

УДК 621.515

Применение современных вычислительных программ для определения параметров потока в центробежных компрессорах

К. А. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук В. А. КОРОТКОВ

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Д. В. ВОРОШНИН

ООО «Инженерный Центр Численных Исследований»

190008, Санкт-Петербург, ул. Лоцманская, 10

Up-to-date packages of application-specific computation programmes make it possible to considerably reduce both capital outlays and time consumed in experimenting, which is very important for the current level of system designing.

Key words: centrifugal compressor, enthalpy, Mach number, flow characteristics.

Ключевые слова: центробежный компрессор, энталпия, число Маха, параметры потока.

Практически все организации, связанные с проектированием центробежных компрессоров, используют в своей работе пакеты прикладных программ для расчета параметров потока. Современные математические инструменты позволяют рассчитать огромное количество параметров, которые необходимы для принятия решения о том, какие изменения необходимо внести в конструкцию для улучшения ее работы, или же для понимания того, какие характеристики сможет показать тот или иной компрессор. Мощности современных компьютеров достаточно для решения задач любой сложности и получения результатов, близких к экспериментальным. Применение вычислительной техники позволяет значительно ускорить процесс проектирования, так как теперь есть возможность получать достоверные данные без проведения длительных и капиталозатратных экспериментов.

Раньше после каждого вносимого изменения необходимо было провести эксперимент, который мог длиться несколько месяцев — от начала производства модели до обсчета полученных данных. Теперь же внесение изменений в математическую модель занимает несколько часов, а сам расчет и обработка данных в зависимости от сложности задачи и вычислительных мощностей могут занять от одного дня до недели. Это значительно сокращает рабочее время, а главное — капиталовложения на единицу выпускаемой продукции.

Как же работают подобные программы? Все начинается с построения геометрической модели исследуемого компрессора; естественно, осуществляется построение

не всей машины, а лишь проточной части, по которой и предполагается вести расчет. После этого вся расчетная область разбивается на множество (до нескольких миллионов) ячеек, при этом наиболее мелкие ячейки располагаются в пристеночных областях, а также на гранях рабочих колес и диффузоров. В каждой ячейке одновременно решается система уравнений: неразрывности потока, энергии, сохранения момента движения и теплопроводности. При этом хочется отметить, что в некоторых вычислительных системах для уменьшения времени расчета используется сначала система «укрупненных» элементов, т. е. сначала находятся приближенные решения для сетки, состоящей из кластеров по 16 ячеек, затем по 4 и только после этого для каждой отдельно взятой ячейки. Это позволяет значительно, до нескольких раз, сократить время расчета, а следовательно, увеличить возможное количество исследований, которое можно провести за единицу времени.

Большинство программ позволяют использовать все возможные модели течения вещества, начиная с самых простых ламинарных потоков и заканчивая сложными турбулентными $k-\varepsilon$ - и $k-\theta$ -моделями. Одной из передовых программ в этой области является программа "Fine Turbo" от компании NUMECA. Именно она была применена для математического расчета параметров потока в центробежном компрессоре, эксперимент на котором был проведен на кафедре холодильных машин Санкт-Петербургского государственного университета низкотемпературных и пищевых технологий. Эксперимент

проводился с применением хладона R-12 и использованием сверхзвукового лопаточного диффузора клиновидной формы на различных режимах¹.

Для расчета параметров реального газа в пакете программ NUMECA используется уравнение

$$p = \rho r T = \rho \frac{R}{M} T.$$

Энтальпия определяется по зависимости

$$h = \left(\int_{T_0}^T C_p dT \right) = e + \frac{p}{\rho} = \left\{ \int_{T_0}^T C_v dT \right\} + rT,$$

где T_0 — минимальная температура при расчете.

В качестве расчетной была принята модель Навье—Стокса для турбулентного потока. При этом переменные разбиваются на средние по времени значения и суммы периодических возмущений, которые, в свою очередь, раскладываются в гармоники.

Первая гармоника является основной. Гармонические амплитуды комплексно сопряжены. Происходит усреднение по времени нестационарных уравнений. Это как усреднение числа Рейнольдса, но при этом преобладают нестационарные возмущения периодических колебаний над турбулентными пульсациями. В результате уравнения в конечно-разностном методе могут быть сформулированы следующим образом:

$$\Omega_i \frac{d\tilde{U}}{dt_i} = - \sum \bar{F}_c \vec{S} + \sum \bar{F}_v \vec{S} + \Omega_i \bar{Q}_i,$$

где Ω_i — объем ячейки;

i — номер ячейки;

F_c — конвективный поток;

F_v — вязкостный поток;

Q — коэффициент, включающий в себя воздействие кориолисовых и центробежных сил.

Данная программа позволяет визуализировать и рассчитать множество параметров в любой интересующей области и даже в точке, например такой важный параметр для центробежного компрессора, как относительное число Маха (рис. 1), или любой другой интересующий нас параметр.

На рис. 1 показан режим запирания рабочего колеса. Из рисунка видно, что в межлопаточном горле происходит переход к сверхзвуковой скорости, а затем обратно к дозвуковой. При этом расход вещества через ступень увеличить нельзя, а эффективность работы очень сильно падает. Область, соответствующая числу Маха от 0 до 0,2 между лопатками колеса, — это зона «отрыва» рабочего вещества от спинки лопатки колеса. Используя эти данные, можно точно определить условия работы компрессора.



Рис. 1. Распределение относительного числа Маха по средней линии рабочей области при «запирании» рабочего колеса

На рис. 2 показан уже «незапертый» рабочий режим, и хотя отрыв потока сохранился, однако горло канала не перекрывается сверхзвуковым скачком, а значит, компрессор может нормально функционировать, хотя, конечно, при таком отрыве потока его эффективность также не будет максимальной.



Рис. 2. Распределение относительного числа Маха по средней линии рабочей области при номинальном режиме работы

Используя полученные при расчете данные, можно определить наилучшие области применения рабочих колес и диффузоров либо понять, подходит ли конструкция компрессора для работы на необходимых режимах.

Все это в очередной раз доказывает пригодность современных программ для расчета таких сложных явлений, как течение газа в проточной части центробежного компрессора, и возможность получения приемлемых по точности данных для понимания того, что повлечет за собой то или иное изменение в конструкции компрессора либо в изменении характера работы.

¹ Бухарин Н. Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров. — Л.: Машиностроение, 1983.