

## **К вопросу о применении сверхзвуковых лопаточных диффузоров**

К. А. Григорьев, К.т.н. В. А. Коротков

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий

*Уменьшение габаритов, а значит и массы установки одна из основных задач стоящая перед инженерами в настоящее время. Использование сверхзвукового лопаточного диффузора в центробежных компрессорах позволяет значительно, до полутора раз, сократить количество ступеней сжатия, что в свою очередь приводит к уменьшению массы и металлоемкости компрессора на 25–35%.*

Ключевые слова: сверхзвук, лопаточный диффузор, критическое число Маха.

Снижение размеров и соответственно массы холодильной машины связано с увеличением степени повышения давления в одной ступени, а, следовательно, уменьшению числа ступеней сжатия. Это может быть достигнуто увеличением частоты вращения ротора компрессора (увеличением условного числа Маха  $M_u$ ). По мере роста  $M_u$  увеличивается скорость потока перед лопаточной решеткой диффузора. Скорость потока может достигать больших дозвуковых значений или сверхзвуковых за счет непрерывного подвода внешней энергии, даже, несмотря на то, что каналы рабочего колеса специально не профилированы [1]. В связи с этим в проточной части появляются местные скорости, близкие к звуковым или превышающие их. Различают три вида течения: с большой дозвуковой скоростью, сверхзвуковое течение, когда во всем узком сечении решетки достигается скорость звука, при этом решетка, как правило, заперта и трансзвуковое течение, при котором скорость потока изменяется от сверхзвуковой до дозвуковой или наоборот. В зависимости от скорости движения может существовать несколько трансзвуковых режимов. При большой дозвуковой скорости наблюдаются течения с местными сверхзвуковыми зонами на выпуклых боковых участках тела. При сверхзвуковом течении перед телом возникает головная ударная волна. В случае тупого носика ударная волна отдалена и всегда имеет дозвуковую область. А если тело достаточно заостре-

но, то может осуществляться трансзвуковое обтекание с присоединенной ударной волной [2].

При небольших дозвуковых скоростях потока сжимаемость газа не оказывает существенного влияния на характер обтекания решетки. С увеличением числа  $M_{сз}$  (в дальнейшем  $M$ ) потери в решетке растут незначительно, а угол отставания потока остается практически постоянным в довольно широком диапазоне изменения  $M$ . Однако, при увеличении числа Маха свыше 0,6 в отдельных зонах профиля достигаются скорости звука с замыкающими их скачками уплотнения. Это приводит к появлению волновых потерь. При некоторых значениях числа  $M$  набегающего потока у основания скачка уплотнения возникают отрывы пограничного слоя, что вызывает резкое возрастание коэффициента потерь и увеличение угла отставания потока в решетке (уменьшение угла поворота потока решеткой).

Число  $M$  потока, при котором в какой-либо точке профиля достигается местная скорость звука, называют критическим и определяют либо экспериментально или расчетным путем. Наибольших значений  $M_{кр}$  достигает при углах атаки близких к нулю. Это объясняется наименьшей разностью скоростей потока на спинке и корытце лопатки. Существенное влияние на  $M_{кр}$  оказывает геометрия профиля решетки, в частности ее толщина. С уменьшением относительной толщины  $M_{кр}$  возрастает. При уменьшении относительной толщины с 10% до 5% значение  $M_{кр}$  дозвукового профиля возрастает на 25–35%. Также положительное влияние оказывает увеличение густоты решетки (улучшается безотрывное обтекание). Однако, существует предельное значение густоты решетки при переходе через которое возрастает местная диффузность, что приводит к росту вероятности отрыва потока и снижает  $M_{кр}$ . Так же сказывается и уменьшения угла атаки профиля потоком.

Дальнейшее увеличение чисел  $M$  приводит к расширению сверхзвуковых зон, к увеличению зон отрыва пограничного слоя. Этот процесс сопровождается ростом потерь в решетке. Увеличение числа  $M$  в дозвуковой решетке возможно только до определенного значения, когда в горле межлопаточного канала установится звуковая скорость. Дальнейшее увеличение расхода и скорости после этого делается невозможным, так как происходит «запирание» решетки.

Анализируя физическую картину обтекания лопаточной решетки сверхзвуковым потоком видно, что из-за конечной толщины кромок профиля при их обтекании вверх по течению отходят головные волны, обуславливающие возникновение, так называемых, волновых потерь.

Чем толще входные кромки лопаток, тем больше интенсивность головных волн, тем больше потери. И при больших толщинах входных кромок возникают интенсивные отошедшие скачки уплотнения. На стороне разряжения профилей вследствие кривизны происходит разгон потока, из-за чего в межлопаточном канале от входных кромок соседнего профиля до стороны разряжения располагается косой скачок уплотнения. Его интенсивность определяется геометрическими параметрами лопатки, в частности толщиной и кривизной. В решетках с дозвуковым профилированием разгон потока по стороне разряжения получается значительным, поэтому интенсивность замыкающего скачка значительна. Также из-за большой скорости происходит отрыв потока, что ведет к росту потерь.

Таким образом, работа лопаточных решеток с дозвуковым профилированием при сверхзвуковых скоростях набегающего потока недопустима из-за значительных потерь.

Назначение сверхзвукового лопаточного диффузора (СЗЛД) заключается в превращении кинетической энергии набегающего сверхзвукового потока в давление.

Хорошо известно, что торможение сверхзвукового потока начинается со скачка уплотнения.

Расположение прямого скачка уплотнения (ПСУ) зависит от выбора режима работы компрессора. Оптимальным является режим, при котором ПСУ расположен в горле СЗЛД или в непосредственной близости за ним. В этом случае набегающий сверхзвуковой поток с числом  $M_1 > 1$  станет замедляться в сужающемся канале до некоторого  $M_2 > 1$  ( $M_2 < M_1$ ). Затем, посредством сравнительно малого по интенсивности скачка, перейдя в дозвуковой поток (ДзП) и, оказавшись после этого в расширяющемся канале, будет продолжать замедляться, с одновременным ростом давления.

При некоторых режимах работы ПСУ может возникнуть перед входом в диффузор в виде так называемой отсоединенной ударной волны, которая вызывает резкое падение КПД компрессора.

Одним из способов борьбы с этим явлением является использование СЗД, благодаря которому скачок сначала «садится» на входное сечение, а потом перемещается вглубь входного участка, теряя при этом интенсивность.

Главными особенностями СЗЛД является то, что его входные кромки заострены, это делается из-за того, что если «носик» тупой, то ударная волна отдалена и всегда имеется дозвуковая область, а в случае с заостренной конструкцией может осуществляться сверхзвуковое обтекание с присоединенной

ударной волной. Площадь поперечного сечения межлопаточного канала первоначально уменьшается, а затем после перехода к дозвуковому потоку, он расширяется. Кромки межлопаточного канала выполняют с минимально возможной кривизной, для минимального разгона потока.

На практике в сверхзвуковых решетках применяют лопатки с несколько скругленными кромками. Это приводит к образованию головных ударных волн переменной интенсивности. В последней ударной волне, близкой к ПСУ, происходит переход сверхзвукового потока в дозвуковой. Далее происходит торможение дозвукового потока как в обычном диффузоре.

Следует учесть, что в реальных решетках выпуклая сторона лопатки выполняется с небольшой кривизной. Это приводит к дополнительному разгону потока и, как следствие, к росту волновых потерь и увеличению вероятности отрыва пограничного слоя у основания замыкающего скачка. При числе  $M$  перед скачком более 1,30–1,35 отрыв пограничного слоя и связанный с ним рост потерь становится неизбежным.

Для получения высоких КПД при больших числах Маха ( $M > 1,35–1,4$ ) необходимо более сложное профилирование лопатки СзЛД. Примером такой лопатки может служить лопатка с частичным торможением сверхзвукового потока на входном участке межлопаточного канала. Профилирование с учетом всех особенностей СзЛД позволяет уменьшить потери за счет создания в канале нескольких слабых скачков вместо одного интенсивного ПСУ. Применение таких лопаток, а также применение других технических решений по снижению волновых потерь должны обеспечить достаточно высокий КПД сверхзвукового диффузора при числах Маха набегающего потока до 1,5–1,6 [3].

## Список литературы

1. Некоторые особенности газодинамических характеристик центробежных компрессоров при высоких числах Маха / Бухарин Н.Н., Ден Г.Н., Евстафьев В.А., Капелькин Д.А. // Холодильная техника. 1977. С. 34–37.
2. Холодильные машины / Под общ. Ред. Л.С. Тимофеевского. — СПб.: Политехника, 1997. — 992 с.
3. Баранцев Р.Г. Лекции по трансзвуковой газодинамике. — Л.: ЛГУ им. Жданова, — 1965. — 216 с.

# **On the application of supersonic vane diffuser**

Grigoryev K.A., Korotkov V.A.

St. Petersburg State University of Refrigeration  
and Food Technologies

*Reduced size and mass of refrigerating machine is one of the major challenges facing engineers today. Using a supersonic diffuser in a centrifugal compressor can significantly reduce the number of compression stages (down to half as less again), which in turn leads to the reduction of compressor weight and metal consumption of by 25–35%.*

Keywords: supersonic speed, the vane diffuser, the critical Mach number.