

CFD проектирование центробежного многоступенчатого компрессора в СПГ цикле

Н.Г. Хасанов, И.Ф. Хуснутдинов, Р.Ф. Муртазин

(АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», Группа ГМС, г. Казань)

В.В. Пашинкин (ООО «УК «Группа ГМС», г. Москва)

А.С. Муравейко, О.В. Маракуева, Д.В. Ворошин (ООО «Нуменка», г. Санкт-Петербург)

Описан способ сквозного 1D-3D проектирования этанового компрессора для холодильного цикла СПГ с пересчётом характеристик модельной ступени и CFD верификацией. Описаны решения по проектированию компрессора с промежуточным подмесом рабочего тела.

Ключевые слова: центробежный многоступенчатый компрессор, CFD, характеристика, СПГ, этан, всасывающая камера, холодильный цикл, пересчёт характеристик, эксперимент.

CFD design of centrifugal multistage compressor in LNG cycle

Khasanov N., Khusnutdinov I., Murtazin R. (JSC «NIITurbocompressor named after Schnepf V.», Kazan)

Pashinkin D («HMS Group» MC LLC, Moscow)

Muraveyko A., Marakueva O., Voroshin D. («Numeca» LLC, St. Petersburg)

End-to-end 1D-3D design of ethane compressor for LNG refrigeration cycle with recalculation of the model stage performance and CFD verification is defined. Solutions for design of compressor with interim mix of operating fluid are described.

Keywords: centrifugal multistage compressor CFD, performance, LNG, ethane, sideload, sidestream, Numeca, suction chamber, refrigeration cycle, recalculation of performance, experiment.

Производство сжиженного природного газа (СПГ) непрерывно увеличивается и становится важной отраслью экономики и промышленности. Компания «Новатек» применяет цикл ожижения «Арктический каскад», оптимизированный под климатические условия крайней севера. Одним из основных элементов данной технологии является этановый холодильный контур - пять ступеней сжатия, реализованные в двух компрессорных установках. Ступени сжатия имеют разные массовые производительности, определенные заказчиком на основе материального баланса. Принципиальная схема компрессоров этанового контура, разрабатываемого НИИтурбокомпрессор на основе многолетнего опыта проектирования, с использованием собственных ступеней сжатия, приведена на рисунке 1.

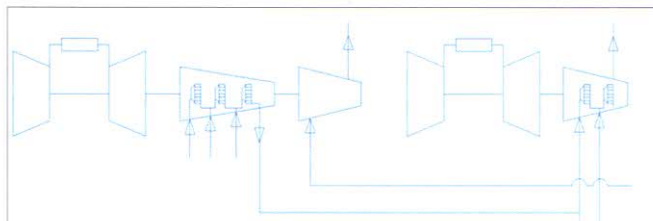


Рис. 1. Принципиальная схема компрессоров этанового контура

В конструкции ведущих производителей компрессорной техники реализована одновальная схема с прямым приводом и наличием промежуточного подвода рабочего газа во всасывающие камеры, что является общепринятой мировой практикой [1,2,3]. Суммарная потребляемая мощность компрессорных секций этанового контура и связанные ограничения по применению привода, потребовали реализации сжатия этана в двух корпусах по схеме 3 + 2 ступени сжатия, принят подвод этана перед 2 и 3 ступенью сжатия для трехсекционного компрессора и перед 2 ступенью для двухсекционного. Эскиз меридиональной формы проточной части трехсекционного этанового компрессора представлен на рисунке 2.

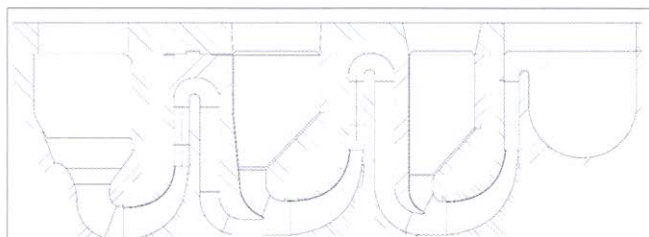


Рис. 2. Эскиз меридиональной формы проточной части компрессора с промежуточным подмесом рабочего тела

Научная новизна работы по проектированию этанового компрессора была вызвана следующим рядом, требующих решения, проблем:

— низкие температуры цикла снижают местную скорость звука этана, провоцируя лопаточную решётку рабочего колеса (РК) на «запирание»;

— одна из секций компрессора связана жёстко кинематически с другой машиной, что ограничивает диапазон возможных оборотов;

— трёхмерный характер потока перед РК и отсутствие физического эксперимента на моделях приводит к необходимости решения задачи вычислительной газодинамики (CFD RANS). CFD решение усугублено высокими давлениями и низкими температурами с низкой кинематической вязкостью – тонкими пограничными слоями. Модель включает неосесимметричные и непериодические элементы – всасывающие и нагнетательные камеры. Близкое расположение лопаточных венцов может привести к их нестационарному взаимодействию. Это требует повышенного качества и объёма расчётной сетки;

— давление и температура этана на линии насыщения в подмесе однозначно связаны и зависят от работы предыдущей ступени, в то время как CFD модель требует жёстко заданных граничных условий;

— в диапазоне работы цикла этан проявляет себя как неидеальный газ.

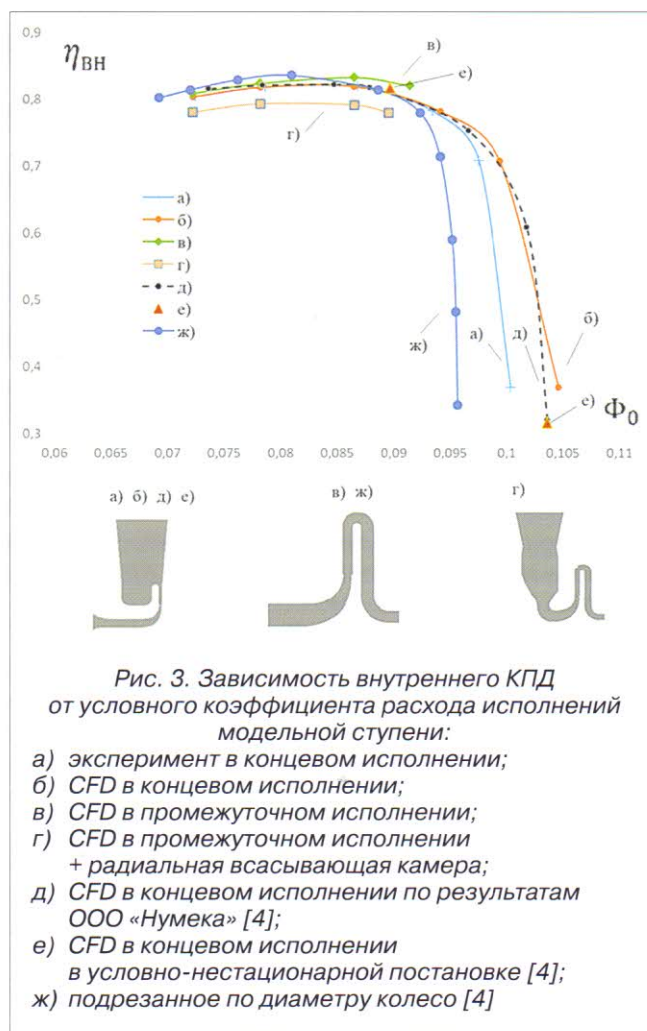
Из-за высокой доли новизны в конструкции компрессора привлечены специалисты ООО «Нумека», для проверки выбранных конструктивных решений, по обеспечению выполнения технических требований заказчика.

Этапы проектирования проточной части этанового компрессора:

1. Одномерный анализ на основе модельных ступеней

В НИИ Турбокомпрессор принят метод проектирования натурального компрессора путём пересчёта безразмерных характеристик модельных ступеней на требуемые условия эксплуатации, с учетом реальности газа и перетечек по уплотнениям. Наиболее приемлемой ступенью для данного компрессора оказалась базовая ступень с осерадиальным РК и выходным углом лопатки 50° , примененная в каждой из пяти секций натурального компрессора, однако, данная ступень ранее применялась только в концевом исполнении с нагнетательной камерой и осевым всасыванием. CFD методом в ПК «Numeca Fine/Turbo» изучено влияние радиальной всасывающей камеры и нового, разработанного и оптимизированного, обратно направляющего аппарата на характеристики модельной ступени (рис. 3).

Кривые а), б), в) рис. 3. подтверждают адекватность CFD модели и эквивалентность промежуточ-



ной и концевой характеристик. Коэффициент потерь давления всасывающих камер составил 0,25-0,4, на основании которого были заложены коэффициенты коррекции характеристик в одномерном анализе.

Одномерное проектирование натурального компрессора осуществлено в программном комплексе «МЦК Real» [5, стр. 171], выбирающим геометрию ступени и формирующим её меридиональную подрезку для обеспечения требуемого напора и расхода, на основе банка экспериментальных данных. Программа была модифицирована для учёта скоростей потока в незавершённом процессе сжатия в промежуточной ступени. Проточная часть рассчитывалась без учёта расхода и сопротивления подмеса как простая одновальная машина. Далее, на основе известных из CFD расчёта коэффициентов потерь подводящих камер, осуществлялся переход от входа в колесо к входному сечению камеры - оценивалось давление входа в подмес, и, если оно не соответствует требованиям технического задания (ТЗ), корректировалась проточная часть компрессора.

