

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 621.165

**НОВЫЙ МЕТОД ОХЛАЖДЕНИЯ ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИН
NEW METHOD FOR COOLING GAS TURBINE BLADES**

**Милованова В. В., канд. техн. наук, доцент, Ярошенко В. М., канд. техн. наук, доцент,
Одесская национальная академия пищевых технологий, г. Одесса**

**Milovanova V. V., Yaroshenko V. M.
Odessa National Academy of Food Technologies, Odessa, Ukraine**

Copyright © 2016 by author and the journal "Scientific Works".

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Важным фактором повышения коэффициента полезного действия газотурбины является процесс охлаждения лопаток турбины. Проектирование эффективной системы охлаждения является очень сложным процессом. Однако это необходимо для проектирования турбин с наиболее эффективным преобразованием энергии. С этой точки зрения тема охлаждения стала в настоящее время особенно актуальной.

Существует несколько методов охлаждения лопаток газотурбин. Конвективный метод охлаждения лопаток турбин является методом внутреннего охлаждения путем конвекции. Пленочный метод характеризуется наличием воздушной пленки, которая защищает лопатку от нагревания. Оба традиционных метода охлаждения не обладают высокой эффективностью. Отражательный метод охлаждения был получен в результате попыток оптимизации процесса охлаждения лопаток газотурбин. При использовании метода отражательного охлаждения поток холодного воздуха вдувается внутрь лопатки и отражается от её стенок. Коэффициент теплопередачи при этом принимает очень высокие значения.

Отражательное охлаждение для реактивных двигателей самолетов исследуется уже в течение десяти лет. До сих пор было трудно практически реализовать принципы отражательного охлаждения из-за технических проблем. Только появление новых материалов и технологий изготовления и соответствующая экстремально высокая точность изготовления создали предпосылки для промышленного производства лопаток с отражательным охлаждением. Затраты на проектирование такой системы охлаждения достаточно высокие, но это окупается выигрышем в температуре и коэффициенте полезного действия газотурбины. Главной проблемой при разработке системы отражательного охлаждения является оптимизация протекания потока охлаждающего воздуха внутри лопатки для обеспечения оптимального процесса охлаждения.

В статье проведен анализ метода отражательного охлаждения, его преимущества перед традиционными методами, а также проблемы, которые встают на стадии его разработки, как например, проблемы при моделировании метода отражательного охлаждения.

Особое внимание уделяется перспективам развития современной системы охлаждения лопаток газотурбин, а также влияние эффективной системы охлаждения на повышение эффективности газотурбины в целом.

An important factor in increasing the efficiency of the turbine is the cooling process of the turbine blades. Designing of an effective cooling system is a very complex process. However, it is necessary to design the turbines with most efficient energy conversion. From this viewpoint, the cooling is considered currently as particularly relevant topic.

There are several cooling methods of the gas turbine blades. The convective cooling method of the gas turbine blades is a method of internal cooling via convection. The film method is characterized by availability of the air film which protects a blade from heating. The both traditional cooling methods are not characterized by high efficiency. The reflective cooling method was developed as a result of trying to optimize the cooling process of gas turbine blades. When using the reflective cooling method, the cooling airflow is blown into the blade and is reflected from its walls. In doing so the heat transfer coefficient takes very high values.

The reflective cooling for the jet aircrafts has been examining for more than ten years. Until now, it was difficult to implement practically the principles of the reflective cooling due to technical problems. Only the emergence of new materials and manufacturing techniques and extremely high accuracy has created the prerequisites for manufacturing

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

the blades with reflective cooling. The costs for designing of such cooling system are quite high but it pays off a win in the temperature and efficiency of gas turbines.

The main problem in the design of the reflective cooling system is optimization of the cooling airflow inside the blade for the most effective cooling process.

The article analyzes the method of reflective cooling, its advantages in comparison with traditional methods, as well as the problems that arise at the stage of its development, for example, problems of the modeling method of the reflective cooling.

The particular attention is paid to the development prospects of modern gas turbine blade cooling systems, as well as the influence of effective cooling system on improving the efficiency of gas turbines in general.

Ключевые слова: охлаждение, газотурбина, лопатка, энергомашиностроение.

Key words: cooling, gas turbine, blade, power—plant.

Вступлення. Существует опробованная технология для охлаждения газотурбинных двигателей самолетов и стационарных газотурбинных установок. Несмотря на это, первые теоретические попытки оптимизировать процесс охлаждения лопаток газотурбин были предприняты еще в первой половине девятнадцатого века [1—3]. Причина заключается в следующем: оптимизация данного процесса позволяет повысить энергетический коэффициент полезного действия (КПД) установок и снизить количество вредных выбросов в окружающую среду. Такой результат, например, можно достичь при применении отражательного метода охлаждения стенок лопаток, которому в настоящее время уделяется большое внимание [4—7]. Так, в Федеральной высшей политехнической школе Лозанны (Швейцария) проводятся теоретические и экспериментальные исследования данного метода, которые помогут производить более эффективные газотурбины. Данный проект финансируется Федеральным ведомством Швейцарии по энергетике [8].

Около 1700 дм³ керосина сжигаются во время полета самолета дальнего следования типа Airbus A380 на 100 км полета. Во время перелета в 10 000 км из Франкфурта в Сингапур потребляется приблизительно 170 000 дм³ горючего. При таких потребляемых объемах даже небольшие усовершенствования в системе охлаждения реактивного двигателя помогут сэкономить достаточно много горючего. Поэтому во всем мире интенсивно исследуются возможности энергетической оптимизации деталей и компонентов газотурбин [9—12].

Газотурбины являются центральным элементом двигателя самолета, а также применяются в качестве стационарных установок, например, в качестве газотурбинных электростанций, работающих на природном газе или нефти и производящих электроэнергию. Но, независимо от типа газотурбинной установки, исходным требованием для оптимизации ее КПД является следующее: сначала компрессор должен сжать воздух при минимальном потреблении энергии, затем смесь из сжатого воздуха и горючего должна сгореть в камере сгорания с образованием горячего газа и при наименьшем выделении вредных веществ, загрязняющих атмосферу, (как, например, окислы азота). Затем, при расширении в турбине, тепловая энергия должна наиболее эффективно преобразоваться в кинетическую энергию ротора. Кроме этого, из определенного количества горючего необходимо получить как можно больше движущей энергии или электрического тока, т.е. газотурбина должна иметь как можно более высокий КПД.

Постановка задачи. Важным фактором повышения КПД турбины является процесс охлаждения лопаток турбины. Когда струя газа из камеры сгорания поступает в турбину, температура реактивного двигателя достигает 1500 °С. Такие температуры металлические сплавы газотурбин не могут выдержать, и поэтому их обычно охлаждают до приблизительно 600 °С. Для этого обычно применяются два способа. Первый — конвективный метод охлаждения лопаток турбин является методом внутреннего охлаждения и заключается в следующем: в каналах лопаток циркулирует поток холодного воздуха, который так закручивается посредством специальных ребер, чтобы обеспечить как можно более эффективное охлаждение [13]. Второй метод — это пленочное охлаждение, это результат дальнейшего развития метода внутреннего охлаждения, при этом холодный воздух выдувается изнутри лопатки турбины через отверстия на верхнюю сторону лопатки, где образует воздушную пленку, которая защищает лопатку от нагревания [13].

Конструирование эффективной системы охлаждения является очень сложным процессом. Однако это необходимо для проектирования турбин с наиболее эффективным преобразованием энергии. С этой точки зрения тема охлаждения стала в настоящее время особенно актуальной. Эффективность работы газотурбины согласно законам физики тем выше, чем выше температура горячего газа на входе в турбину. При этом даже относительно небольшие относительные повышения температуры горячего газа дают достаточно большой эффект. Например, при повышении температуры горячего газа на входе в турбину на 50 °С, полезная мощность повышается на 8...9 %, а тепловой КПД повышается на 2...3 %.

Существуют различные пути оптимизации системы охлаждения лопаток турбин. Главной целью при этом всегда является конструирование системы охлаждения таким образом, чтобы холодный воздух в лопатке тур-

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

біны произвел наибольший охлаждающий эффект. Большое значение при этом играет дизайн лопатки, а также расположение охлаждающих каналов. «Новые технологии производства лопаток турбин помогают нам улучшать систему охлаждения», — говорит инженер Марк Хенце, специалист по системам охлаждения газотурбин фирмы Alstom (Швейцария).

В данной работе мы хотели рассмотреть проблемы, возникающие при усовершенствовании системы охлаждения лопаток газотурбин, а также приведем пример разработки нового метода охлаждения лопаток газотурбин, а именно — метода отражательного охлаждения.

При подготовке статьи использовались материалы зарубежных Интернет-ресурсов.

Разработка новой системы охлаждения (Лозанна, Швейцария). Alstom является поставщиком турбин по всему миру, он изготавливает, в том числе, и турбины для газотурбинных установок. Чтобы предлагать своим клиентам конкурентоспособную продукцию, фирма имеет собственный отдел по исследованию и развитию, где в кооперации с университетскими партнерами разрабатываются различные оптимизационные проекты. На сегодняшний день только в области систем охлаждения в разработке находятся 10 проектов, один из них в кооперации с Федеральной высшей политехнической школе Лозанны (Швейцария) [8]. Основной областью исследований является система отражательного охлаждения. При отражательном охлаждении (impingement cooling) лопатка турбины имеет двойную стенку. Внутренняя стенка имеет отверстия, через которые внутрь лопатки втекает холодный воздух и отражается как луч от внутренней стороны наружной стенки, охлаждая ее при этом. Большое преимущество этого метода заключается в том, что коэффициент теплопередачи при этом принимает очень высокие значения. За счет этого для охлаждения требуется меньшее количество охлаждающего воздуха [14].

Снижение расхода холодного воздуха имеет важное значение, т.к. воздух для охлаждения лопаток турбины отводится от компрессора перед входом в турбину. Обычно для охлаждения лопаток турбины требуется около 20 % сжатого компрессором воздуха. «Нашей целью является снижение этого показателя значительно ниже 20 %», — заявляет доктор Петер Отт, преподаватель по тепловым турбинам Федеральной высшей политехнической школы Лозанны (Швейцария), руководитель данного проекта, который финансируется Федеральным ведомством Швейцарии по энергетике. «Если мы отводим от компрессора меньше сжатого воздуха для охлаждения, то мы можем использовать больше сжатого воздуха для процесса горения. Таким образом, газотурбина будет иметь более высокий КПД.

Основные проблемы метода отражательного охлаждения. Отражательное охлаждение для реактивных двигателей самолетов исследуется уже в течение десяти лет.

Например, Rolls Royce работает над соответствующими реактивными двигателями. На газотурбинных электростанциях такая система охлаждения тоже уже применяется, однако, расположить систему охлаждения достаточно близко к стенке лопатки удавалось только в единичных случаях и пока что исследуется на прототипах. До сих пор было трудно практически реализовать принципы отражательного охлаждения из-за технических проблем. Только появление новых материалов и технологий изготовления и соответствующая экстремально высокая точность изготовления создали предпосылки для промышленного производства лопаток с отражательным охлаждением.

В особенности это касается расположения системы отражательного охлаждения близко к стенке лопатки. Если раньше внутренняя стенка лопатки была изготовлена из листовой стали с отверстиями, которая затем должна отдельно закрепляться на лопатке, то сейчас обе стенки — внутренняя стенка турбины с отверстиями и ее наружная стенка — могут быть изготовлены непосредственно методом литья. Особое преимущество этой методики изготовления заключается в возможности применения инновационной пристенной схемы охлаждения. Затраты на проектирование такой системы охлаждения достаточно высокие, но это окупается выигрышем в температуре и КПД газотурбины [15].

В проекте Федеральной высшей политехнической школе Лозанны (Швейцария) исследуются факторы, влияющие на эффективность системы отражательного охлаждения [16].

Например, как наиболее эффективно расположить отверстия во внутренней стенке лопатки турбины? При каком расстоянии между внутренней и наружной стенками лопатки обеспечивается оптимальное охлаждение? Какая оптимальная скорость потока холодного воздуха, выражаемая числом Рейнольдса?

Модель лопатки турбины из плексигласа. Чтобы ответить на эти вопросы, исследователи создали целый ряд моделей лопаток турбин из плексигласа. Эти модели воспроизводят охлаждающие каналы в лопатке турбины в масштабе 50:1 и служат для детального изучения процесса охлаждения в лопатке. Эта модель позволяет определить значения параметров процесса охлаждения при высокой объемной разрешающей способности.

В качестве индикаторов температуры применяются термохромические жидкие кристаллы [17].

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

Результаты исследований моделей с различной геометрией позволяют оптимизировать геометрию каналов системы охлаждения.

Это может быть выполнено в соответствии с различными расчетными критериями, как например: максимальное локальное охлаждение, очень равномерное охлаждение, минимизация потребления холодного воздуха, минимизация потерь давления. Очень высокое объемное разрешение результатов испытаний позволяет проводить текущий контроль расчетных методов, по которым каналы охлаждения были спроектированы [16].

Заключение. Повышение удельной полезной мощности газотурбины и общего КПД установки можно достичь путем повышения степени сжатия компрессора и соответственно повышения температуры на входе в турбину. В результате этого повышается тепловая нагрузка на камеру сгорания и детали турбины [18]. Несмотря на применение новых жаростойких материалов необходимо усовершенствовать систему охлаждения деталей газотурбины. Повышение температуры в камере сгорания в целях повышения КПД установки приводит к повышению расхода охлаждающего воздуха, который может на 20 % превышать расход воздуха основного потока. Чтобы повысить общий КПД установки, необходимо сочетать повышение температуры потока на входе в турбину с применением более интенсивной системы охлаждения и оптимизацией конфигурации охлаждающего контура [19], а не с повышением расхода охлаждающего воздуха, что само по себе снижает КПД.

Охлаждение лопаток газотурбинных установок может реализовываться различными методами, оптимизация этих методов может происходить по разным параметрам. Наиболее перспективным считается метод отражательного охлаждения, разрабатываемый в настоящее время.

Литература

1. Пат. DE 491738 C DE. Einrichtung zur Kühlung der Laufschaufeln von Gasturbinen, bei welcher das Kühlmittel unter Druck durch die hohl ausgebildeten Laufschaufeln geführt wird [Электронный ресурс]: [Веб-сайт] / Heinrich Bauhaus. – заявник і патентовласник Maschf Augsburg Nuernberg Ag – № DE1929M0109073; заявл. 28.02.1929; опубл. 12.02.1930. – Режим доступа: <http://www.google.de/patents/DE491738C?cl=zh-CN>. (Дата звернення 13.05.2016 р). – Назва з екрану.
2. Пат. DE 891639 C DE. Kühlung der Schaufeln von Turbomaschinen [Электронный ресурс]: [Веб-сайт] / Karl Dr-Ing Leist. – заявник і патентовласник Karl Dr-Ing Leist – № DE1940L0005668; заявл. 05.10.1940; опубл. 05.04.1954. – Режим доступа: <https://google.com/patents/DE891639C?cl=ja>. (Дата звернення 13.05.2016 р). – Назва з екрану.
3. Пат. DE 559676 C DE. Verfahren zur Kuehlung von Schaufeln, insbesondere fuer Brennkraftturbinen [Электронный ресурс]: [Веб-сайт] / E. H. Hans Holzwarth Dr Ing. – заявник і патентовласник E. H. Hans Holzwarth Dr Ing. – № DE1931H0128234; заявл. 20.08.1931; опубл. 22.09.1932. – Режим доступа: <http://www.google.com/patents/DE559676C>. (Дата звернення 13.05.2016 р). – Назва з екрану.
4. Пат. DE 60318640 T2 DE, ES, FR, GB, IT, SE Prallkuehlung für Hinterkanten einer Turbinenschaufel [Электронный ресурс]: [Веб-сайт] / Manning, Robert Francis, Newburyport, Massachusetts 01950, US; Taslim, Mohammad Esmail, Needham, Massachusetts 02492 US. – заявник і патентовласник General Electric Co., Schenectady, N. Y., US. – № 0001327747; заявл. 09.01.2003; опубл. 08.01.2009. – Режим доступа: URL:<http://www.patent-de.com/20090108/DE60318640T2.html> (Дата звернення 13.05.2016 р). – Назва з екрану.
5. Пат. EP 1 496 203 B1 DE, FR, GB Turbinens chaufel mit Prallkuehlung [Электронный ресурс]: [Веб-сайт] / Davison, Peter 15838 Wunsdorf (DE), Blume, Barbara 14165 Berlin (DE) / – заявник і патентовласник Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co KG 15827 Dahlewitz (DE). – № 04090262.9; заявл. 12.01.2005; опубл. 08.02.2006. – Режим доступа: URL:<https://data.epo.org/publication-server/pdf-document?pn=1496203&ki=B1&cc=EP>. (Дата звернення 13.05.2016 р). – Назва з екрану.
6. Aero thermodynamik Prallkuehlung [Electronic resource] // Institut für Luft- und Raumfahrt TU Berlin. – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: URL:<https://www.aero.tu-berlin.de/menue/forschung-forschungsthemen/aerothermodynamik/prallkuehlung/> (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
7. Prallkühlprüfstand. Technische Universität Darmstadt [Electronic resource] // Bundesamt für Energie BFE, Success Stories–Fachartikel – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: URL:http://www.bfe.admin.ch/cleantech/05761/05763/05782/index.html?lang=de&dossier_id=05135 (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
8. Андреев, К. Д. Разработка эффективных систем охлаждения направляющей лопатки высокотемпературной газовой турбины на базе интенсификации теплообмена с вихревой матрицей [Электронный ресурс]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.04.12 / Андреев Константин Дмитриевич; Санкт-Петербургский государственный технический университет; науч. рук. Арсеньев Л. В., Рассохин В.А. – Санкт-Петербург, 1999. – 142 с. – Режим

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

- доступа: <http://www.dissercat.com/content/razrabotka-effektivnykh-sistem-okhlazhdeniya-napravlyayushchei-lopatki-vysokotemperaturnoi-g> (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
9. Нагоро, Г. П. Эффективные способы охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин [Текст] / Г. П. Нагоро. – М.: Изд-во МАИ, 1996. – 100 с.
 10. Ernst Schmidt Wärmeübertragung durch natürliche Konvektion in starken Fliehkraftfeldern bei der Kühlung von Gasturbinen [Electronic resource] // Digitale Bibliothek Braunschweig – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00026892/Schmidt_Waermeuebertragung.pdf 05135 (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
 11. Material auf bau von Flugzeugturbinen auf molekularer Ebene analysiert [Electronic resource] // Universität Jena – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: <http://www2.uni-jena.de/journal/unimai00/flug.htm> (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
 12. Wärmeübertragung [Electronic resource] // Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: http://www.uni-stuttgart.de/itlr/aktuelles/Waermeuebertragung_2010.pdf, (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
 13. Kühlung von Gasturbinenkomponenten [Electronic resource] // Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt Universität Stuttgart. – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: URL: <http://www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/waerme/index.php?open=k> (viewed on May 13, 2016). – Title from the screen.
 14. Поткин, А. Н. Разработка комплексного подхода к проектированию охлаждаемых высокотемпературных газовых турбин с целью снижения рисков и сроков разработки [Электронный ресурс]: дис. ... канд. техн. наук: 05.07.05 / Андрей Николаевич Поткин; Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьёва – Рыбинск, 2014. – 131 с. Режим доступа: http://www.rsatu.ru/arch/diss-/potkin_an_diss.pdf (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
 15. Neue Kühltechnik steigert Effizienz von Gasturbinen [Electronic resource] // Erneubare Energie. News. – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: URL: <http://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/29197/epfl-neue-kuehltechnik-steigert-effizienz-von-gasturbinen> (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
 16. Gerhard Angerer Rohstoffe für Zukunftstechnologien [Electronic resource] // Technische Universität Ilmenau – Electronic data. – Mode of access: World Wide Web: <http://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt/Lehre/Vorlesung/Werkstoffe/angerer-rohstoffe-fuer-zukunftstechnologien.pdf> (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
 17. Höhere Temperaturen in Turbinen [Electronic resource] // Kraftwerkforschung – Mode of access: World Wide Web: <http://kraftwerkforschung.info/hoehere-temperaturen-in-turbinen/> (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
 18. Schulz, A. V. Zum Einfluss hoher Freistromturbulenz, intensive Kühlung und einer Nachlaufströmung auf den äußeren Wärmeübergang einer konvektiv gekühlten Gasturbinenschaukel [Electronic resource] / A. V. Schulz // Leibniz Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek – Mode of access: World Wide Web: <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMAM87102731363/Zum-Einfluss-hoher-Freistromturbulenz-intensiver/> (дата обращения 13.05.2016 г). – Заглавие с экрана.
 19. Цанев, С. В. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов / С. В. Цанев, В. Д. Буров, А. Н. Ремезов; Под ред. С. В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 579 с.

References

1. Heinrich Bauhaus. (1930). Maschf Augsburg Nuernberg Ag. Patent DE 491738 C DE Einrichtung zur Kühlung der Laufschaufeln von Gasturbinen, bei welcher das Kühlmittel unter Druck durch die hohl ausgebildeten Laufschaufeln geführt wird. Available at: <http://www.google.de/patents/DE491738C?cl=zh-CN>.
2. Karl Dr-Ing Leist. (1954). Karl Dr-Ing Leist. Patent DE 891639 C DE. Kühlung der Schaufeln von Turbomaschinen. Available at: <https://google.com/patents/DE891639C?cl=ja>.
3. E. H. Hans Holzwarth Dr Ing. (1932). E. H. Hans Holzwarth Dr Ing. Patent DE 559676 C DE. Verfahren zur Kuehlung von Schaufeln, insbesondere fuer Brennkraftturbinen. Available at: <http://www.google.com/patents/DE559676C>.
4. Manning, Robert Francis. (2009). Patent DE 60318640 T2 DE, ES, FR, GB, IT, SE. Prallkühlung für Hinterkanten einer Turbinenschaukel. Available at: URL: <http://www.patent-de.com/20090108/DE60318640T2.html>
5. Davison, P., Blume, B. (2006). Rolls-Royce Deutschland Ltd & Co. Patent EP 1 496 203 B1 DE, FR, GB. Turbinenschaukel mit Prallkühlung. Available at: URL: <https://data.epo.org/publication-server/pdf-document/?pn=1496203&ki=B1&cc=EP>.

СТВОРЕННЯ НОВОГО ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ОБЛАДНАННЯ, ПРОЦЕСІВ І АПАРАТІВ, ТЕОРІЇ, МЕТОДІВ ЇХ РОЗРАХУНКУ ТА ПРОЕКТУВАННЯ. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ В ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

6. Aero thermodynamik Prallkühlung. (2016). Institutfür Luft- und Raumfahrt TU Berlin. Available at: URL:<https://www.aero.tu-berlin.de/menue/forschung/forschungsthemen/aerothermodynamik/prallkuehlung/>.
7. Prallkühlprüfstand. Technische Universität Darmstadt. (2016). Bundesamt für Energie BFE, Success Stories– Fachartikel. Available at: URL:http://www.bfe.admin.ch/cleantech/05761/05763/05782/index.html?lang=de-&dossier_id=05135.
8. Andreev, K. D. Razrabotka jeffektivnyh sistem ohlazhdenija napravljajushhej lopatki vysokotemperaturnoj gazovoj turbiny na baze intensivifikacii teploobmena s vihrevoj matricej. Dokt. Diss. [Turbomashiny i kombinirovannye turbostanovki. Dokt. Diss.]. Sankt-Peterburg, 1990. 142 p. – Available at: <http://www.dissercat.com/content/-razrabotka-effektivnykh-sistem-okhlazhdeniya-napravlyayushchei-loparki-vysokotemperaturnoi-g>. (In Russian).
9. Nagoga, G. P. (1996). Jeffektivnye sposoby ohlazhdenija lopatok vysokotemperaturnyh gazovyh turbin. Moscow, Izd-vo MAI, 100. (In Russian).
10. Ernst Schmidt Wärmeübertragung durch naturlicheKonvektion in starken Fliehkraftfeldern bei der Kühlung von Gasturbinen. (2016). Digitale Bibliothek Braunschweig. Available at: http://rzbl04.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00026892/Schmidt_Waermeuebertragung.pdf05135.
11. Material auf bauvon Flugzeugtur binenauf molekularer Ebeneanalysiert. (2016). Universität Jena. Available at: <http://www2.uni-jena.de/journal/unimai00/flug.htm>.
12. Wärmeübertragung. (2016). Institut für Thermodynamik der Luft- und Raumfahrt. Available at: http://www.uni-stuttgart.de/itlr/aktuelles/Waermeuebertragung_2010.pdf.
13. Kühlung von Gasturbinenkomponenten. (2016). Institut für Thermodynamikder Luft- und Raumfahrt Universität Stuttgart. Available at: URL:<http://www.uni-stuttgart.de/itlr/forschung/waerme/index.php?open=k>.
14. Potkin, A. N. Razrabotka kompleksnogo podhoda k proektirovaniju ohlazhdaemyh vysokotemperaturnyh gazovyh turbin s cel'ju snizhenija riskov i srokov razrabotki. Dokt. Diss. [Teplovye, jelektro ракетnye dvigateli i jenergoustanovki letatel'nyh apparatov. Dokt. Diss.]. Rybinsk, 2014. 131 p. – Available at: http://www.rsatu.ru/arch/diss-/potkin_an_diss.pdf. (In Russian).
15. Neue Kühltechniksteigert Effizienz von Gasturbinen. (2016). Erneubare Energie. News. Available at: URL:<http://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/29197/epfl-neue-kuehltechnik-steigert-effizienz-von-gasturbinen>.
16. Gerhard Angerer Rohrstoffefür Zukunftstechnologien. (2016). Technische Universität Ilmenau. Available at: <http://www.tu-ilmenau.de/fileadmin/media/wt/Lehre/Vorlesung/Werkstoffe/angerer-rohstoffe-fuer-zukunftstechnologien.pdf>.
17. Höhere Temperaturenin Turbinen. (2016). Kraftwerkforschung. Available at: <http://kraftwerkforschung.info/hoehere-temperaturen-in-turbinen>.
18. Schulz, A. V. (2016). Zum Einflussho her Freistromturbulenz, intensive Kühlungundeiner Nachlaufströmungauf den äußeren Wärmeü bergangeiner konvektiv gekühlten Gasturbinens chaufel. Leibniz Informations zentrum Technikund Naturwissenschaften Universitäts bibliothek. Available at: World Wide Web: <https://www.tib.eu/en/search/id/tema%3ATEMAM87102731363/Zum-Einfluss-hoher-Freistromturbulenz-intensiv-er>.
19. Canev, S. V., Burov, V. D., Remezov, A. N. (2002). Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovyh jelektrostancij. Moscow, MJeI, 579. (In Russian).