

6. Соколов С. Г. Газоперекачивающие агрегаты с авиаприводом и способы повышения их эффективности: Автореф. дис. ... канд. техн. наук / С. Г. Соколов. – М.; 1984. – 18 с.
7. Парафейник В. П. Научные основы совершенствования турбокомпрессорных установок с газотурбинным приводом: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / В. П. Парафейник. – Харьков, 2009. – 41 с.
8. К вопросу оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа / В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, В. Е. Евдокимов, И. Н. Тертышный // Компрес. техника и пневматика. – 2012. – № 2. – С. 10–17.
9. Бондаренко Г. А. Метод оптимизации газодинамических характеристик осерадиальной компрессорной ступени со входным регулирующим аппаратом / Г. А. Бондаренко, И. В. Юрко // Вісн. НТУ «ХП». Сер. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків: НТУ «ХП». – 2013. – № 14(988). – С. 49 – 53.

Поступила в редакцію 08.08.17

<sup>1</sup> В. П. Герасименко, д-р техн. наук

<sup>2</sup> М. Ю. Шелковский

<sup>1</sup> Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», г. Харьков,

e-mail: boyko@d2.khai.edu

<sup>2</sup> ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»

г. Николаев, e-mail:

maikl.shelkovsky@gmail.com

УДК 62.438

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГАЗОТУРБИНОЙ ТЕХНИКИ НА ОСНОВЕ ДОСТИЖЕНИЙ В АВИАЦИОННОМ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ (к 100-летию со дня рождения В. Н. ЕРШОВА)

*Розглянуто вагомий внесок в удосконалення компресорів наукових шкіл, заснованих академіком Г. Ф. Проскурою та його учнем – заслуженим працівником вищої освіти України, доктором технічних наук професором Володимиром Миколайовичем Єршовим. Показано, що коефіцієнт швидкохідності є досить зручною ознакою розпізнавання типу і оптимальної форми робочого колеса компресора, насоса, вентилятора для забезпечення його максимального ККД, необхідного напору та витрати повітря.*

**Ключові слова:** компресор, ККД, коефіцієнт швидкохідності, подовження лопаток.

В условиях «термогазодинамического насыщения» в оптимизации газогенераторов авиационных ГТД, работающих по простому циклу, в отличие от их наземного применения, где улучшение топливной экономичности чаще всего получают за счет использования комбинированных схем, перспективным направлением развития является повышение их эффективности путем усовершенствования турбомашин с ростом КПД. Наглядным тому примером являются весомые вклады в такое направление научных школ, созданных академиком Г. Ф. Проскурой и его учеником – заслуженным работником высшего образования Украины, доктором технических наук, профессором Владимиром Николаевичем Ершовым.

За последние 10–20 лет сотрудниками Института проблем машиностроения НАН Украины, продолжателями школы, основанной Г. Ф. Проскурой, проводились работы по усовершенствованию аэродинамики паровых и газовых турбин путем трехмерного аэродинамического моделирования лопаточных венцов, предложенного им еще в 1954 году. Несколько позже в Харьковском авиационном институте под руководством В. Н. Ершова начали проводиться интенсивные аэродинамические исследования по аэродинамике осевых компрессоров для нужд авиационной промышленности и частично для энергетического и судового газотурбостроения. Первым важным результатом этих исследований стало издание его монографии по проблеме газодинамической неустойчивости компрессоров, в частности вращающемуся срыву, перевод которой на английском языке «Unstable Conditions of Turbodynamics. Rotating Stall». U.S. Air Force Foreign Technology Division Translation FTD-MT-24-04-71, 1971 способствовал ознакомлению с этими результатами специалистов мировой научной общественности. Кроме монографии и докторской диссертации по данной проблеме, под его руководством было защищено около десяти кандидатских диссертаций. Практически параллельно с

© В. П. Герасименко, М. Ю. Шелковский, 2017

исследованиями неустойчивых режимов осевых компрессоров были проведены обширные исследования с целью повышения экономичности компрессоров с лопатками малого удлинения, по результатам которых защищено еще три кандидатских диссертации.

Интересная идея существенного сокращения осевых размеров авиационных двигателей с одновременным уменьшением при этом и их удельной массы путем применения компрессорных лопаток большого удлинения (4,5...6,0) была экспериментально проверена в ХАИ по заказу генерального конструктора А. М. Люльки в 1970–1975 гг. и завершилась защитой кандидатской диссертации с несколькими неожиданными выводами о нецелесообразности внедрения рабочих лопаток большого удлинения в практическую реализацию, из-за их недостаточной виброустойчивости. К подобному выводу пришли также исследователи известных американских фирм США, после чего началось исследование противоположного направления по изучению внедрения широкохордных лопаток, что подтверждается статистическими данными, опубликованными, например, Н. Кампсти в известной монографии «Аэродинамика компрессоров» [1].

Создание компрессоров, особенно современных авиационных двигателей, продолжается по пути дальнейшего их аэродинамического совершенствования с целью повышения КПД с максимально возможными коэффициентами напора и приемлемыми запасами по срыву потока в лопаточных венцах. Параллельно с исследованиями лопаток большого удлинения под научным руководством В. Н. Ершова были разработаны и экспериментально исследованы высоконапорные компрессорные ступени ( $\bar{H}_T = 0,3$ ) при малом относительном диаметре втулки  $\bar{d} = 0,5$  и меридиональном ускорении потока за счет конической втулки. КПД таких ступеней в дозвуковом диапазоне потока был получен на уровне 0,92...0,95, что вызвало повышенный интерес отечественных специалистов. Однако по определенным причинам эти исследования были «законсервированы». Естественно, столь высокие значения КПД достигнуты за счет применения ряда конструкторских решений при профилировании особенно лопаток рабочих колес, которые продолжены до настоящего времени главным образом с применением современных вычислительных средств и CFD технологий взамен экспериментальных, что позволило перейти к многопараметрическим задачам на основе подходов Ву Ч. Х., усовершенствованных введением поверхности  $S_3$ , ортогональной к поверхностям  $S_1$  и  $S_2$  при 3D моделировании течения.

Одновременно с обоснованием максимальных уровней КПД компрессорных ступеней расчетно-экспериментальным методом целесообразными, как выяснилось, являются теоретические исследования путем сравнения природы потерь в компрессоре на основе теории подобия в рамках дозвукового вязкого течения.

Сравнительно большое количество геометрических и кинематических параметров, влияющих на КПД, свидетельствует о сложности задач оптимизации лопаточных машин. Однако из теории подобия известно, что указанные параметры могут быть объединены в критериальные комплексы, использование которых значительно упрощает определение оптимальной формы проточной части. В последнее время теория подобия турбомашин рассматривается как один из методов статистической теории распознавания образов как более формализованного математического аппарата, построенного на стохастических принципах, в отличие от теории подобия, где признаки имеют вполне физическую сущность. Применение теории распознавания образов позволяет также формализовать проблему уменьшения пространства признаков для определения оптимальных форм исследуемых объектов. В терминах теории распознавания образов таким признаком для турбомашин является, в частности, коэффициент быстроходности, называемый также коэффициентом формы, которая ищется как оптимальная в обратной аэродинамической задаче.

Предложенный еще в 1946 году Г. Ф. Проскурой коэффициент быстроходности  $n_s$  является достаточно удобным признаком распознавания типа и оптимальной формы рабочего колеса компрессора, насоса, вентилятора для обеспечения максимального КПД, необходимого напора и расхода воздуха с определением оборотов колеса. Этот коэффициент объединяет геометрическое и кинематическое подобие. Для направляющего аппарата достаточно выдержать только геометрическое подобие так же, как для диффузоров центробежных компрессоров, решеток профилей и др. Использование статистических данных с использованием коэффициента быстроходности в

монографіях Диксона, Овсянникова и Боровского, Кампти, Хорлока, Эккерта [1–4] является удобным методом выбора типа турбомашин с оптимальной формой, а значит, может быть рекомендовано на стадии формирования образа вышеупомянутых газотурбинных агрегатов.

Расчетные исследования подтверждают возможность достижения КПД компрессорных ступеней на уровне 0,93...0,94 при многопараметрическом варьировании геометрических переменных на основе методов факторного планирования эксперимента в прямой аэродинамической задаче, а также путем решения задачи в обратной постановке на основе статистической теории и методов распознавания образов. Полученные результаты коррелируются с аналогичными исследованиями известных зарубежных авиадвигателестроительных фирм (General Electric, Rolls-Royce) по многоступенчатым осевым компрессорам. Несомненно, столь обнадеживающие успехи в значительной степени определяются преимущественно отечественных школ в области аэродинамической науки, активным представителем и создателем которой был В. Н. Ершов, оставивший заметный след в достижениях авиационной техники Украины не только благодаря научному вкладу, но и подготовке нескольких тысяч инженерных кадров за полувековое творчество с развитием научной, учебной, учебно-методической базы ХАИ и педагогической деятельности.

### Литература

1. Кампти Н. Аэродинамика компрессоров: Пер. с англ. / Н. Кампти. – М.: Мир, 2000. – 688 с.
2. Овсянников Б. В. Теория и расчет агрегатов питания жидкостных ракетных двигателей / Б. В. Овсянников, Б. И. Боровский. – М.: Машиностроение, 1971. – 540 с.
3. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры. Применение, теория, расчет: Пер. с нем. / Б. Эккерт. – М.: Машгиз, 1959. – 679 с.
4. Хорлок Дж. Х. Осевые турбины (газовая динамика и термодинамика): Пер. с англ. / Х. Дж. Хорлок. – М.: Машиностроение, 1972. – 344 с.

*Поступила в редакцию 02.11.17*