

УДК 621.515.001

С.А.Вазенмиллер (6 курс, каф. КВиХТ),  
Ю.Б.Галёркин, д.т.н., проф., А.Ю.Прокофьев, асс.

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Центробежные компрессоры относятся к машинам, получившим очень широкое применение в современной технике. Они используются в химической, газовой и нефтяной промышленности, на магистральных газопроводах, в энергетике, машиностроении, металлургической и горнорудной промышленности, на строительстве, на железных дорогах и судах, в автомобильном и воздушном транспорте, для трубопроводного транспорта, в пищевой промышленности, холодильниках, установках глубокого холода и т.д. Таким образом, проблема оптимального проектирования центробежного компрессора имеет очень большое значение.

При создании инженерного метода расчёта газодинамических характеристик на кафедре компрессоростроения была поставлена цель: сделать его гибким, нетрудоемким и точным. При любом способе проектирования неизбежно определение формы проточной части на основании общих рекомендаций (первичное проектирование). Принципиальная новизна разработанного метода оптимального проектирования заключается в том, что затем происходит корректировка всех размеров для получения наивысшего КПД.

Из уравнения Бернулли следует, что подведенная к газу лопатками рабочего колеса удельная механическая работа (так называемый теоретический напор  $h_T$ ) расходуется на повышение давления и перемещение газа (политропный напор  $h_n$ ), изменение кинетической энергии (динамический напор  $h_d$ ) и преодоление сопротивления движения (потерянный напор  $h_w$ ):

$$h_T = h_n + h_d + h_w.$$

Основная проблема расчёта характеристик заключается в определении потерь напора  $h_w$ .

Математическая модель рассчитывает потери как сумму потерь на отдельных участках проточной части: потери на передней и задней поверхностях лопаток, на поверхностях дисков рабочего колеса, на стенках безлопаточного диффузора, на лопатках и ограничивающих поверхностях лопаточного диффузора и т.д.

Безразмерные коэффициенты потерь на каждом участке учитывают потери трения и вихревые потери. Коэффициенты потерь рассчитываются с помощью алгебраических уравнений. В этих уравнениях аргументами выступают:

- отношение скоростей в конце и начале участков (местные диффузорности),
- относительный шаг и относительная высота лопаток,
- местные максимальные числа Маха,
- местные числа Рейнольдса,
- безразмерный критерий сил инерции перпендикулярных направлению движения газа (“условное число Россби”).

Для использования уравнений математической модели нужно знать численные значения эмпирических коэффициентов. Специально разработанная программа определяет такие значения эмпирических коэффициентов, при которых различие между рассчитанными и экспериментальными значениями КПД получается минимальным. В идентификации участвуют экспериментальные данные по многим десяткам центробежных ступеней, испытанных в СПбГТУ за многие годы проведения экспериментов. В настоящее время для практических расчётов используется выборка из характеристик полусотни разнообразных ступеней. Рас-

считанные и экспериментальные КПД сопоставляются в нескольких точках по расходу. Средняя невязка для расчётных режимов имеет порядок одного процента, что практически равно погрешности эксперимента. Идентификация выполняется с помощью специально разработанного программного комплекса, включающего базу данных испытанных ступеней. Опыт проведения идентификации показывает, что единственное условие минимизации невязки экспериментальных и рассчитанных КПД не является достаточным. Необходима, например, проверка достоверности соотношения между потерями напора в различных элементах и на отдельных участках. Кроме того, приемлемость полученной выборки  $X$  поверяется практикой использования математической модели для оптимизации проточной части.

Комплекс программ оптимального газодинамического проектирования центробежных компрессоров, созданный на кафедре КВиХТ СПбГТУ на основе математической модели потерь первого уровня включает в себя следующие программы: расчет и оптимизация одновального компрессора без промежуточного охлаждения газа; расчет и оптимизация центробежного компрессора произвольной схемы, т.е. имеющего любое, задаваемое пользователем число валов и промежуточных холодильников; программа расчета семейства характеристик центробежного компрессора произвольной конфигурации. Первые версии программ, входящих в комплекс, были созданы на кафедре КВиХТ более 10 лет назад еще применительно к семейству компьютеров ДВК и соответственно имели ограниченные возможности по широкому применению программ в инженерной практике и учебном процессе кафедры, в силу ограниченных аппаратных возможностей и несовершенства ранних версий математической модели.

Существующее на настоящий момент - четвертое поколение программ реализовано в 32 разрядной версии Microsoft Windows имеет значительно более широкие возможности, как по возможным вариантам расчетов, так и по возможностям визуализации результатов расчета, а именно получение графиков с характеристиками отдельных ступеней, характеристик компрессора в различном представлении, т.е. получение зависимостей выходных параметров, как при постоянном давлении всасывания, так и при постоянном давлении нагнетания, получение различных вариантов семейств характеристик, т.е. характеристик компрессора при изменении условий работы, получение эскизов проточных частей отдельных ступеней и компрессора в целом, визуализацию треугольников скоростей в рабочем колесе на любых режимах работы ступеней компрессора.

Возможности дальнейшего совершенствования комплекса авторы видят в дополнении комплекса программами расчета осевых усилий, потерь в подшипниках, протечек через концевые уплотнения, а также применения существующей математической модели в программах опирающихся на расчет обтекания лопаток рабочих колес невязким газом взамен двухмерной постановке, при которой не учитываются различия в условиях обтекания по высоте лопатки, а действительное распределения скоростей на сторонах давления и разрежения лопатки заменяется схематизацией в виде трапеции или параллелограмма.

В настоящее время активно ведутся работы по совершенствованию существующего комплекса программ. Основной задачей является переход от расчёта в двухмерной постановке к квазитрёхмерному расчёту. Предполагается вместо применения схематизированной картины обтекания лопатки на средней линии и учёта пространственности потока введением эмпирического коэффициента использовать расчёт реальной картины обтекания лопаток невязким газом в нескольких сечениях по высоте лопатки, после чего потери, вычисленные для разных областей по высоте лопатки, будут просуммированы. Данные изменения позволят точнее учесть характер течения в рабочем колесе и свести к минимуму погрешность расчёта характеристики ступени. Есть ещё одно преимущество, которое следует из перехода от схематизированной картины обтекания лопатки к реальной картине обтекания. Использование последней в программах расчёта и оптимизации центробежной ступени позволит проводить оптимизацию формы лопатки рабочего колеса из условия достижения оптимального распределения скоростей на сторонах лопатки количественными методами.