07.2012..

На данный момент ведутся работы по дальнейшему исследованию и модернизации лопаток с внутрискребочным охлаждением.

### Литература

1. Высокотемпературные газовые турбины [Текст] / Под ред. М.Я. Иванова. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2010. – С. 304.
2. Дэйли Г.М. Аэротермические характеристики внутренних систем охлаждения в турбомашинках: вопросы проектирования и расчета [Текст]/ курс лекций /Г.М. Дэйли, – 28 марта 3, 2000 г.
3. Новиков А.С. Эффективное охлаждение лопаток высокотемпературных ТВД [Текст]/ А.С. Новиков, С.В.Харьковский, А.А. Мухин / Двигатель №1(109) 2017 С. 1-4.
4. Пат. 117505 Российская Федерация, Охлаждаемая рабочая лопатка турбины [Текст] / Якушев Ю.В., Резник С.Б., Меркулов В.М., Борис С.Б., Шакало Р.Ю.; заявитель и патентообладатель ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» опубл. 27.07.12, приоритет 02.10.10.
5. Пат. 62233 Украина, Охлаждаемая рабочая лопатка турбины [Текст] / Якушев Ю.В., Резник С.Б., Меркулов В.М., Борис С.Б., Шакало Р.Ю.; заявитель и патентообладатель ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» опубл. 25.08.11.

Поступила в редакцию 01.08.2018

**Р.Ю. Шакало, Ю.В. Якушев, С.Б. Різник, С.Б.Борис, Р.П. Придорожний. Розробка охолоджувальної робочої лопатки ТВТ з проникаючою системою охолодження**

*Охолоджувані робочі лопатки турбіни є одними з найскладніших та найнавантажениших деталей газотурбінного двигуна. Створення нових, перспективних двигунів багато в чому залежить від створення надійних, працездатних робочих лопаток турбіни. В даній роботі приведено результати проектування охолоджуваної робочої лопатки ТВТ з проникаючою системою охолодження. Викладені основні вимоги та методи їх вирішення при розробці даної лопатки. Наведено результати теплового розрахунку та розрахунку на міцність. Виконано порівняльний аналіз охолоджуваних лопаток ТВТ з проникаючою та петльовою (серійною) системами охолодження.*

**Ключові слова:** робоча лопатка, система охолодження, проникаюче охолодження.

**R.Yu. Shakal, Yu.V. Yakushev, S.B. Reznik, S.B. Boris, R.P. Pridorozhnyy. Development of cooled tube shoulder with inservice cooling system**

*Cooled turbine blades are one of the most complex and highly loaded parts of a gas turbine engine. The creation of new, perspective engines largely depends on the creation of reliable, efficient working blades of the turbine. In this paper, we present the results of the design of a cooled working bladder with an intra-wall cooling system. The main requirements and methods of their provision in the development of this blade are stated. The results of thermal and strength calculations are presented. A comparative analysis of the cooled working blades of a turbojet with intra-wall and loop (serial) cooling systems is performed.*

*One of main routes of raise of thermal efficiency of the gas-turbine engine is gas temperature rise in front of the turbine. It allows to reduce essentially a specific fuel rate, weight and propeller sizes. A major factor limiting the further temperature rise of gas, necessity of security of functionability of rotor blades HPT, and consequently security of admissible temperature material vanes is. Raise of functionability of rotor blades in the conditions of heats and at high loads is ensured with application new temperature-resistant and the high-temperature materials, new thermal-protective (ceramic) covers, and also creation of rotor blades with highly effective integral cooling systems.*

*For modern high-temperature propellers use of rotor blades with a multichannel recirculation is convective-film integral cooling system with application of thermal-protective covers and a great many of punched holes is characteristic. However, in publications even more often there is an information on creation by forward foreign corporations, such as General Electric, Pratt & Whitney, Rolls Royce and others, rotor blades with intra-wall cooling systems. In this connection creation of rotor blades with intra-wall cooling system is one of actual problems for today.*

*In the given activity results of working out and manufacture of rotor HPT blade intra-wall cooling system developed on SE "Ivchenko-Progress" are presented.*

*As a result of the conducted activity the construction of rotor HPT blade with intra-wall cooling system is developed and the designer documentation for its manufacture is manufactured.*

**Key words:** working blade, cooling system, intra-wall cooling.

**References**

1. Vysokotemperaturnye gazovye turbiny [High-temperature gas turbines] Pod red. M.Ya. Ivanova. TORUS PRESS, Publ., 2010. — p. 304.  
 2. Deyli G.M. Aerotermicheskie kharakteristiki vnutrennikh sistem okhlazhdeniya v turbomashinakh: voprosy proektirovaniya i rascheta [Aero-thermal performance of internal cooling systems in turbomachines: design and calculation issues] kurs lektsiy G.M. Deyli, Publ., 2000.  
 3. Novokiv A.S. Effektivnoe okhlazhdenie lopatok vysokotemperaturnykh TVD [Effective

cooling of high-temperature turbine blades] Dvigatel' no. 1(109) Publ., 2017 pp. 1-4.  
 4. Yakushev Yu.V., Reznik S.B., Merkulov V.M., Boris S.B., Shakalo R.Yu. Okhlazhdaemaya rabochaya lopatka turbiny [Turbine cooling blade]. Patent RF, №. 117505, 2012.  
 5. Yakushev Yu.V., Reznik S.B., Merkulov V.M., Boris S.B., Shakalo R.Yu. Okhlazhdaemaya rabochaya lopatka turbiny [Turbine cooling blade]. Patent UA, №. 62233, 2011.