УДК 621.515

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЦЕНТРОБЕЖНОГО МНОГОСТУПЕНЧАТОГО КОМПРЕССОРА

С. И. АНЦИФЕРОВ, В. В. ЧЕРЕПЧЕНКО,
И. В. СЕВАСТЬЯНОВ, Д. А. СЫЧЁВ
Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова
Белгород, Россия

Исследования влияния основных параметров на эффективность работы центробежного многоступенчатого компрессора представляют собой важную задачу, поскольку от эффективности этих машин напрямую зависят энергозатраты технологических процессов в энергетике, нефтехимии, газоперекачке и других отраслях. Даже незначительное повышение КПД компрессора, исчисляемое долями процента, способно обеспечить существенный экономический эффект при длительной эксплуатации, что делает актуальным детальный анализ факторов, определяющих рабочие характеристики оборудования.

В рамках такого анализа параметры, влияющие на эффективность, принято разделять на конструктивные, закладываемые на этапе проектирования, и режимные, обусловленные условиями эксплуатации [1]. К числу конструктивных параметров относятся геометрия рабочего колеса, включая диаметр, число и форму лопаток, углы входа и выхода, распределение толщины профиля и меридиональную форму канала, от которых зависит передача энергии газу и уровень потерь на трение и отрыв потока. Существенное влияние оказывают также радиальный и осевой зазоры, определяющие величину перетечек и локальные потери; при этом избыточные зазоры способны не только снижать КПД, но и ухудшать запас по помпажу.

Среди режимных параметров ключевое место занимает частота вращения ротора, определяющая окружную скорость и напор ступени; при этом отклонение от расчётного режима неизбежно приводит к снижению КПД. Не менее важным является расход газа, поскольку его отклонение от оптимального значения провоцирует отрыв потока, рост потерь и риск возникновения помпажа [2]. Параметры газа на входе – давление и температура – влияют на плотность, скорость и сжимаемость среды, изменяя картину течения и, соответственно, эффективность работы компрессора. Состав и свойства газа, включая показатель адиабаты, молекулярную массу и вязкость, определяют газодинамические характеристики и уровень потерь.

Для исследования влияния указанных параметров применяют комплекс методов, включающий одномерные и полуэмпирические методики, позволяющие оперативно рассчитывать характеристики ступеней и оценивать чувствительность к изменению параметров, а также CFD-моделирование, обеспечивающее трёхмерный расчёт течения в проточной части и детальный анализ зон повышенных потерь, отрыва потока и вихреобразования. Экспериментальные

исследования на стендах с измерением давления, температуры, расхода и крутящего момента служат для верификации расчётных моделей и получения реальных характеристик. Теория подобия и безразмерные параметры, такие как коэффициенты расхода и напора, числа Маха и Рейнольдса, позволяют обобщать результаты и переносить их на другие машины.

Механизмы влияния параметров на КПД и напор проявляются в различных аспектах. Изменение угла выхода лопаток рабочего колеса сказывается на теоретическом напоре и характере течения: чрезмерно большой угол способен вызвать отрыв на спинке лопатки, а слишком малый – привести к недоиспользованию энергии [3]. Увеличение радиального зазора усиливает перетечки, снижая напор и КПД, особенно при высоких окружных скоростях. Несогласованность ступеней приводит к тому, что первые ступени функционируют вне оптимального диапазона, а последние оказываются на пределе устойчивости, что негативно отражается на общем КПД и запасе по помпажу.

На основании полученных данных можно сформулировать практические рекомендации по повышению эффективности. На этапе проектирования целесообразно применять многокритериальную оптимизацию геометрии ступеней с учётом рабочего диапазона и требований по запасу по помпажу. В процессе эксплуатации важно поддерживать режимы, близкие к расчётным, контролировать состояние проточной части на предмет эрозии и отложений, а также следить за герметичностью уплотнений. Для модернизации оборудования эффективно использовать CFD-расчёты с целью выявления «узких мест» и точечной доработки диффузоров, обратных аппаратов и улитки. Внедрение систем мониторинга с датчиками давления, температуры и расхода позволяет оперативно отслеживать отклонения характеристик и своевременно проводить техническое обслуживание.

Таким образом, эффективность центробежного многоступенчатого компрессора формируется под воздействием совокупности конструктивных и режимных параметров, среди которых наиболее значимыми являются геометрия рабочих колёс и диффузоров, согласование ступеней, радиальные зазоры и соответствие фактического режима работы проектному. Современные методы расчёта и экспериментальных исследований дают возможность количественно оценивать влияние каждого из этих факторов и целенаправленно повышать КПД машины.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Галеркин, Ю. Б.** Теория и расчёт турбокомпрессоров : учеб. пособие / Ю. Б. Галеркин, Е. В. Попова. – СПб. : Политехн. ун-т, 2010. – 476 с.

2. **Селезнёв, К. П.** Центробежные компрессоры / К. П. Селезнёв, Ю. Б. Галеркин. – Л. : Машиностроение, 1982. – 271 с.

3. **Минко, В. А.** Нагнетатели в системах теплогазоснабжения и вентиляции / В. А. Минко, Ю. И. Юров, Ю. Г. Овсянников // Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – № 10. – С. 86–87.