

Секция «Математика и механика»

Особенности математической модели пакета программ Метода универсального моделирования 5-го поколения для газодинамического проектирования центробежных компрессорных ступеней

Дроздов Александр Александрович

Аспирант

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Институт энергетики и транспортных систем, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: A_drozdi@mail.ru

Центробежные компрессоры применяются для обеспечения многих производственных процессов, а на их привод затрачивается значительное количество энергии. Таким образом, проблема оптимального проектирования центробежных компрессоров имеет очень большое значение. Для решения проблемы быстрого и достоверного определения характеристик компрессора был создан метод оптимального газодинамического проектирования. Он является результатом обобщения и анализа большого объема экспериментальных данных, накопленных на кафедре «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» СПбГПУ. Комплекс соответствующих компьютерных программ получил название Метод универсального моделирования [2]. Данный комплекс программ позволяет рассчитывать центробежные компрессоры со ступенями различной комплектности.

Развитие вычислительной техники позволяет производить большее количество расчетов за меньшее время, что создает предпосылки для дальнейшего развития Метода. Одним из направлений развития является совершенствование алгоритма газодинамического расчета путем отказа от упрощающих допущений.

При расчете термогазодинамических процессов центробежных компрессоров обычно определяются параметры газа в характерных сечениях (при входе и выходе) элементов проточной части. Действительный характер процесса в этих элементах остается, как правило, неизвестным. Специальные исследования для установления действительного характера процесса в каждом элементе сопряжены со значительными техническими трудностями. При поэлементном анализе ступени компрессора в этом нет необходимости. Действительный процесс заменяется некоторым условным, используемым для всех элементов при расчете. В практике компрессоростроения таким условным процессом является политропный, описываемый для идеального газа уравнением $p/\rho^n = const$. Ступени центробежных компрессоров состоят из ряда последовательно соединенных элементов. В каждом из них протекают различные процессы, в одних происходит сжатие, в других – расширение, а в третьих плотность существенно не меняется. Так, во входном патрубке поток движется с увеличением скорости. Это соответствует конфузорному течению, или процессу расширения, при котором плотность падает. В рабочем колесе (РК) за счет подвода механической энергии плотность увеличивается даже в том случае, если площадь межлопаточного канала постоянна или несколько уменьшается с ростом радиуса. В диффузоре происходит преобразование кинетической энергии потока в энергию давления. Скорость газа уменьшается, плотность возрастает, что соответствует процессу сжатия. В результате, если представить процесс в ступени в Т-S диаграмме, то видно, что он не может быть описан одной политропой. Поэтому про-

цесс в ступени рассматривается как сложный (кусочно-политропный). Он состоит из отрезков политроп, характеризующих процессы в отдельных элементах проточной части ступени.

В новой версии программ Метода универсального моделирования для каждого из участков проточной части центробежной компрессорной ступени определяется показатель политропы, рассчитываемый с учетом коэффициента потерь ζ . Это позволяет моделировать точный кусочно-политропный процесс в ступени. В случае ускоренного характера течения ($n < k$) формула для расчета показателя политропы имеет вид:

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 + \frac{\zeta}{(1-\epsilon_n^2)/\epsilon_k^2} \right)}}$$

в случае замедленного характера течения ($n > k$):

$$n = \frac{1}{1 - \frac{k-1}{k \left(1 - \frac{\zeta}{(1-\epsilon_n^2)/\epsilon_k^2} \right)}}$$

Для корректного расчета потерь в лопаточной решетке РК, необходимо рассчитать скорость в косом срезе межлопаточного канала \bar{w}''_1 . Учет сжимаемости при повороте потока до направления лопаток существенно влияет на уровень скоростей и на ударные потери, которые пропорциональны квадрату разности векторных величин скоростей $(\bar{w}'_1 - \bar{w}''_1)^2$, а так же позволяет учитывать возможность «запирания» межлопаточного канала.

Потери в лопаточной решетке РК включают в себя и профильные потери на лопатках. Основой расчета профильных потерь является расчет максимальной местной скорости на профиле и замедления потока на поверхностях. В предыдущих поколениях программ Метода универсального моделирования для этого используется схематизированная диаграмма скоростей [1] – рис. 1.

В новой версии программы использованы результаты систематического исследования обтекания лопаток рабочих колес невязким квазитрехмерным потоком, предпринятого автором работы [4]. Учет близкой к реальной картины обтекания с учетом его трехмерного характера повышает точность моделирования. Для расчета потерь необходимы значения скоростей в начале и в конце передней и задней поверхностей лопаток. Наиболее информативной является диаграмма скоростей на периферийной поверхности тока. Для расчета скорости в начале задней поверхности лопатки \bar{w}_1 была проведена обработка результатов численного эксперимента из работы [4] и предложена следующая зависимость [3]:

$$w_{31} = K_{31} 0,5 \Delta w + \bar{w}''_1,$$

где $K_{w31} = 2,06 \frac{2\bar{b}_1}{1-\bar{D}_1} - 0,261 \psi_{\text{Трасч}} + 1,69 \bar{D}_1^{2,8}$. Скорость в конце задней поверхности лопатки определяется выражением:

$$\bar{w}_{32} = K_{w32} 0,5 \Delta \bar{w} + \bar{w}'_2,$$

где $K_{w32} = x_9 + x_{10} (\psi_{\text{Трасч}} - 0,75)$;

$$x_9 = 1,4 \bar{D}_{\text{вТ}} + 0,38;$$

$$x_{10} = 4,8 - 50 \cdot \Phi_{\text{расч}}.$$

Скорость в начале передней поверхности лопатки принимается равной скорости в косом срезе межлопаточного канала РК:

$$\bar{w}_{п1} = \bar{w}''_1;$$

Скорость в конце передней поверхности лопатки определяется по формуле:

$$\bar{w}_{п2} = \bar{w}'_2 + K_{\text{уп2}} 0,5 \Delta \bar{w},$$

где $K_{\text{уп2}} = -1,45 - x_{11} (0,6 - \psi_{\text{Трасч}})^2$;

$$\begin{cases} x_{11} = -20 \text{Ln}(\Phi_{\text{расч}}) - 38 & \text{при } \psi_{\text{Трасч}} \leq 0,6 \\ x_{11} = -25 \text{Ln}(\Phi_{\text{расч}}) - 61 & \text{при } \psi_{\text{Трасч}} > 0,6 \end{cases}.$$

Описанные выше уточнения математической модели расчета параметров потока реализованы в новых версиях компьютерных программ для решения прямой и обратной задач применительно к ступеням и многоступенчатым компрессорам. Уточненная схематизация диаграмм скоростей и другие усовершенствования позволяют описывать характеристики ступеней и компрессоров в самом широком диапазоне конструктивных и газодинамических параметров с минимальными изменениями в наборе эмпирических коэффициентов. Для примера на рис. 2 результаты испытания двух модельных ступеней сопоставлены с расчетом при одинаковом наборе эмпирических коэффициентов.

Литература

1. Галеркин Ю.Б. Турбокомпрессоры. Рабочий процесс, расчет и проектирование проточной части. М.: ООО «Информационно-издательский центр «КХТ». 2010. 596 с. – с ил.
2. Галеркин Ю.Б. Моделирование рабочего процесса промышленных центробежных компрессоров. Научные основы, этапы развития, современное состояние. / Ю.Б. Галеркин. К.В. Солдатова. – СПб.: Изд-во Политехн. Унт-та, 2011. – 328 с.
3. Галеркин Ю.Б., Дроздов А.А., Солдатова К.В. Развитие компьютерных программ Метода универсального моделирования 1-го уровня // Труды IV международной научно-практической интернет-конференции «Молодежь. Наука. Инновации.» 2011. – с. 194-200.
4. Лысякова А.А. Создание метода схематизации диаграмм скоростей обтекания лопаток рабочих колес центробежных компрессорных ступеней: дис. канд. тех. наук / Лысякова Анна Андреевна. – СПбГПУ, 2010. – 141 с.

Слова благодарности

Хочу выразить благодарность своему научному руководителю: доктору технических наук, профессору Юрию Борисовичу Галеркину.

Иллюстрации

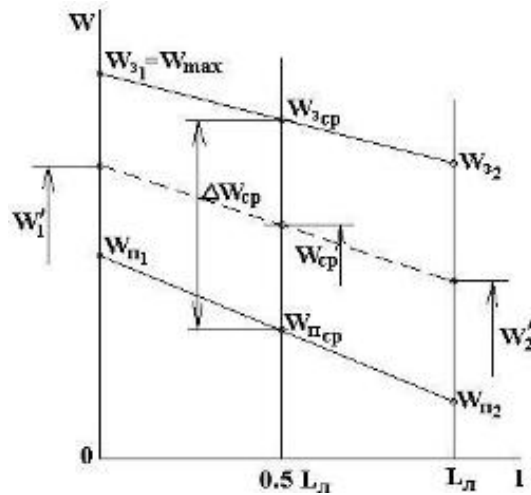


Рис. 1: Схематическая диаграмма поверхностных скоростей на лопатках рабочего колеса

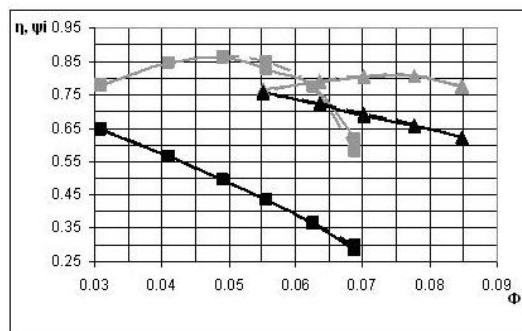


Рис. 2: Характеристики КПД и коэффициента внутреннего напора модельной ступени 048/048-0290 (слева) и 075/067-0345 (справа) сплошная линия – эксперимент, прерывистая линия – расчет