

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН И КРИОГЕННЫХ УСТАНОВОК

Кожухов Ю.В.¹, Фатеева Е.С.¹, Соколов М.И.¹, Данилишин А.М.¹, Карташов С.В.¹
Национальный исследовательский университет ИТМО г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: рассмотрены методические подходы к моделированию газодинамических характеристик ступеней центробежных компрессоров холодильных машин и криогенных установок, учитывающие реальность газов и внешний теплообмен потока.

Ключевые слова: центробежный компрессор, ступень центробежного компрессора, методы вычислительной газодинамики, свойства реальных газов, внешний теплообмен потока.

В исследовании был проведен аналитический расчет газодинамических характеристик центробежного компрессора (далее – ЦК) в составе установки сжижения диоксида углерода. Определена предварительная конструкция ЦК, а также параметры на входе и выходе из секций. Было выявлено значительное изменение коэффициента сжимаемости (далее – коэффициент z) рабочего вещества по проточной части.

Для уточнения коэффициента z в различных контрольных сечениях одной ступени сжатия был применена следующая методика. Проведен газодинамический расчет первой ступени с использованием коэффициента z , определенного по параметрам газа на входе в ЦК. Определены параметры (давление, температура и коэффициент z) на выходе из ступени, рассчитано среднее арифметическое значение коэффициента z между входом и выходом из ступени. По среднему коэффициенту z повторно рассчитаны давления и температуры газа в контрольных сечениях. Далее графически были определены уточненные значения КПД, с учетом обновленных КПД выполнен пересчет параметров в контрольных сечениях.

Был проведен повторный расчет параметров в элементах ступени с учетом усредненных значений коэффициентов z между сечениями. Пример, для участка 0-1 – среднее арифметическое между z_0 и z_1 и т.д. Как показывают результаты исследования, коэффициент z для диоксида углерода изменяется в широком диапазоне для всей проточной части компрессора.

Далее планируется проведение численного исследования, анализ полученных данных и дальнейшее уточнение геометрических и термогазодинамических параметров проточной части ЦК диоксида углерода.

В исследовании был проведен анализ применимости методик расчёта реальности газа для газодинамического проектирования центробежных компрессоров систем СПГ. Основные критерии, учитываемые при анализе того или иного уравнения состояния реального газа:

- диапазон расчетного давления реального газа;
- диапазон расчетной температуры реального газа;
- диапазон расчетной плотности реального газа;
- учитываемые газы в составе реального газа;
- относительная точность методики;
- простота и воспроизводимость методики в рамках газодинамического расчета центробежного компрессора.

В данной работе был произведен анализ и сравнение нескольких методик расчета реального газа, подобранных под следующие рабочие параметры газа и его свойства:

- тип газа: природный газ;

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» www.kviht.ru

- состав газа: метан – 95-98%, остальные газы (этан, пропан, бутан, водород, азот, гелий и прочее) – 2-5%;

- рабочие температуры реального газа в центробежном компрессоре: от 0 до 150 градусов цельсия;

- рабочие давления реального газа в центробежном компрессоре: от 1 до 100 бар;

- рабочая плотность реального газа в центробежном компрессоре: от 0,5 до 100 кг/м³.

Непосредственно расчет проводился для дожимного центробежного компрессора природного газа со следующими параметрами:

- состав газа: метан - 96,2 %, этан - 1,7%, пропан - 1,2%, остальное - менее 1%;

- давление газа на входе в ЦК: 4,08 МПа;

- давление газа на выходе из ЦК: 6,42 МПа;

- температура газа на входе в ЦК: 35°C;

- температура газа на выходе в ЦК: не более 100°C.

Рассмотренные методики расчета реальности газа:

- уравнение состояния реального газа Пенга-Робинсона (PR);

- модель GERG-2008 Кунца-Вагнера (GERG-2008);

- фундаментальное уравнение состояния AGA8 (AGA8).

Относительная погрешность методик по исследуемым параметрам: PR \approx 1%; GERG2008 < 0,5%; AGA8 < 0,5%. Относительная погрешность методик по рассчитанному политропному напору ЦК, исходя из данных методики: PR < 0,5%; GERG2008 < 0,5%; AGA8 \approx 1,5%.

В исследовании был проведена разработка методика газодинамического расчета высоконапорных ступеней концевой типа центробежных компрессоров для повышения эффективности турбохолодильных машин [1]. Методика комплексно использует подходы расчетно-теоретического анализа, методы расчета вязких турбулентных течений, методы многокритериальной и многопараметрической оптимизации. Методика основана на комплексном подходе использования традиционного расчетно-теоретического анализа, расчета квазитрехмерного невязкого потока и современных методов моделирования трехмерного вязкого потока с многопараметрической оптимизацией геометрических параметров проточной части. Методика позволяет в сжатые сроки производить газодинамический расчет высокоэффективных проточных частей ступеней центробежных компрессоров с достижением приемлемой точности, исключая или минимизирующий экспериментальную доводку.

Методика успешно применена для газодинамического расчета высоконапорных ступеней концевой типа центробежных компрессоров турбодетандерных агрегатов холодильных машин. Получены газодинамические характеристики типоряда для компрессорной части турбодетандерных агрегатов применительно к мощности компрессора от 1.9 МВт до 6,5 МВт на отношение давлений компрессора P_k порядка 1,9 с политропным КПД от 79% до 85% для массового расхода 71 т/ч до 230 т/ч на расчетном режиме.

Исследовался вопрос учета теплообмена между потоком и поверхностями проточной части при создании расчетной модели и моделировании рабочего процесса малорасходных ступеней центробежного компрессора холодильных машин и криогенных установок методами вычислительной газодинамики. Проведено моделирование рабочего процесса в проточной части с сопряженным теплообменом, а также упрощенным методом, т.е. заданием температур стенок. Проведено сравнение газодинамических характеристик ступени по результатам моделирования и эксперимента, оценено влияние теплообмена на коэффициент трения дисков, получены и проанализированы распределения температур в междисковых зазорах и проточной части ступени. Определено, что при моделировании течения газа в малорасходных ступенях с учетом теплообмена необходимо корректно обеспечивать распределения температур в зазорах. Это может быть достигнуто расчетом сопряженного теплообмена или упрощенным моделированием теплообмена через задание распределения температуры стенок.

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» www.kviht.ru

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» www.kviht.ru

Литература

1. Danilishin A.M., Kozhukhov Y. V. Centrifugal Compressors Gas-Dynamic Characteristics Influence on the Refrigerating Machines Efficiency. PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE 2 (58) 2023. pp.72-80.

Больше информации о компрессорной технике на сайте научной группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» www.kviht.ru