

УДК 621.515
doi:10.18720/SPBPU/2/id18-98

Неверов Владимир Валерьевич

Специалист по компрессорным машинам
neverov@entechmach.com

Любимов Александр Николаевич

Кандидат технических наук, начальник отдела перспективных разработок и проектирования
liubimov@entechmach.com

Чеглаков Иван Владимирович

Специалист по компрессорным машинам
cheglakov@entechmach.com

ООО НПФ «ЭНТЕХМАШ» Санкт-Петербург, Россия

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ГАЗОДИНАМИКА КАК ИНСТРУМЕНТ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА, НАДЕЖНОСТИ И СКОРОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Аннотация. В настоящее время вычислительная газодинамика (Computational Fluid Dynamics) находит применение во множестве отраслей промышленности, в том числе в производстве и модернизации турбомашин. Однако, хотя данный мощный инструмент и позволяет существенно снизить затраты на проектирование машины и разработать наиболее энергоэффективную проточную часть, применение его в практике ограничено многими факторами, такими как: дорогостоящее программное обеспечение, затраты на мощные вычислительные системы, необходимость в высоком уровне подготовки специалистов. Кроме того, существует обширная проблема трактовки результатов моделирования. Получаемые данным методом результаты требуют обоснования по меньшей мере аналогичным расчетом близкой по параметрам машины и сравнением результатов с экспериментальными данными. Поэтому вычислительная газодинамика является на данный момент больше объектом всевозможных научных исследований и работ, чем инструментом проектирования. Вместе с тем, заводы-изготовители все чаще прибегают к численному моделированию и внедряют качественно новый этап в проектирование. В работе показано применение вычислительной газодинамики в условиях завода-изготовителя

проточных частей центробежных компрессоров, что позволяет повысить качество и надежность проектирования, а в особых случаях является основным инструментом проектирования.

Ключевые слова: Центробежный компрессор, модернизация, вычислительная гидродинамика, computational fluid dynamics, методы проектирования, проточная часть

Neverov Vladimir V.

Compressor Specialist
neverov@entechmach.com

Lyubimov, Alexander N.

Candidate of Engineering Sciences, Head of Advanced Development and Design
liubimov@entechmach.com

Cheglakov Ivan V.

Compressor Specialist
cheglakov@entechmach.com

ООО НПФ «ENTECHMASH», Saint Petersburg, Russia

COMPUTATIONAL GAS DYNAMICS AS A TOOL FOR IMPROVING THE QUALITY, RELIABILITY AND VELOCITY OF TURBICOMPRESSORS FLOW PARTS DESIGN

Annotation. Currently, computational fluid dynamics is used in many industries, including the turbomachines production and modernization. However, although this powerful tool can significantly reduce the cost of designing a machine and develop the most energy-efficient flow part, its use in practice is limited by many factors, such as: expensive software, the cost of powerful computing systems, the need for a high level specialization. In addition, there is an extensive problem of simulation results interpretation. The results obtained by this method require justification at least by a similar calculation of a machine close in parameters and results comparison with experimental data. Therefore, computational fluid dynamics is at the moment more than the object of various scientific research and works, than a design tool. At the same time, manufacturers are increasingly resorting to numerical modeling and introduce a qualitatively new stage in the design. The paper shows the use of computational gas dynamics in the conditions of the centrifugal compressors flow parts manufacturer, which can improve the design quality and reliability, and in special cases is the main design tool.

Keyword: Centrifugal compressor, modernization, computational fluid dynamics, design methods, flow part.

Вычислительная газодинамика (Computational Fluid Dynamics) — технология компьютерного моделирования, является совокупностью физических, математических и численных методов и предназначена для моделирования течения жидкостей и газов, процессов массо- и теплообмена. Позволяет смоделировать и оценить характеристики отдельных компонентов и всей конструкции целиком, избегая необходимости производства реальных образцов и проведения натурного эксперимента. Метод основан на решении систем уравнений неразрывности, сохранения

импульса, энергии и уравнения состояния.

Большое распространение данный метод получил при решении задач течения газа в различных устройствах и механизмах, обтекания газовыми потоками различных тел, например, автомобилей, профилей лопаток, круговых лопаточных решеток. Закономерным укрупнением задачи последнего случая является моделирование течения в ступени компрессора, насоса, вентилятора или турбины динамического действия, и, как следствие, расчета полной многоступенчатой маши-

ны. Гораздо меньшее распространение получило моделирование машин объемного действия – винтовые, поршневые и т.д. по причине не востребоваемости численных методов для расчета потерь в подобных машинах, а также сложностей, связанных с деформированием сетки в процессе расчета. Напротив, в турбомашинах основные потери связаны с совершенством проточной части, и вычислительная газодинамика предоставляет возможности для оценки потерь, расчета параметров и характеристик машин.

Однако, хотя данный мощный инструмент и позволяет существенно снизить затраты на проектирование машины и разработать наиболее энергоэффективную проточную часть, применение его в практике ограничено в настоящее время многими факторами, такими как: дорогостоящее программное обеспечение, затраты на мощные вычислительные системы, необходимость в высоком уровне подготовки специалистов. Кроме того, существует обширная проблема трактовки результатов моделирования. Получаемые данным методом результаты требуют обоснования по меньшей мере аналогичным расчетом близкой по параметрам машины и сравнением результатов с экспериментальными данными. Поэтому вычислительная газодинамика является на данный момент больше объектом всевозможных научных исследований и работ, чем инструментом проектирования. Вместе с тем, заводы-изготовители все чаще прибегают к численному моделированию и внедряют качественно новый этап в процесс проектирования.

К настоящему времени разработано множество коммерческих программных продуктов [1, 2]. Среди наиболее известных – Ansys CFX, Ansys Fluent, Comsol, Star-CCM+, Numeca. Последний является единственным в своем роде программным комплексом, разработанным специально для расчета турбомашин и предоставляет богатый инструментарий для решения задач разной сложности – от

моделирования течения в элементе ступени (рабочее колесо (РК), лопаточный диффузор (ЛД) и т.д.) до численной оптимизации элементов ступени по целевым критериям с помощью современных алгоритмов с перебором сотен вариантов геометрий.

Опыт применения пакета вычислительной газодинамики Numeca Fine/Turbo в практике НПФ «ЭНТЕХМАШ»

НПФ «ЭНТЕХМАШ» успешно внедрила программный пакет вычислительной газодинамики Numeca [3] в процесс проектирования. Таким образом, при создании или модернизации компрессорных машин отдельным этапом проектирования является численное моделирование. Который может включать в себя:

- поверочный расчет проточной части компрессора, спроектированного по классическим методикам с использованием банка отработанных высокоэкономичных модельных ступеней [4, 5];
- оптимизационные расчеты [6] для доведения до совершенства элементов проточной части (например, оптимизация формы лопатки РК, диффузора или обратно-направляющего аппарата (ОНА) с целью повышения энергоэффективности, оптимизация меридиональной формы проточной части для обеспечения наилучшего распределения скоростей и т. д.);
- моделирование газодинамических характеристик компрессора при различных условиях работы;
- научно-исследовательские работы с целью внедрения новых решений.

Временные ресурсы, уделяемые на этап моделирования, сильно разнятся в зависимости от общего времени, выделенного на проектирование, сложности разрабатываемого компрессора, производственных факторов.

В особо сложных случаях за неимением надежных альтернативных методов, моделирование может выступать как основной инструмент проектирования. В

качестве примера такого случая можно привести проектирование полуоткрытых осерадиальных РК с развитой осевой частью при условии большой радиальной неравномерности потока на входе в РК. В отечественной практике данным колесам были посвящены исследования, в том числе и экспериментальные [7], но широкое применение они не получили в силу нецелесообразности их использования во вновь проектируемых стационарных машинах, сложности проектирования и изготовления. Данный тип колес обычно применяется в авиационных двигателях, в системах турбонаддува автомобилей, где важны массогабаритные показатели машины. Большинство колес в центробежных машинах отечественного производства спроектировано с цилиндрическими лопатками, для которых теоретические расчетные методики [8, 9] показывают надежный и достоверный результат. Для полуоткрытых осерадиальных колес не существует аналогичных надежных методик, поэтому в данном случае качественный расчет и оптимальное проектирование могут быть обеспечены альтернативными методами, к которым можно отнести и численное моделирование.

В практике НПФ «ЭНТЕХМАШ» при модернизации крупного промышленного компрессора были разработаны и изготовлены на современных пятикоординатных станках РК полуоткрытого осерадиального типа с условным коэффициентом расхода $\Phi_0 \approx 0,11$ и коэффициентом полного

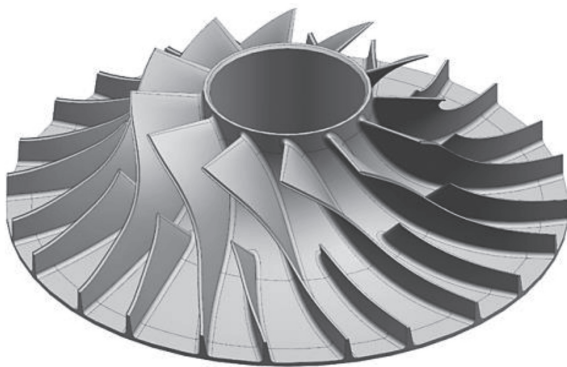


Рис. 1. Осерадиальное РК ЦКМ, разработанное НПФ «ЭНТЕХМАШ»

напора $\Psi_i \approx 0,83$, политропного напора $\Psi_{пол} \approx 0,69$ (рисунок 1). Методы вычислительной газодинамики при этом сыграли большую роль и явились приоритетным методом проектирования. От первичного эскизного варианта РК до окончательного изготовленного варианта было проведено несколько серий оптимизационных расчетов с помощью численного моделирования с целью обеспечить необходимые параметры РК и максимально повысить энергетическую эффективность при максимальном увеличении зоны стабильной работы (запаса по помпажу). Суть оптимизации заключается в итеративном расчете большого количества различных геометрий исследуемого элемента, например, для ЦК – РК, лопаточной решетки диффузора, ОНА или их комбинаций. В общем случае входными данными оптимизации являются геометрические параметры оптимизируемого объекта и целевые критерии (чаще всего напор, запас по помпажу и эффективность работы), которые определяют вектор оптимизации. В процессе оптимизации исполняющий алгоритм программы меняет геометрическую модель таким образом, чтобы обеспечить заданные критерии, при этом стремясь найти наилучший вариант.

Масштаб задачи оптимизации определяется количеством геометрических параметров и критериев. Чем больше критериев и варьируемых параметров, тем сложнее задача, причем сложность растет нелинейно. Относительно простая задача оптимизации РК с варьированием нескольких параметров и одним критерием может быть решена достаточно быстро, и условно оптимальное решение может быть найдено за малое количество итераций. Вычислительная сложность при добавлении еще одного критерия и нескольких переменных вырастет в несколько раз. В практике же чаще всего приходится иметь дело с последним случаем, так как целевых параметров обычно несколько. Следовательно, для эффективного расчета и в целом возможности проведения

расчета, располагаемые вычислительные ресурсы должны быть сопоставимы с вычислительной сложностью задачи. Поэтому большинство задач не может быть решено на персональном компьютере, и для этих целей приобретаются специальные многопроцессорные вычислительные системы, которые позволяют выполнить большие объемы вычислений за короткое время. Для решения полного спектра численных задач научно-производственной фирмой «ЭНТЕХМАШ» используется расчетный сервер с процессорами Intel Xeon E5 и возможностью модульного расширения по мере возрастания потребностей.

Вычислительная газодинамика оказывается полезна для поиска и оценки локальных потерь и их устранения при поворочных расчетах. Классические методы описывают потери в проточной части с точки зрения физики процес сжатия, не учитывая некоторые возможные особенности, вызываемые конструкцией или неоптимальным выбором неосновных геометрических параметров. Так, например,

геометрия участка между РК и ЛД, форма поворотного колена, неучет неравномерностей потока после входного направляющего аппарата или ОНА, могут значительно повысить потери в проточной части и изменить картину течения в элементах ступени. Так, например, в практике НПФ «ЭНТЕХМАШ» при разработке проточной части высокорасходного центробежного компрессора с помощью численного моделирования была выявлена высокая неравномерность потока после ОНА. В силу сильных вторичных течений ОНА, спроектированный по одномерной методике, поворачивал поток до осевого направления только в среднем сечении канала. На втулочной поверхности угол потока перед РК следующей ступени составлял $+28^\circ$, а на периферийной – напротив -50° . Таким образом, наблюдалась значительная неравномерность потока, перед РК следующей ступени (рисунок 2). Это ведет к рассогласованию обтекания и переменному углу атаки входной кромки РК по высоте. Решением стало полное перепрофилирование основной части про-

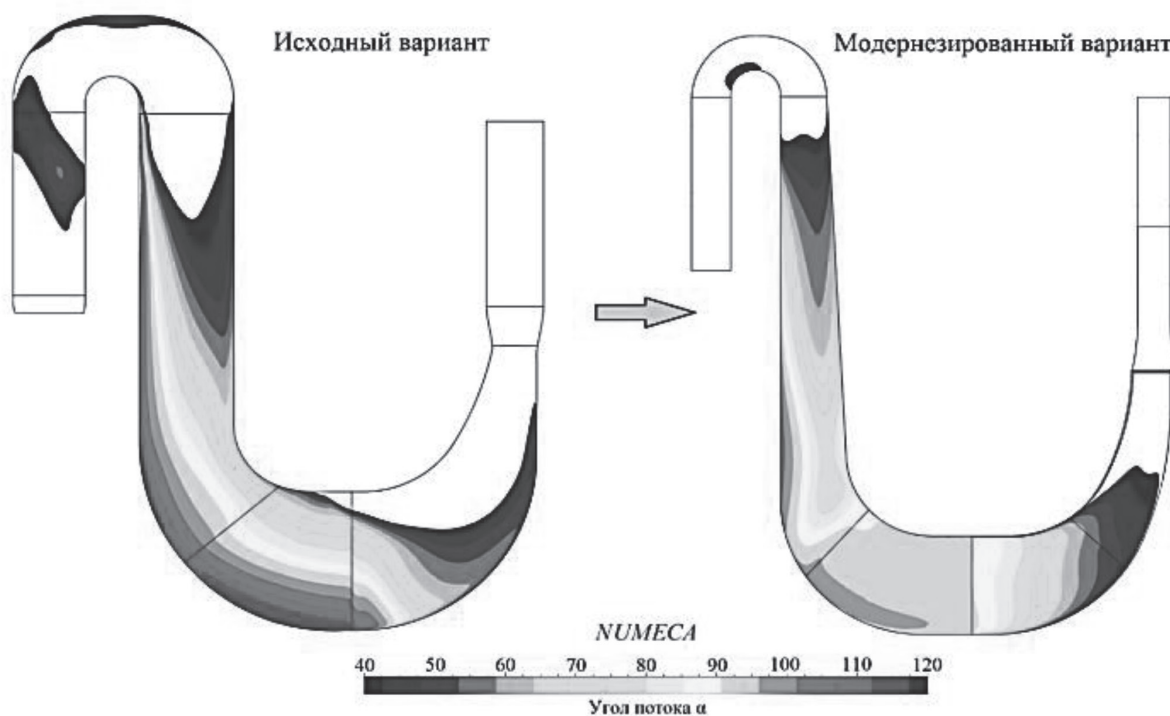


Рис. 2. Распределение угла потока в меридиональном осреднении

филя лопатки ОНА и замена стандартного прямого радиально осевого выходного участка на аналогичный пространственный (рисунок 3,б). Перепрофилирование основной части профиля позволило снизить интенсивность вторичных течений, а полученный в ходе оптимизационных расчетов пространственный выходной участок эффективно поворачивает поток до осевого направления во всех сечениях канала (максимальные отклонения от проектного направления для перепроектированной лопатки ОНА +2 и -2 градуса). На рисунке 3,а приведено сравнение распределения углов потока до и после модернизации.

Применительно к рассматриваемому случаю численный эксперимент позволил снизить неравномерность потока более чем в 10 раз и улучшить работу и устойчивость РК следующих ступеней, т.к. по примеру разработанной для первой ступени лопаточной решетки ОНА были скорректированы и решетки остальных ступеней.

В том же проекте был разработан и применен нестандартный ЛД с развитым безлопаточным участком на входе $D_3/D_2 =$

$= 1,45$, малой густотой $l/t \approx 1$ и лопаточным углом поворота потока $\Delta\alpha=6^\circ$. Такое исполнение диффузора обеспечивает широкую зону работы, сопоставимую с ступенью с БЛД, безотрывное течение в межлопаточном канале во всем диапазоне работы и, следовательно, практически постоянные условия работы для ОНА на различных режимах работы. Кроме того, по результатам расчета разработан аэродинамический профиль лопатки ЛД, отличающийся меньшей чувствительностью к углу атаки по сравнению со стандартными профилями, применяемыми в отечественных ЦК.

Несомненное преимущество численного эксперимента при модернизации компрессоров кроется в возможности улучшения газодинамических характеристик и изменения параметров машин за счет непосредственного сравнения прорабатываемых вариантов с немодернизированным вариантом. В этом случае моделируется исходная компоновка машины, после чего расчет верифицируется с экспериментальными данными, вносятся необходимые корректировки в расчетную модель. В дальнейшем рас-

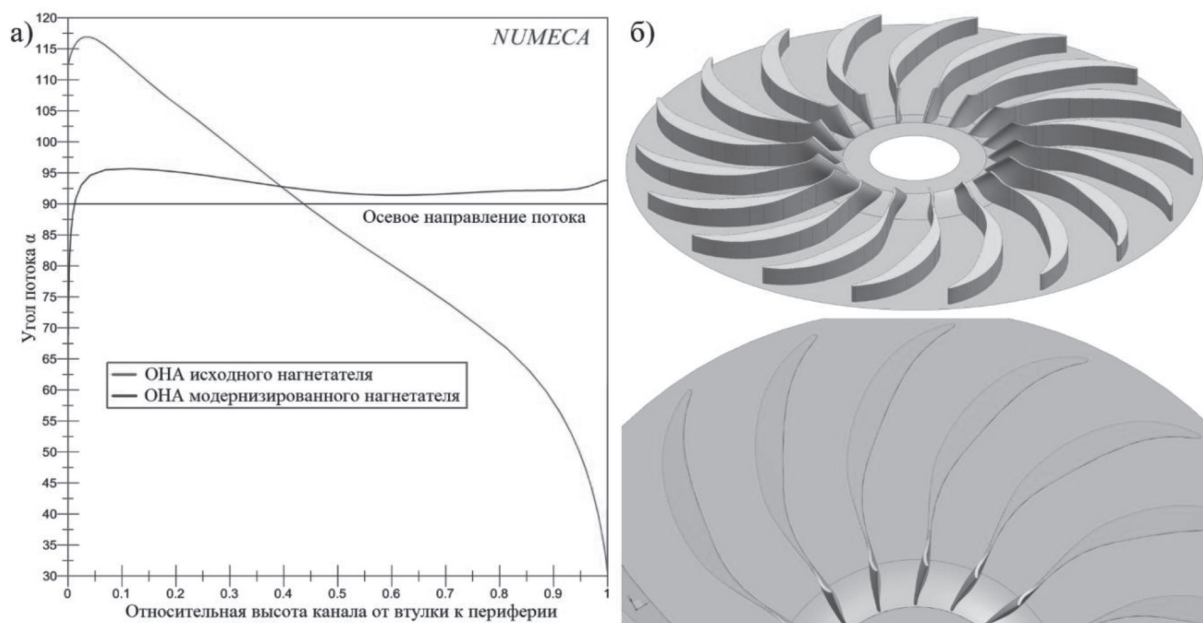


Рис. 3. Сравнение распределения угла потока исходного и модернизированного нагнетателя перед РК следующей ступени (а) и лопаточная решетка модернизированного ОНА (б)

четы исходной машины используются как сравнительная опора для новых, модернизированных вариантов. Вследствие чего модернизация может проводиться в относительных единицах, что является более удобным как для расчетчика, так и для трактовки результатов, получаемых с помощью численного моделирования.

Факторы, ограничивающие использование вычислительной газодинамики в реальном проектировании

Вычислительные методы, а в частности и вычислительная газодинамика, является очень наукоемкой областью знаний. И одна из сложностей для успешного ее практического применения заключается в необходимости постоянного обновления, актуализации и совершенствования знаний. Проектировщику, работающему с программными продуктами компьютерного моделирования, необходимо быть компетентным не только в области машиностроения, но и ориентироваться в физических аспектах моделирования, понимать математические модели и алгоритмы, заложенные в вычислительные методы, определять рациональность той или иной постановки задачи. Все это представляется достаточно сложным без фундаментальной научной подготовки кандидата и достаточного опыта работы с программными продуктами. К сожалению, существует не так много высших учебных заведений, предоставляющих профильные учебные программы по направлениям практического численного моделирования. Комплексные учебные программы в области энергетического машиностроения, позволяющие получить знания как в теории энергетических машин и проектирования, так и в области практического компьютерного моделирования только начинают в полной мере реализовываться

и обрабатываться. До недавнего времени учащиеся получали знания в области моделирования преимущественно факультативно. Однако, тенденция к включению моделирования в программы обучения прослеживается, так как моделирование приобретает непосредственную связь с проектированием турбомашин.

Кроме того, дорогостоящее программное обеспечение, реализующее методы вычислительной газодинамики, дорогостоящее вычислительное оборудование и необходимость большого опыта решения задач, в том числе и научно-исследовательских, значительно затрудняют процесс внедрения методов вычислительной газодинамики в реальное производство. Но преодолевая подобные сложности, производители машиностроительной продукции получают в распоряжение мощнейший инструмент проектирования.

Заключение

Вычислительная газодинамика, несмотря на все трудности в использовании в реальном проектировании, представляет из себя мощный инструмент анализа потока и при рациональном подходе позволяет значительно повысить качество и надежность проектирования турбомашин. А в случае разработки принципиально новых машин создать конструкции, практически не нуждающиеся в экспериментальной доработке, что сокращает период ввода изделия в эксплуатацию. В совокупности с программными продуктами, позволяющими осуществлять расчет статической и динамической прочности, температурный и модальный анализ разрабатываемых компрессоров, вычислительная газодинамика является современным расчетным методом, позволяет решать передовые задачи и изготавливать конкурентоспособную продукцию.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Runa Nivea Pinto, Asif Afzal, Loyan Vinson Dsouza, Zahid Ansari, Computational Fluid Dynamics in Turbomachinery : A Review of State of the Art, Arch. Comput. Methods Eng. (2016). doi:10.1007/s11831-016-9175-2

2. Шустрова М.Л., Аминев И.М., Байти-миров А.Д. Средства численного моделирования гидродинамических параметров процессов, Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17, №14, С. 221-224.

3.URL: <https://www.numeca.com/product/fineturbo>

4. Евдокимов В.Е. Банк экспериментальных данных по модельным ступеням и их элементам для проектирования ЦКМ. // Турбины и компрессоры. — 1997. — 3,4.

5. Семаков В.З., Репринцев А.И., Бганцов Д.Е. Модернизация и ремонт центробежных компрессоров промышленных предприятий // Компрессорная техника и пневматика. — 2002. — 10. — С. 30-32.

6. J-H Kim, J-H Choi, A Husain, K-Y Kim . Multi-objective optimization of a centrifugal compressor impeller through evolutionary

algorithms Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy Vol 224, Issue 5, pp. 711 – 721

7. Евдокимов В.Е., Репринцев А.И., Мильнер М.Х. Результаты экспериментальных исследований промежуточной ступени ЦКМ с осерадиальными колесами. Труды ЦКТИ. 1990. Вып. 261. С. 127-134.

8. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. — Ленинград : Машиностроение. Ленинградское отделение, 1981. — 3 : 351 с.

9. Любимов А.Н., Евдокимов В.Е., Семаков А.В., Репринцев А.И. Об использовании экспериментального и расчетных методов при проектировании проточных частей центробежных компрессоров // Компрессорная техника и пневматика — 2014. — № 6. — С. 12-20