

Исследование ступени холодильного центробежного компрессора со сверхзвуковым лопаточным диффузором

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

Санкт-Петербургский государственный университет низкотемпературных и пищевых технологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9

Supersonic vane diffuser that was investigated in SUR & FE, demonstrated high performance in a wide operating range with various angles of vane arrangement and different Mach numbers at the impeller outlet.

Key words: vane diffuser, supersonic, centrifugal compressor.

Ключевые слова: лопаточный диффузор, сверхзвук, центробежный компрессор.

Применение сверхзвуковых лопаточных диффузоров для холодильных центробежных компрессоров является одним из путей снижения массогабаритных показателей. Это достигается путем повышения отношения давлений в одной ступени благодаря увеличению окружной скорости и специального профилирования рабочего колеса и лопаточного диффузора. В связи с низкой скоростью звука в хладонах путь, связанный с увеличением окружной скорости и, следовательно, чисел M в элементах проточной части, является наиболее перспективным.

Однако в центробежных компрессорах традиционной конструкции приходится отказаться от сверхзвуковых скоростей в проточной части, так как при $M > M_{кр}$ происходит резкое снижение напора и КПД ступени. Это объясняется не только потерями, связанными со скачками уплотнения, но и потерями, вызванными срывом потока вблизи скачков из-за наличия в них значительных градиентов давления.

Опыт мирового компрессоростроения и сверхзвукового авиадвигателестроения показывает, что эффективность обтекания решеток и входных диффузоров сверхзвуковым потоком может быть высокой, если при их профилировании стремиться к получению безотрывного течения в проточной части, используя с наибольшей эффективностью скачки уплотнения для повышения давления [1].

Сверхзвуковые режимы работы лопаточного диффузора можно получить и на компрессоре с не специально профилированными рабочими колесами. Этот режим работы может быть достигнут увеличением частоты вращения ротора компрессора (увеличением условного числа Маха M_u).

Для обеспечения работы ступеней с $M_u = 1,35 \div 1,4$ при достаточно высоком КПД необходимо специальное профилирование лопаток и выбор умеренных значений диффузности межлопаточных каналов. Основные особенности таких ступеней: малая относительная толщина профиля ($\bar{c} = 3 \div 5 \%$ и менее), тонкая передняя кромка, наличие прямолинейного (или близкого к нему) участка спинки профиля.

Переход от сверхзвуковой к дозвуковой скорости, в принципе, можно осуществить и без скачков уплотнения. Это требует сложного профилирования лопаток, чтобы образованные ими каналы были с очень малой степенью сужения и с нулевой толщиной передних кромок. Однако такие решетки работают неустойчиво, а применение торможения сверхзвукового потока без скачков уплотнения только на расчетном режиме нецелесообразно.

Известно, что систему скачков небольшой интенсивности можно использовать для повышения давления без существенного роста потерь. Но при этом надо обеспечить такое профилирование лопаток, чтобы скачки не вызывали отрыва пограничного слоя от выпуклой стороны лопатки. Торможение сверхзвукового потока можно осуществить в одном прямом скачке или в системе скачков внутри межлопаточного канала. При этом угол выходного участка профиля не должен превышать предельного значения, при котором поток на входном участке не будет претерпевать никаких изменений. Значение этого угла при числах $M = 1,1 \div 1,4$ не должно превышать $4 \div 6^\circ$.

Эксперимент проводился на экспериментальном стенде на кафедре холодильных машин СПбГУНиПТ.

Принципиальная схема стенда представлена на рис. 1.

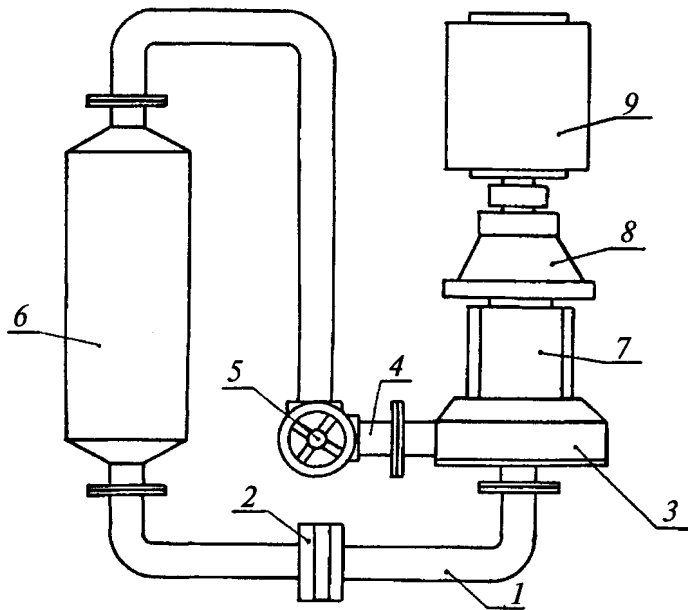


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

По всасывающему трубопроводу 1, на котором установлено сужающее устройство для измерения расхода газа 2, рабочее тело поступает в ступень 3. Сжатое в ступени рабочее тело направляется по нагнетательному трубопроводу 4, на котором установлена дроссельная задвижка 5, в водяной газоохладитель 6, после чего при температуре 20–30 °С снова поступает во всасывающий трубопровод.

Модель ступени 3 консольно крепится к корпусу подшипника 7. В качестве мультипликатора 8 с передаточным отношением $\varepsilon = 11,4534$ установлен двухрядный планетарный редуктор авиадвигателя АИ-20. Максимальная мощность приводного электродвигателя постоянного тока 9 марки П-112 составляет 200 кВт при 1500 об/мин. Питание двигателя обеспечивается трехмашинным преобразователем. Число оборотов вала ступени плавно регулируется в пределах 0–1500 об/мин.

Для изучения ступени использовался способ исследования, основанный на измерении статических давлений в характерных сечениях с последующей обработкой методом условных температур.

В проведенном эксперименте использовался диффузор с прямолинейной образующей при наружном диаметре 0,43 м и $\overline{D}_4 = 1,41$. Профиль образован двумя прямолинейными образующими с углом между ними 10° и замыкающей стороной. При числе лопаток диффузора, равном 22, образуется плавно расширяющийся канал, характеризующийся углом раскрытия эквивалентного конического диффузора 6°.

Рабочее вещество R12, сжатое в центробежном компрессоре 3 (рис. 1), попадало в нагнетательный патрубок 4 и поступало к дроссельному вентилю 5, с помощью которого изменялась характеристика сети.

Далее рабочее вещество направлялось в газоохладитель 6, который охлаждался проточной водой из городской сети. После теплообмена рабочее вещество по всасывающему трубопроводу 1 с расходомерной диафрагмой 2 поступало в компрессор (рис. 1).

Для того чтобы не превышать номинальной потребляемой мощности электродвигателя, испытание ступени проводилось при пониженном давлении. Такое снижение давления позволяло уменьшить количество рабочего вещества, заправляемого в систему, и не влияло на результаты эксперимента [2].

Диффузор работал при различных числах Маха на выходе из рабочего колеса: от 0,8 до 1,8, при различных углах установки лопаток диффузора $\alpha_{зл}$, равных 2; 3,5; 5; 8 и 11°.

Рассматривались характеристики сверхзвукового лопаточного диффузора при числах M_u , равных 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,7; 1,8, при $b_3/b_2 = 1$ и при различных углах установки лопаток (рис. 2).

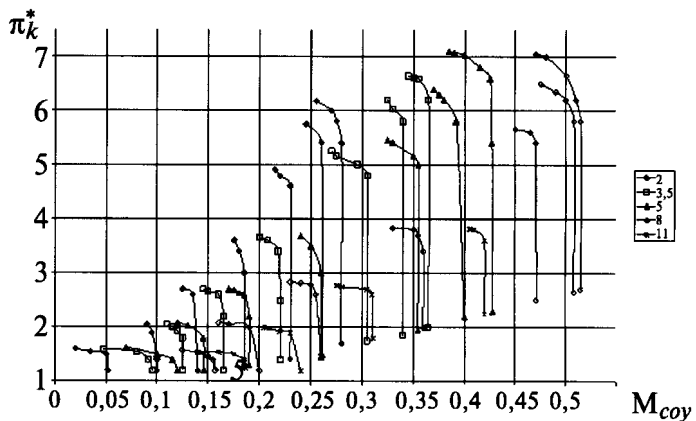


Рис. 2. Характеристики степени повышения давления ступени со сверхзвуковым лопаточным диффузором при углах установки лопаток диффузора, равных 2; 3,5; 5; 8 и 11°

Максимумы степени повышения давления для режима $M_u = 0,8$ находятся на одном уровне и с переходом к большим углам наклона лопаток диффузора изменений не претерпевают, хотя при этом M_{coy} возрастает с 0,04 до 0,145. В этом промежутке расходов значения π_k^* на данном режиме равны 1,6–1,65.

С ростом скорости происходит заметный рост и показателя степени сжатия. Так, в режиме $M_u = 1,0$ значения достигают 2,0–2,05, а в режиме $M_u = 1,2$ доходят и до 2,7–2,8. Также увеличивается M_{coy} : для режима с $M_u = 1,2$ оно достигает 0,32. Хочется отметить, что, начиная с режима работы $M_u = 1,4$, заметно появление характерного наклона в линии, соединяющей максимумы π_k^* . При этом, если для режима $M_u = 1,4$ наклон не очень велик ($\Delta \pi_k^* = \pi_k^*_{max} - \pi_k^*_{min} = 0,25$), то в режимах с $M_u > 1,6$ значения $\Delta \pi_k^*$ достигают 0,75 при $M_u = 1,6$, а в остальных режимах это значение будет еще больше,

но получить максимумы характеристик в проводимом эксперименте при самых больших M_u не удалось из-за ограничения в мощности оборудования.

Характер изменения Δi^* для различных режимов одинаков, но в зависимости от режима с ростом M_u уровень спада в характеристиках становится более заметным и существенным (рис. 3). Значение Δi^* для режима $M_u = 0,6$ примерно равно 11 ± 1 кДж/кг. При переходе от одного режима к другому значения Δi^* увеличиваются, достигая величины 70 ± 2 кДж/кг при $M_u = 1,8$.

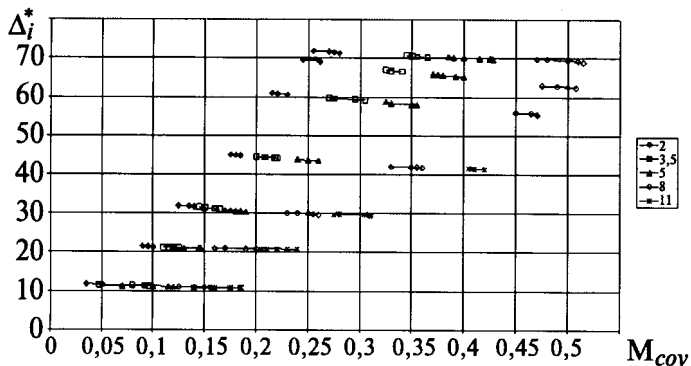


Рис. 3. Характеристики Δi^* ступени со сверхзвуковым лопаточным диффузором при углах установки лопаток диффузора, равных 2; 3,5; 5; 8 и 11°

При таких высоких значениях π_k^* и Δi^* значения $\eta_{пол}^*$ (рис. 4) несколько ниже, чем для обычных центробежных компрессоров с дозвуковыми режимами, но следует отметить, что на некоторых режимах работы $\eta_{пол}^*$ достигает 0,78. Показатели максимальных КПД ведут себя одинаково на всех режимах: с ростом угла поворота лопаток диффузора растет и КПД, причем рост значительный, и $\Delta M_u = \eta_{пол. max}^* - \eta_{пол. min}^*$ достигает 0,1. Однако для режимов с наибольшими M_u , на которых достигнуть предельных режимов работы не удалось из-за отсутствия технической возможности, КПД при максимальных углах установки лопаток несколько падает. Связано это не с изменением вида характеристик, а только с тем, что для построения графиков были взяты не максимально возможные показатели.

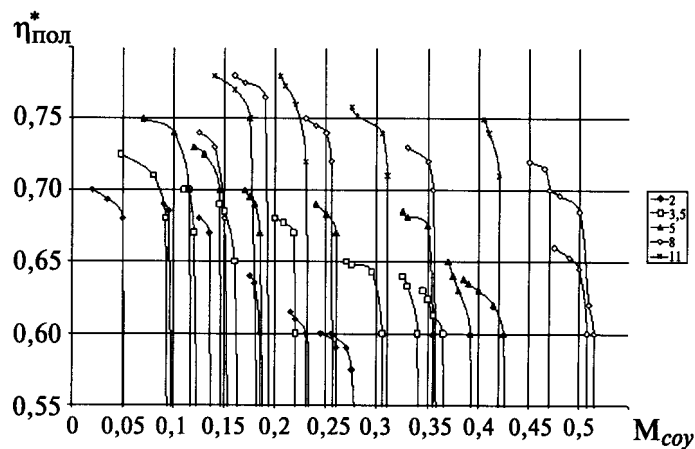


Рис. 4. Характеристики КПД ступени со сверхзвуковым лопаточным диффузором при углах установки лопаток диффузора, равных 2; 3,5; 5; 8 и 11°

Анализируя интегральные характеристики, отчетливо видим, что зона устойчивой работы с ростом M_u сначала растет, а затем при превышении 1 начинает понемногу сокращаться и для режимов с $M_u = 1,7 \div 1,8$ очень незначительна. Так, при определенном угле установки лопаток диффузора ширина зоны устойчивой работы не превышает $0,03M_{coy}$.

Видно также, что с ростом степени повышения давления происходит и рост расхода холодильного агента, а это определяет невозможность работы данных компрессоров без специальных способов регулирования производительности. Так как степень повышения давления чаще всего величина более или менее постоянная (она зависит от технологических нужд, от используемого теплообменного оборудования и температуры окружающей среды), а расход и холодопроизводительность переменны в очень широком диапазоне, то изменения эти носят зачастую импульсивный характер.

Список литературы

1. Исследование и разработка методики расчетов процессов холодильных центробежных компрессоров сухого сжатия (отчет № 712), № 01860046732 / ЛТИХП; В. И. Пекарёв. — Л.: ЛТИХП, 1987.
2. Бухарин Н. Н. Моделирование характеристик центробежных компрессоров. — Л.: Машиностроение, 1983.