

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СУДОВЫХ И АВИАЦИОННЫХ ЛОПАТОЧНЫХ МАШИН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НОВЫХ ПОДХОДОВ

И.А. Кривошеев, проф. ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», д-р техн. наук, krivosh777@mail.ru

К.Е. Рожков, науч. сотр. ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», rke85@mail.ru

Рассматриваются новые подходы, методы и технологии проектирования, изготовления судовых и авиационных лопаточных машин. Описаны новые материалы и конструкторские решения. Показано, что их использование позволит обеспечить конкурентоспособность продукции отечественного судостроения, авиа- и двигателестроения (разрабатываемой судостроительными верфями и заводами, Дивизионами ОАК и ОДК), повысить обороноспособность России и уровень подготовки кадров для высокотехнологических, прежде всего оборонных отраслей промышленности.

Ключевые слова: летательный аппарат, судно, силовая установка, движитель, двигатель, лопаточная машина, компрессор, вентилятор, воздушный, гребной, вертолетный винт, турбина, композиционный, наноструктурный материал, широкохордная, полая лопатка, моноколесо (блиск), проектирование, изготовление, сварка трением, поддержка в эксплуатации.

METHODS OF DESIGN OF MARINE AND AIRCRAFT TURBOMACHINERY USING NEW APPROACHES

I.A. Krivosheyev, Professor, «Ufa State Aviation Technical University», Ph.D. of Engineering, krivosh777@mail.ru

K.E. Rojkov, Scientific Researcher, «Ufa State Aviation Technical University», rke85@mail.ru

The article considers new approaches, methods and techniques of designing and manufacturing of marine and aircraft turbomachinery. It describes new materials and design solutions. It shows that the use of these methods will ensure the competitiveness of domestic shipbuilding, aircraft and engine designing (developed by domestic shipyards and factories), raising Russia's defense potential and increase the level of training for high-tech, especially in the defense industry.

Key words: aircraft, vessel, power plant, propeller, jet, blade machine, compressor, fan, air, rowing, helicopter propeller, turbine, composite, nanostructured material, wide chord, hollow blade, monowheel (bliske), design, manufacture, friction welding, support in operation.

Введение

Выполненный анализ показал, что в настоящее время во всех промышленно развитых странах при создании судов и летательных аппаратов (ЛА) новых поколений, их двигателей и движителей, силовых установок (СУ), в т. ч. вспомогательных (ВСУ), большое внимание уделяется не только повышению тактико-технических данных, но и надежности, удобству эксплуатации и сокращению эксплуатационных затрат. Это достигается за счет создания судов и ЛА, а также двигателей новых поколений с улучшенными тактико-техническими данными (ТТД), экономичностью, ресурсом, удобством обслуживания и поддержки в эксплуатации (в зарубежной терминологии support — «поддерживаемость»).

В России поставлена задача обеспечения конкурентоспособности продукции отечественного судостроения и авиастроения. В связи с вступлением России в ВТО такая конкуренция обострилась как на внешнем, так и на внутреннем рынке. Создание конкурентоспособных лопаточных машин (ЛМ) современными методами связано с продукцией, разрабатываемой судостроительными компаниями, Объединенной авиастроительной корпорации (ОАК), Дивизионами Объединенной двигателестроительной корпорации (ОДК). Решение этой задачи имеет большое значение для развития экономики страны и обеспечения ее обороноспособности. При этом одновременно должна решаться проблема подготовки кадров (способных преодолеть допущенное отставание) для высокотехнологических, прежде всего, оборонных отраслей промышленности.

В области гражданского и военного судостроения и авиации, обозначился переход к созданию новых судов и летательных аппаратов V поколения в условиях жесткой конкуренции с зарубежными фирмами, при этом на передний план выходят их ТТД, сроки создания новых изделий, надежность и удобство эксплуатации. В этой связи в России активно развиваются новые подходы к проектированию ЛМ, используемых в составе судовых и авиационных двигателей и движителей.

Новые методы проектирования и изготовления судовых авиационных лопаточных машин

Лопаточные машины являются основным элементом современных судовых и авиационных двигателей и движителей. Это компрессоры, турбины, воздушные, гребные, вертолетные винты. Их характеристики, надежность, удобство эксплуатации в существенной мере определяют соответствующие характеристики двигателей, судов и ЛА в целом. В настоящее время развиваются новые подходы к проектированию лопаточных машин:

- метод отслеживания струй (МОС);
- использование подвижных Лагранжевых сеток;
- обобщение экспериментальных данных с учетом закономерностей изменения характеристик решеток профилей, ступеней, каскадов и ЛМ, их использования при планировании новых экспериментов и испытаний, при диагностике состояния ЛМ и т. п.

Все шире используются новые конструкторские решения – биротативные схемы, широкохордные и полые лопатки, рабочие моноколеса (блиски), лопатки с искривленными передними и задними кромками. Возможность их применения тесно связана с использованием новых материалов – композиционных (с полимерной и металлической матрицей), наноструктурных и т. п., а также новых технологий изготовления – сварки трением при изготовлении моноколес (блисков), специальных технологий изготовления полых лопаток и лопаток из композиционных материалов. Такие работы ведутся в рамках Дивизиона ОДК «Двигатели для боевой авиации» в кооперации ряда предприятий (ОАО «УМПО», ОАО «НПП Мотор», ОАО «УАП Гидравлика», ОАО «КумАПО») с участием УГАТУ (рис. 1).

За рубежом работы по совершенствованию ЛМ и методов их проектирования и изготовления активно ведутся также в рамках интернациональных комплексных программ по развитию авиации, в том числе газотурбинных двигателей. В числе этих программ:

- *IHPTE* – программа Integrated High Performance Turbine Engine Technology (создания революционных технологий для улучшения характеристик силовых установок при низкой стоимости их производства и технического обслуживания для новейших и существующих самолетов), развернута по инициативе Министерства обороны США (участвуют ВВС, ВМФ, DARPA, NASA; университеты и основные авиадвигателестроительные компании США – Allison, AADC, Rolls-Royce North America, RRNA, GE, PW, WI, Allied Signal Engines, Honeywell и Teledyne Ryan Aeronautical).

- *Flightpath 2050* – Europe's Vision for Aviation – программа развития авиационной отрасли в рамках ЕС.

- *Engine 3E* – программа разработки двигателя следующего поколения (участвуют компании: MTU Aero Engines, RRD, DLR; университеты и промышленность при поддержке пра-



Рис. 1. Лопаточные машины в составе разрабатываемых газотурбинных двигателей (ГТД) с применением новых технологических решений

вительства Германии и т. д.). В требования к перспективному двигателю в части ЛМ включены повышенный КПД и сниженный уровень шума (не менее чем на 10 дБ по сравнению с современными образцами).

При проектировании компрессора, размеры проточной части, число ступеней и их параметры определяются в результате газодинамического расчета. При этом обычно расчет ведется только для одного режима, который называется расчетным. Для определения параметров компрессора на других режимах используются характеристики компрессоров, полученные экспериментально. Поскольку на ранних этапах проектирования экспериментальные характеристики отсутствуют, проектировщик принимает решения в условиях неопределенности. Существуют различные подходы к математическому описанию процессов, протекающих в осевых компрессорах, которые позволяют получать расчетным путем характеристики осевых компрессоров. К наиболее известным методам расчета можно отнести использование обобщенных характеристик ступеней компрессора, метод сложения различных видов потерь в лопаточных венцах и численное моделирование течения в лопаточных венцах.

Одним из подходов является использование обобщения экспериментальных данных для выявления закономерностей изменения характеристик решеток профилей, ступеней, каскадов ЛМ. В ЦИАМ им. П.И. Баранова учеными Л.Е. Олыштейном и В.Г. Процеровым разработан метод расчета характеристик осевых компрессоров с использованием обобщенных характеристик ступеней осевого компрессора [3]. Данный метод базируется на параметрах лопаточных венцов на среднем радиусе и не требует определения параметров потока в лопаточном венце на различных радиусах с последующим интегрированием параметров потока по высоте проточной части. Обобщенные характеристики ступеней получены по результатам обработки большого количества экспериментальных характеристик отдельных ступеней в широком диапазоне изменения входных параметров ступени компрессора. В то же время эти результаты мало зависят от геометрии исследуемых решеток профилей и поэтому характеристики, рассчитанные с помощью этого метода, неточны.

Авторами предлагается [4] по методу Н.Е. Жуковского дополнительно выделять вдоль всей проточной части (ПЧ) компрессора на разных уровнях (вдоль поверхностей тока) элементарные каналы (как совокупность элементарных ступеней) и это позволяет на выходе из

компрессора получать параметры, различные по высоте лопатки (эпюры). В том случае, если элементарный канал построен вдоль наружного корпуса или втулки ротора, меридиональное сечение соответствующей поверхности тока может быть получено достаточно просто. Для промежуточных по высоте ПЧ поверхностей тока это делается путем итераций с учетом условий равновесия (вследствие того, что в сечениях с большей окружной скоростью потока имеется больший радиальный градиент статического давления, траектории частиц отклоняются к периферии). Если промежуточные поверхности тока выделяются для равновеликих кольцевых сечений на входе в компрессор, это упрощает осреднение и получение интегральных параметров и характеристик отдельных лопаточных венцов, ступеней и компрессора в целом.

Выявленные характеристики решеток профилей могут быть использованы для получения интегральных характеристик лопаточного венца, ступени, компрессора в целом. Данный метод позволяет, например, по известной геометрии элементарных решеток профилей и по известным параметрам потока на входе в решетку рассчитать параметры потока на выходе из решетки. Для упрощения расчетов предполагаем, что поток осесимметричный, то есть не учитываются изменение параметров потока в окружном направлении. Предполагается, что изменение параметров потока поперек межлопаточного канала решетки, можно с достаточной степенью точности заменить осредненными данными. В дополнение к допущению об осесимметричности течения предполагается, что все радиальные перетекания происходят внутри межлопаточных каналов, а за пределами решеток поток находится в условиях радиального равновесия. В этом случае уравнение течения в радиальном направлении возможно упростить. Упрощенную теорию радиального равновесия можно использовать для расчетов потока с разделением проточной части несколькими линиями тока [2]. Расчетные осевые сечения располагаются в осевых зазорах между венцами лопаток. Расход в каждой такой части предлагается рассчитывать с помощью уравнения расхода в интегральной форме. Полученные расчетным путем характеристики компрессора является исходными данными при решении одной из ключевых задач на различных стадиях — от эскизного проектирования до технического проекта.

Достоверная характеристика компрессора (каскада компрессора) позволяет рассчитать характеристики разрабатываемого изделия на установившихся (нагрузочная и климатическая характеристики) и на неустановившихся режимах (динамическая характеристика ГТД) с высокой точностью. При проектировании компрессора предложенный метод позволяет производить выбор геометрических параметров лопаточных венцов, а в эксплуатации — производить учет влияния на характеристики изменения геометрии лопаток (за счет эрозии, загрязнения и т. д.). Метод позволяет заранее проанализировать влияние загрязнения и эрозии лопаток на изменение характеристик узлов, а по результатам идентификации модели установки решить обратную задачу — выявить фактические значения загрязнений и эрозии в конкретных венцах и ступенях.

Еще одним эффективным методом расчета является использование подвижных лагранжевых сеток [5]. При построении этих сеток руководствуются, прежде всего, особенностями рассматриваемого течения и необходимостью достижения приемлемой точности при использовании определенного метода решения систем уравнений, описывающих течения сплошных сред. Существенное значение при выборе конфигураций сеток играют квалификация и профессиональное «чутье» вычислителя. Построенные в начале расчета, сеточные линии, как правило, остаются неизменными в течение всего процесса расчета. Такой подход хорошо зарекомендовал себя при описании известных стационарных режимов течения сред, в которых отсутствуют линии раздела в жестких границах. При наличии в поле течения границ раздела между областями с различными веществами или различными температурами такие границы (при описанном выше подходе) оказываются распределенными на несколько ячеек расчетной сетки из-за особенностей используемого численного метода.

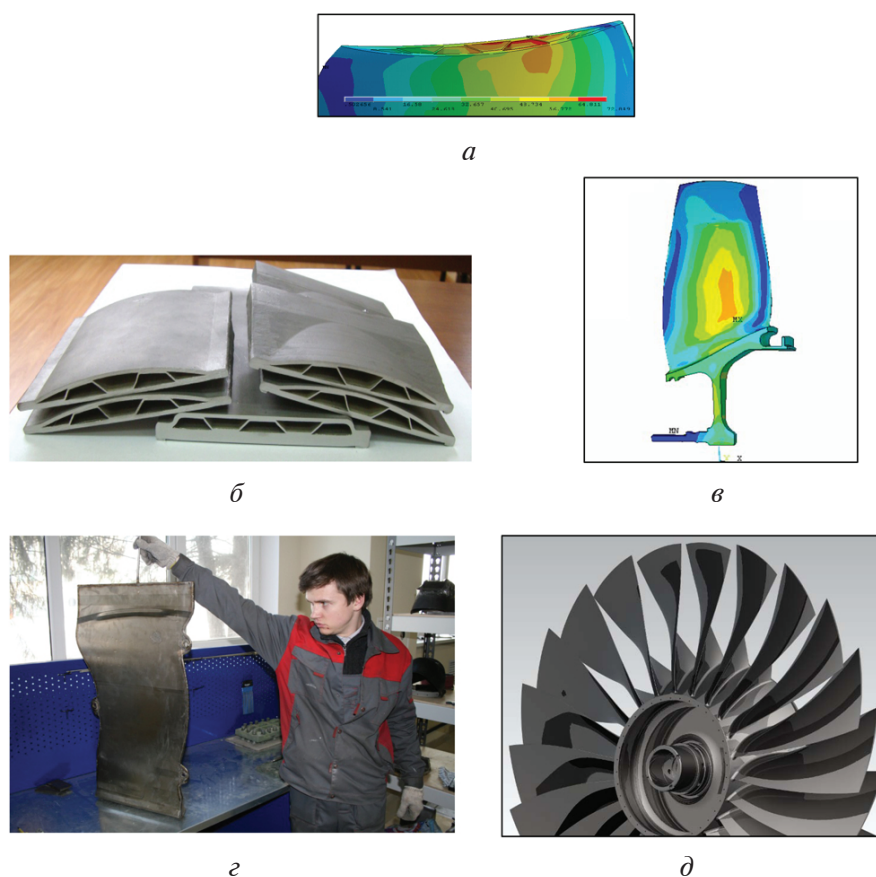


Рис. 2. Полые лопатки вентилятора, рабочее колесо типа блиск и результаты моделирования НДС

а — результаты расчета НДС (напряженно-деформированного состояния) полый лопатки; *б* — заготовки пера полый вентиляторной лопатки; *в* — результаты расчета НДС рабочего колеса с широкохордной лопаткой; *г* — заготовка пера полый лопатки; *д* — рабочее моноколесо (блиск), изготовленное с применением линейной сварки трением

При этом объясняется парадоксальный факт возникновения вихревых форм течения совершенного газа, образующихся на фиксированных сетках при численном моделировании течений за кормовыми частями плохообтекаемых тел. В случае же моделирования течений сред с учетом движения жестких, связанных границ вышеописанный подход является полностью неприемлемым, так как сеточные линии не могут быть фиксированными, а должны подстраиваться под положения границ с меняющимися во времени координатами (например — течения, образующиеся при колебании тел). В этой связи ведется разработка методов расчета течений сред, использующих подвижные, так называемые лагранжевые сетки.

Рабочая лопатка авиационного двигателя при движении относительно статорных решеток испытывает периодические воздействия как от следовой и потенциальной неравномерности течения, порождаемого предыдущей решеткой статора, так и от потенциальной неравномерности потока, порождаемого последующей решеткой. Установленные факты нестационарного взаимодействия и разработанный математический аппарат позволяют поставить практическую задачу оптимизации взаимного расположения статорных венцов в многоступенчатой турбомашине с целью снижения амплитуд возбуждающих нагрузок, приводя-

щих к вибрациям рабочих лопаток в случае, когда окружные шаги неподвижных решеток равны или кратны. Предложенный в свое время авторами метод выделения «эквивалентных каналов», описывающих движение частицы вдоль проточной части одновременно в абсолютном и в относительном движении, который в [5] называют МОС, позволяет с достаточной для инженерной практики точностью описывать различные газодинамические процессы в решетках турбомашин в числе которых: клокинг-эффект, нестационарное взаимодействие решеток и в частности явления аэроупругости и процессы сегрегации течений газа в межлопаточных каналах. Он позволяет оптимизировать геометрию лопаточных венцов, в том числе подобрать кривизну передних и задних кромок лопаток.

Новые методы расчета позволяют использовать клокинг-эффект (подбор соответствующего взаимного расположения лопаточных венцов в роторе и в статоре, когда на характерных режимах межлопаточные каналы в соответствии с МОС удастся наилучшим образом организовать движение струй в относительной и абсолютной системах координат). Кроме того, широкохордные композитные лопатки позволяют избежать развития колебаний и одновременно получить высоконагруженные ступени, что обеспечивает уменьшение массы и габаритов каскадов компрессоров. При этом обеспечивается демпфирование колебаний в широкохордных композитных лопатках и повышается их возможность противостоять развитию трещин, работать при наличии дефектов).

Полые лопатки винтов, винтовентиляторов и вентиляторов позволяют реализовать большую степень двухконтурности и обеспечить низкие значения удельного расхода топлива, тем самым повысить экономичность и дальность ЛА. Биротативные турбины и гребные, воздушные и вертолетные винты позволяют повысить эффективность, уменьшить массу и габариты силовых установок, снизить заметность судов (в т. ч. подводных), обеспечить соблюдение норм по шуму и т. д.

Перечисленные методы позволяют реализовать требования к двигателям V и VI поколения – повышение надежности за счет уменьшения числа деталей (путем замены традиционных рабочих колес блисками).

Выводы

В настоящее время при проектировании и изготовления судовых и авиационных ЛМ требуется использование новых подходов, методов, материалов, конструкторских решений и технологий. В России (в вузах, отраслевых НИИ, ОКБ и на заводах) имеется достаточное количество специалистов в этой области и производственные мощности. Поэтому имеется возможность и представляется целесообразным развернуть соответствующие НИР и НИОКР. Их реализация позволит обеспечить высокие характеристики и конкурентоспособность продукции отечественного судостроения, авиа- и двигателестроения, повысить обороноспособность России, а также уровень подготовки кадров для высокотехнологических (прежде всего оборонных) отраслей промышленности.

Список литературы

1. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) / Под общей редакцией В.А. Скибина, В.И. Солонины. М.: ЦИАМ, 2004. 424 с.
2. Белоусов А.Н., Мусаткин Н.Ф., Радько В.М., Кузьмичев В.С. Проектный термогазодинамический расчет основных параметров авиационных лопаточных машин; Самар. гос. аэрокосм. ун-т. Самара, 2006. 316 с.
3. Олыштин Л.Е., Процеров В.Г. Метод расчета осевого компрессора по данным продувок плоских решеток // Труды ЦИАМ № 150. -М.: Изд-во «Бюро Новой Техники», 1948. 64 с.
4. Кривошеев И.А., Рожков К.Е. Развитие методов анализа и расчета характеристик решеток профилей осевых компрессоров // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 2(61), 2012, с. 26–32.

5. Лапотко В.М., Кухтин Ю.П. Преимущества использования подвижных, лагранжевых сеток при численном моделировании течений сплошных сред. В сб.: Авиационно-космическая техника и технология. Вып. 19. Тепловые двигатели и энергоустановки. Харьков: Гос. аэрокосмический ун-т «Харьковский авиационный институт», 2000, с. 88–92.

References

1. (2004) *Raboty vedushchikh aviadvigatelsestroitel'nykh kompaniy po sozdaniyu perspektivnykh aviatsionnykh dvigateley (analiticheskiy obzor). Pod obshchey redaktsiey V.A. Skibina, V.I. Solonina* [The work of leading Aero engine manufacturing companies on development of advanced aircraft engines (analytical review). Under the General editorship of V.A. Skibin, V.I. Solonin], *TsIAM* [CIAM], Moscow, p. 424.
2. Belousov A., Musatkin N., Radko V., Kuzmichev V. (2006) *Proektnyy termogazodinamicheskiy raschet osnovnykh parametrov aviatsionnykh lopatochnykh mashin; Samar. gos. aerokosm. un-t* [Project thermo- gas-dynamic calculation of basic parameters of aviation turbomachinery; Samar. Reg. Aerospace. Univ], Samara, p. 316.
3. Olshteyn L., Protserov V. (1948) *Metod rascheta oseвого kompressora po dannym produvok ploskikh reshetok* [Method of calculation of the axial compressor based on purging plane gratings data] *Trudy TsIAM* [Proceedings of CIAM]. *Izd-vo «Byuro Novoy Tekhniki»* [Publ. «New Engineering Bureau»], Moscow, no. 150, p. 64.
4. Krivocheev I., Rozhkov K. (2012) *Razvitie metodov analiza i rascheta kharakteristik reshetok profiley osevykh kompressorov* [Development of methods of analysis and calculation of the characteristics of lattices profiles axial compressors]. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of the Irkutsk State Technical University], no. 2(61), pp. 26–32.
5. Lapotko V., Kuhtin Y. (2000) *Preimushchestva ispol'zovaniya podvizhnykh, lagranzhevykh setok pri chislennom modelirovanii techeniy sploshnykh sred. V sb.: Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. Vyp. 19. Teplovye dvigateli i energoustanovki* [Benefits of using mobile, Lagrangian grids for numerical modeling of continuum flows. In Sat.: Aerospace engineering and technology. MY. 19. Heat engines and power plants]. *Gos. aerokosmicheskiy un-t «Khar'kovskiy aviatsionnyy institut»* [Kharkov State Aerospace Univ. «Kharkov Aviation Institute»], Kharkov, pp. 88–92.