

Применение аддитивных лазерных технологий при проектировании охлаждаемых лопаток газовых турбин

А.Н. Рогалев¹, М.И. Шевченко²

¹ ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"», г. Москва, Российская Федерация

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),

г. Москва, Российская Федерация

E-mail: r-andrey2007@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Проектирование охлаждаемых лопаток современных газотурбинных установок является сложным и длительным процессом ввиду необходимости учета большого количества факторов, определяющих возможность применения тех или иных конструктивных решений. Сложность тепловых и гидравлических процессов зачастую не позволяет получить окончательную конструкцию внутренней полости лопатки только с применением расчетных методов и требует экспериментальной проверки адекватности использованных моделей и уточнения конструктивных решений на основании проведения экспериментальных исследований опытных образцов, изготовление которых осуществляется методом литья по выплавляемым моделям. Корректировка геометрических характеристик приводит к необходимости внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию, доработки или изготовления новой пресс-формы для изготовления керамических стержней, формирующих внутреннюю полость лопатки при литье. Это требует существенных дополнительных затрат и увеличения времени создания охлаждаемых лопаток. В связи с этим актуальна разработка новой методики проектирования охлаждаемых лопаток с опережающей верификацией тепловых и гидравлических процессов.

Материалы и методы: Результаты получены путем физического моделирования тепловых и гидравлических процессов на модели охлаждаемой лопатки газовой турбины.

Результаты: Предложена усовершенствованная методика проектирования охлаждаемых лопаток газовых турбин, основанная на опережающей верификации тепловых и гидравлических моделей лопаток.

Выводы: Применение аддитивных лазерных технологий позволяет изготавливать модели каналов охлаждения и лопатку в целом с требуемой точностью, что дает возможность проводить экспериментальные исследования до выпуска рабочей документации и получать в процессе проектирования окончательный вариант охлаждаемой лопатки.

Ключевые слова: газовая турбина, охлаждаемая лопатка, аддитивные лазерные технологии, тепловые испытания, гидравлические испытания, физическое моделирование, опережающая верификация.

Additive laser technologies in cooled gas turbine blade design

A.N. Rogalev¹, M.I. Shevchenko²

¹ National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russian Federation

² Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russian Federation

E-mail: r-andrey2007@yandex.ru

Abstract

Background: Design of cooled blades of modern gas turbines is a complex and lengthy process as it has to take into account a number of factors determining the possibility of applying certain design solutions. The complexity of thermal and hydraulic processes is often an obstacle to developing the final design of the blade internal cavity by using only computational methods and makes it necessary to apply experimental methods to check the adequacy of the used models and clarify the design solutions based on experimental investigations of prototypes manufactured by investment casting. Adjustment of geometrical characteristics requires changes in design and technological documentation, revision or production of new molds for manufacturing ceramic cores that form the internal cavity of the blades being cast. This fact leads to significant additional costs and additional time for design of cooled blades. Thus, it is necessary to develop a new design technique of the cooled shoulder-blades with predictive verification of thermal and hydraulic processes.

Materials and methods: The results are obtained by physical design of thermal and hydraulic processes on a model of the cooled shoulder-blade of gas turbine.

Results: An improved method has been suggested to design cooled gas turbine blades based on predictive verification of thermal and hydraulic blade models.

Conclusions: The use of additive laser technologies allows manufacturing models of cooling channels and the whole blades with the required accuracy, which makes it possible to do experimental research before releasing working documentation and obtaining the final version of the cooled blades.

Key words: gas turbine, cooled blade, additive laser technologies, thermal testing, hydraulic testing, physical modeling, predictive verification.

DOI:10.17588/2072-2672.2016.3.034-039

Несмотря на достижения в создании жаропрочных материалов, охлаждение высокотемпературных газовых турбин и, в первую очередь, сопловых и рабочих лопаток как деталей, подверженных наибольшему тепловому и силовому воздействию, является главным направлением в освоении высоких температур в газотурбинных двигателях (ГТД) и газотурбинных установках (ГТУ). В находящихся в эксплуатации ГТД охлаждение лопаток осуществляется преимущественно воздухом, отбираемым из компрессора, который проходит по системе внутренних каналов и выходит в проточную часть турбины. Применение такой системы заставляет заботиться о рациональном использовании охлаждающего воздуха, так как чем больше его расход, тем меньше выгода от повышения температуры газа, поступающего в турбину. Эта выгода также будет уменьшаться с увеличением гидравлических потерь, вызванных введением охлаждения. Поэтому одной из основных задач, возникающих при увеличении температуры газа перед турбиной, является создание такой высокоэффективной конструкции лопатки, на охлаждение которой расход воздуха при прочих равных условиях был бы наименьшим, а ее аэродинамическое совершенство наибольшим, т.е. приближалось или не уступало бы достигнутому в неохлаждаемых лопатках.

При проектировании высокотемпературной турбины приходится решать вопрос о целесообразности применения той или иной из известных конструкций охлаждаемых лопаток или разрабатывать новую конструкцию.

Задача проектирования системы охлаждения с учетом изложенных требований решается при следующих условиях: заданных геометрических параметрах наружного контура лопатки; заданных газодинамических характеристиках внешнего газового потока (полей давления, температуры, скорости) без учета возможного выдува воздуха на внешнюю поверхность лопатки; заданных действующих нагрузках на лопатку от центробежных и газовых сил.

Рассматриваемая задача в общем виде является многопараметрической и многокритериальной. Число одновременно варьируемых параметров даже в выбранной принципиальной схеме может достигать нескольких десятков. Формирование обобщенного критерия качества, определяемого на основе уравнения (1), позволяющего решить задачу о поиске глобального оптимума [1], не представляется возможным из-за отсутствия объективной информации о весовых характеристиках критериев качества, входящих в обобщенный критерий:

$$\Phi_{\Sigma}(Y) = \sum_{V=1}^V \xi_V \Phi_V(Y), \quad (1)$$

где ξ_V – весовые характеристики локальных критериев $\Phi_V(Y)$.

В настоящее время на практике процесс проектирования системы охлаждения завершается выработкой позитивного варианта, т.е. варианта, удовлетворяющего предъявляемым требованиям, но не обладающего оптимальным значением критериев качества. Причиной этого является недостаточная автоматизация процесса проектирования, в связи с чем этот процесс занимает значительное время, а расчетные модели не всегда совершенны и зачастую определяются субъективными представлениями разработчика о физических процессах, имеющих место в системах охлаждения.

Процесс проектирования систем охлаждения лопаток турбин включает три этапа проектирования, на каждом из которых используются математические модели соответствующего уровня [2].

Основу проектирования на первом этапе составляет универсальная математическая модель охлаждаемой лопатки, которая включает: функциональные ограничения геометрических параметров, обеспечивающие технологические требования; расчет целевых функций (критериев качества), характеризующих основные требования газодинамики и прочности; поиск варианта рациональной системы охлаждения, в наибольшей степени удовлетворяющего требованиям конструктора.

В качестве целевых функций можно использовать два критерия качества проектирования, один из которых Φ_1 учитывает степень согласования заданных (из условий прочности) и реализуемых в процессе поиска температурных полей лопатки, а другой Φ_2 представляет собой относительный расход воздуха на охлаждение $\Phi_2 = G_2/G_1$, где G_2 – суммарный расход воздуха на охлаждение лопатки; G_1 – расход воздуха через компрессор двигателя. Методика расчета первого критерия качества основана на одномерной модели передачи тепла через стенки лопатки, в которой используются средние значения коэффициента теплоотдачи, определяемые на каждом отдельном участке наружной и внутренней поверхностей лопатки. Методика расчета второго критерия качества базируется на решении системы уравнений, описывающей распределение охлаждающего воздуха в разветвленной гидравлической системе охлаждения. Поиск рационального варианта системы охлаждения включает в себя процесс варьирования основных геометрических параметров и анализ результатов расчетов, позволяющих конструктору выбрать интересующий его вариант.

Исходными данными для проектирования на этом этапе являются: геометрия наружного контура лопатки; распределение температуры, давления и скорости газа на наружной поверхности лопатки; давление и температура воздуха на входе в лопатку; желаемое температурное поле в сечениях лопатки, удовлетворяющее условиям прочности.

Последовательность проектирования на этом этапе может быть следующей. Сначала конструктор на основе имеющегося опыта выбирает схему охлаждения лопатки. Затем выбирает геометрические параметры, характеризующие данную систему охлаждения, которые будут варьироваться в целях поиска оптимального варианта, и назначает диапазон их варьирования. Далее производится вычисление целевых функций для каждого варианта, строится поле исследованных вариантов в координатах Φ_1 , Φ_2 и осуществляется выбор наиболее интересного варианта. Если оказывается, что эффективность выбранной схемы охлаждения недостаточна, то конструктор осуществляет переход на более сложную и эффективную схему охлаждения и процесс повторяется до тех пор, пока не будет получен вариант системы охлаждения, удовлетворяющий конструктора.

На этапе проектирования лопаток 2-го уровня необходимо учитывать не только температурное состояние лопатки, но и ее напряженное состояние с учетом действий термических нагрузок, вызванных неравномерным температурным полем в сечениях лопатки.

В качестве целевых функций на этом этапе проектирования целесообразно использовать относительный расход воздуха на охлаждение лопатки и минимальный местный запас прочности. Решение задачи проектирования в этом случае сводится к поиску экстремума одной из упомянутых целевых функций при ограничении другой в определенных пределах или к поиску компромиссного решения.

Блок-схема проектирования системы охлаждения лопатки 2-го уровня представлена на рис. 1. Она состоит из двух модулей – теплового и прочностного, каждый из которых включает в себя ряд блоков. Варьируемыми параметрами могут быть некоторые геометрические размеры элементов интенсификации теплообмена в ка-

налах и организации заградительного охлаждения. Можно также варьировать положение центров масс различных сечений лопатки в целях компенсации напряжений, вызываемых термическими и изгибными нагрузками. Тепловой модуль состоит из пяти блоков, каждый из которых выполняет самостоятельную функцию.

Результаты расчета блока 1 используются в блоках 2 и 3 для расчетов обтекания лопатки и граничных условий теплообмена на внешней поверхности лопатки, а в блоке 4 для расчета граничных условий теплообмена в каналах системы охлаждения, а также относительного расхода воздуха на охлаждение лопатки Φ_2 . Блок расчета температурных полей в сечениях лопатки 5 позволяет определять двумерное стационарное температурное состояние в сечениях лопатки. Прочностной модуль включает в себя четыре блока. Блок расчета термических напряжений 6 используется для определения термических напряжений в сечениях лопатки, вызванных неравномерным полем температур пера. Исходная информация о температурном поле в сечении поступает из блока теплового модуля 5. Блок расчета суммарных напряжений 7 позволяет дополнительно к термическим напряжениям определить напряжения, вызванные центробежными нагрузками и нагрузками от газовых сил, и найти суммарные напряжения от всех действующих факторов. Здесь кроме информации, поступающей из блока 6, в качестве исходной информации используются данные о газовых нагрузках, частоте вращения ротора, характеристиках материала и некоторые геометрические параметры лопатки. Блок компенсации изгибных нагрузок 8 обеспечивает возможность варьирования положения центра масс в каждом сечении лопатки в целях компенсации действующих изгибных напряжений от газовых и термических нагрузок.

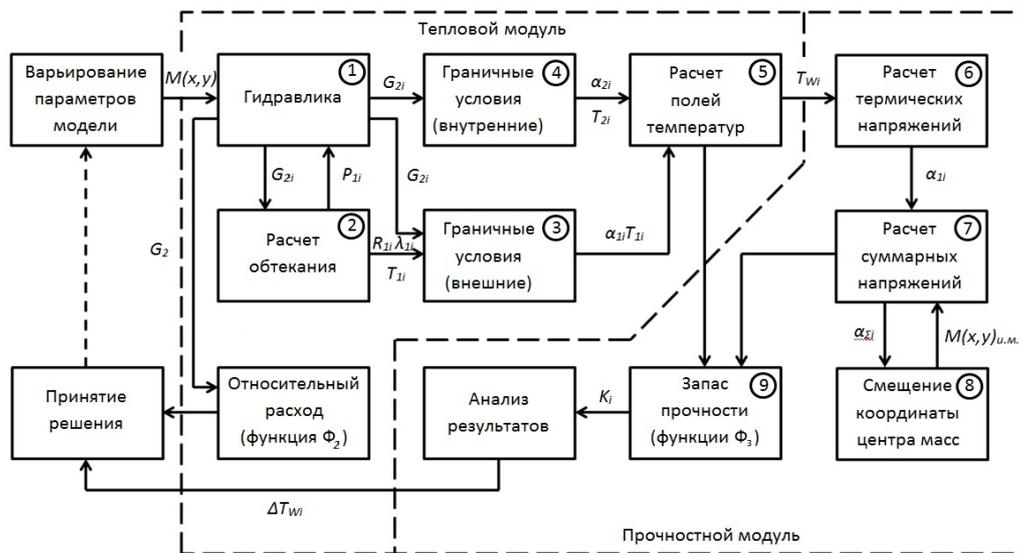


Рис. 1. Блок-схема проектирования системы охлаждения лопатки турбин 2-го уровня

Блок расчета запаса прочности 9 позволяет определить распределение этого параметра в сечениях лопатки и выявить его минимальное значение, которое и является целевой функцией Φ_3 . Информация в этот блок поступает из блока прочностного модуля 7 в виде суммарных напряжений и из блока теплового модуля 5 в виде значений температуры, с помощью которых определяются характеристики длительной прочности материала лопатки.

На основе анализа полей запасов прочности в сечениях лопатки конструктор может корректировать температурные поля в рассматриваемых областях. Располагая значениями целевых функций Φ_2 и Φ_3 , информацией о температурном поле в сечении лопатки, конструктор вырабатывает серию новых вариантов [2].

В результате проектирования на втором этапе создается объект, который может являться основанием для изготовления опытного образца лопатки.

Полученная опытная лопатка является исходным объектом для третьего этапа проектирования. Данный этап включает в себя проведение экспериментальных исследований на натуральных образцах, выполненных литьем по выплавляемым моделям. По результатам испытаний проводится уточнение тепловой и гидравлической моделей лопатки. Испытания натуральных лопаток обычно проводятся или на газодинамическом стенде с замером температуры поверхности лопаток и статических давлений в каналах охлаждения (рис. 2) [3] или методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате [4].

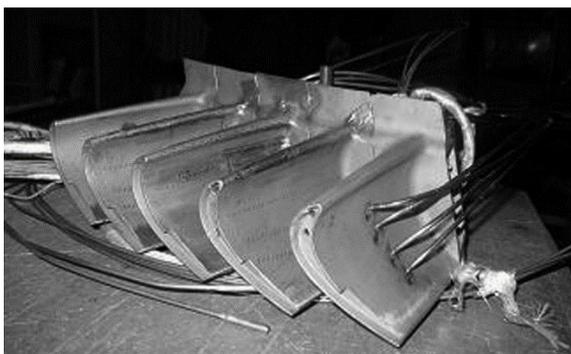


Рис. 2. Рабочие лопатки 1-й ступени ГТЭ-65, препарированные для испытаний на газодинамическом стенде

В процессе проектирования на третьем этапе возможна корректировка некоторых геометрических характеристик тракта охлаждения, что приводит к необходимости внесения изменений в конструкторскую и технологическую документацию, доработку или изготовление новой пресс-формы для прессования керамических стержней, формирующих внутреннюю полость лопатки при литье. Это приводит к существенным дополнительным

затратам и увеличению времени создания охлаждаемой лопатки.

Возможная неадекватность тепловой и гидравлической моделей изготовленной натурной лопатки связана с тем, что используемые при проектировании гидравлические характеристики и критериальные уравнения для расчета коэффициентов теплоотдачи получены на увеличенных моделях, существенно большего размера, чем каналы реальной лопатки, и в модельных условиях, отличающихся от натуральных. Данные по расчету теплоотдачи на переходных участках соединения каналов, поворотах, разветвлениях каналов практически отсутствуют. Все это снижает точность расчета температурных полей лопатки и, соответственно, запасов прочности.

Развитие современных лазерных технологий позволяет проводить верификацию тепловой и гидравлической моделей системы охлаждения лопатки на ранних этапах ее создания. Одной из таких технологий является селективное лазерное спекание (Selective Laser Melting SLM) [5, 6]. Эта технология позволяет изготовить модель лопатки или модели отдельных каналов охлаждения из жаропрочного материала в масштабе 1:1. Точность изготовления элементов внутренней полости данным методом соответствует технологии прецизионного литья по выплавляемым моделям [7].

Использование данной технологии позволяет на этапе выбора геометрии каналов и интенсификаторов теплообмена выполнить экспериментальные исследования для определения локальных коэффициентов теплоотдачи к охлаждающему воздуху на моделях каналов с геометрией соответствующей внутренней полости пера.

После завершения второго этапа проектирования появляется возможность провести опережающую верификацию тепловой и гидравлической моделей лопатки до выпуска рабочей документации. Для конвективно охлаждаемых лопаток целесообразно использовать метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате, который позволяет определять локальные коэффициенты теплоотдачи в каналах внутренней полости [4]. Лопатки с конвективно-пленочным охлаждением могут быть испытаны с использованием тепловизионного метода контроля их теплового состояния [8].

Предложенный подход был апробирован в ОКБ А. Люльки при проектировании рабочей лопатки первой ступени турбины газоперекачивающего агрегата (ГПА). Лопатка имела петлевою схему охлаждения с выдувом охлаждающего воздуха в проточную часть турбины через выходную кромку и отверстия в торцевой стенке пера. Для испытания в жидкометаллическом термостате были изготовлены две модели лопатки с фланцем для крепления

к рабочему участку установки и с выходным коллектором для отвода охлаждающего воздуха (рис. 3).



Рис. 3. Фотография модели лопатки для испытания в жидкометаллическом термостате

Порошок, использованный для изготовления модели, выполненный на основе железа, включал: хром 14–15,5 %, никель 3,5–5,5 %, медь 2,5–4,5 %, остальные компоненты менее 1 %. Плотность материала 7800 кг/м³.

Замер шероховатости поверхности модели (база по ГОСТ Р 2789-73) показал следующие результаты: $R_a = 2,67$ мкм, $R_z = 13,83$ мкм. Литейная шероховатость лопаток: $R_a = 1,10$ – $1,20$ мкм, $R_z = 7$ – 8 мкм.

Проведенные исследования на образцах позволили определить коэффициент теплопроводности материала в направлении, перпендикулярном плоскости спекания. Коэффициент теплопроводности при температуре 693 К составляет 17 Вт/мК, что соответствует теплопроводности материала лопатки.

Для оценки влияния шероховатости на интенсификацию теплоотдачи в каналах были проведены испытания на моделях прямоугольных каналов сечением 15 мм × 3 мм и длиной 180 мм. Одна модель изготавливалась из стальных гладких пластин (материал 12Х18Н10Т). Внутренняя поверхность канала имела шероховатость $R_a = 1,2$. Вторая модель изготавливалась методом селективного лазерного спекания. Испытания проводились с использованием метода калориметрирования в жидкометаллическом термостате.

Продувка моделей проводилась холодным воздухом ($T_v = 293$ К) при температуре стенки модели, равной температуре воздуха, и с подогревом в жидкометаллическом термостате (температура стенки $T_{ст} = 692$ К). Диапазон перепадов давления $\pi = P/P_0 = 1$ – $2,5$ (P – давление на входе в модель; P_0 – давление на выходе). Анализ полученных характеристик показал слабое влияние отличия шероховатости на пропускную способность каналов. Отличие в расходах через модели не превышало 3 % во всем диапазоне перепадов давления.

Коэффициент интенсификации теплоотдачи к охлаждаемому воздуху, вызванный шероховатостью на участке развитого турбулентного течения $K_{инт} = Nu_{ш}/Nu_{гл}$, составил 1,04 ($Re_v = 15000$ – 38000). Можно предположить, что при наличии в канале интенсификаторов теплообмена (штырьков, ребер, выступов и др.) влияние шероховатости будет еще меньше. Это позволяет сделать вывод, что шероховатость каналов охлаждения модели не будет существенно влиять на точность определения тепловых и гидравлических характеристик лопатки, изготовленной с использованием технологии лазерного спекания.

В результате проведенных испытаний были получены расходные характеристики лопатки, распределения плотности теплового потока по наружной поверхности в расчетных сечениях пера и определены критериальные зависимости для расчета локальных коэффициентов теплоотдачи к охлаждающему воздуху (рис. 4).

С использованием результатов экспериментов были проведены верификация гидравлической модели лопатки и уточнение тепловой. Рассчитанные запасы прочности подтвердили работоспособность спроектированной конструкции лопатки в условиях эксплуатации.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что использование SLM технологии позволяет при проектировании проводить опережающую верификацию тепловых и гидравлических моделей охлаждающих лопаток турбины до выпуска рабочей документации. Физическое моделирование теплогидравлических процессов на промежуточных этапах проектирования позволяет получать окончательный вариант охлаждаемой лопатки, не требующей последующей экспериментальной доводки.

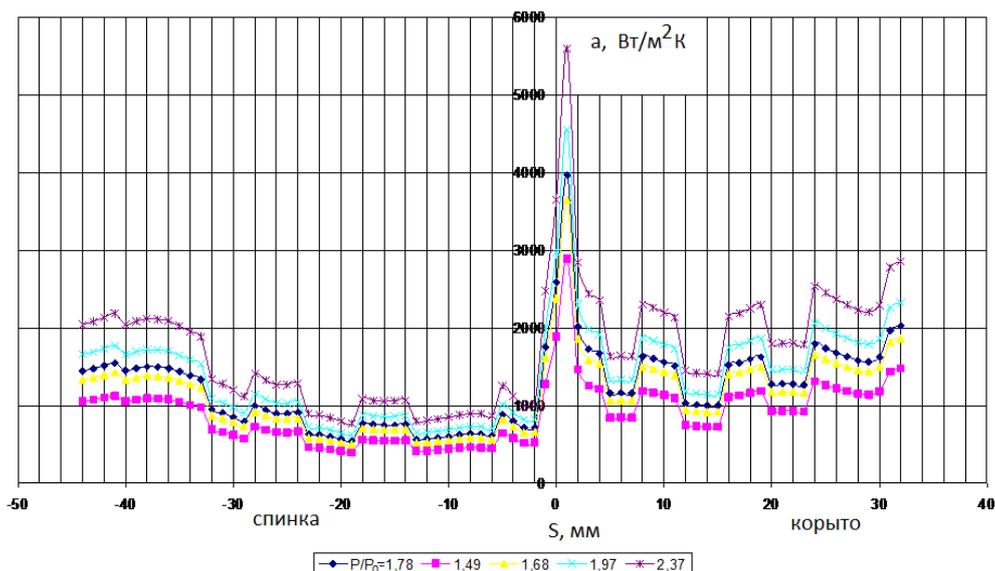


Рис. 4. Распределение коэффициентов теплоотдачи к охлаждающему воздуху по внутренней поверхности среднего сечения пера в зависимости от перепада давления

Список литературы

1. **Тепловая** защита лопаток турбин / Б.М. Галицкий, В.Д. Совершенный, В.Ф. Формалев, М.С. Черный; под ред. Б.М. Галицкого. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 356 с.
2. **Метод** автоматизированного проектирования системы охлаждения лопаток газовых турбин / Н.М. Галкин, Б.М. Галицкий, М.С. Черный, И.В. Шевченко // Тяжелое машиностроение. – 1990. – № 10. – С. 2–4.
3. **Экспериментально-расчетные** исследования охлаждаемых лопаток ГТЭ-65 / Л.А. Хоменок, М.С. Золоторов, А.Г. Николаев и др. // Теплоэнергетика. – 2008. – № 1. – С. 42–45.
4. **Тепловые** и гидравлические характеристики охлаждаемых лопаток газовых турбин / С.З. Копелев, М.Н. Галкин, А.А. Харин, И.В. Шевченко. – М.: Машиностроение, 1993. – 176 с.
5. Laser additive manufacturing of turbine components, precisely and repeatable / A. Techel, F. Brückner, S. Nowotny, R. Wappler, S. Scharek, F. Kubisch, S. Bonß, E. Beyer // Lasters Today. – 2011. – 20 мая [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.laserstoday.com/2011/05/laser-additive-manufacturing-of-turbine-components-precisely-and-repeatable>.
6. **Hoque M.E.** Rapid prototyping technology – principles and functional requirements / Proceedings of Intech conference. – Rijeca, Croatia, 2011.
7. **Faster** design of gas turbine parts using rapid prototype models for verification of coolant flow characteristics / A. Sedlov, A. Bauer, A. Mozharov, M. Gritsh, V. Kostege // Proceedings of Turbine technical conference and Exposition. – San Antonio, USA, 2013.
8. **Шевченко И.В., Логвиненко Н.В.** Метод тепловизионного контроля тепловых характеристик охлаждаемых лопаток газовых турбин // Технология машиностроения. – 2007. – № 9. – С. 47–49.

References

1. Galitseyskiy, B.M., Sovershennyiy, V.D., Formalev, V.F., Chernyy, M.S. *Teplovaya zashchita lopatok turbin* [Thermal

protection of turbine blades]. Moscow, Izdatel'stvo MAI, 1996. 356 p.

2. Galkin, N.M., Galitseyskiy, B.M., Chernyy, M.S., Shevchenko, I.V. *Metod avtomatizirovannogo proektirovaniya sistemy okhlazhdeniya lopatok gazovykh turbin* [A method of computer-aided design of gas turbine blade cooling system]. *Tyazheloe mashinostroenie*, 1990, no. 10, pp. 2–4.

3. Khomenok, L.A., Zolotorov, M.S., Nikolayev, A.G., Egorov, I.N., Lebedev, A.S., Krivososova, V.V., Sundukov, Yu.M. *Ekspperimental'no-raschetnye issledovaniya okhlazhdaemykh lopatok GTE-65* [Experimental calculation investigations of the cooled blades of the GTE-65 gas-turbine unit]. *Teploenergetika*, 2008, no. 1, pp. 42–45.

4. Kopelev, S.Z., Galkin, M.N., Kharin, A.A., Shevchenko, I.V. *Teplovye i gidravlicheskie kharakteristiki okhlazhdaemykh lopatok gazovykh turbin* [Thermal and hydraulic characteristics of cooled gas turbine blades]. Moscow, Mashinostroenie, 1993. 176 p.

5. Techel, A., Brückner, F., Nowotny, S., Wappler, R., Scharek, S., Kubisch, F., Bonß, S., Beyer, E. *Laser additive manufacturing of turbine components, precisely and repeatable*. Lasters Today, 2011, May 20th. Available at: <http://www.laserstoday.com/2011/05/laser-additive-manufacturing-of-turbine-components-precisely-and-repeatable>.

6. Hoque, M.E. *Rapid prototyping technology – principles and functional requirements*. Proceedings of Intech conference. Rijeca, Croatia, 2011.

7. Sedlov, A., Bauer, A., Mozharov, A., Gritsh, M., Kostege, V. *Faster design of gas turbine parts using rapid prototype models for verification of coolant flow characteristics*. Proceedings of Turbine technical conference and Exposition. San Antonio, USA, 2013.

8. Shevchenko, I.V., Logvinenko, N.V. *Metod teplovizionnogo kontrolya teplovykh kharakteristik okhlazhdaemykh lopatok gazovykh turbin* [A method of thermal control thermal characteristics of cooled gas turbine blades]. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2007, no. 9, pp. 47–49.

Рогалев Андрей Николаевич,

ФГБОУВО «Национальный исследовательский университет "МЭИ"»,
кандидат технических наук, начальник управления инновационной деятельности,
e-mail: r-andrey2007@yandex.ru

Шевченко Михаил Игоревич,

ФГБОУВО «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»,
аспирант,
e-mail: mick63f@gmail.com