

УДК 621.515

Использование передовых технологий для повышения экономической эффективности центробежного компрессора

В. К. Юн (ЗАО «РЭПХ», РФ, Санкт-Петербург)

E-mail: v.yun@reph.ru

В данной статье приведены основные положения проектирования и изготовления центробежных компрессоров на базе исследований модельных рабочих колес с использованием передовых технологий отечественного машиностроения. На примере центробежного компрессора производства ЗАО «РЭПХ» получены высокие показатели эффективности проточных частей за счет повышения политропного КПД. Согласно Программе унификации ГПА* был спроектирован, а затем изготовлен унифицированный центробежный компрессор мощностью 16 МВт с политропным КПД не ниже 87–88 %. Унификация заключалась в разработке универсальных элементов проточной части, узлов уплотнений и подшипников. Основное преимущество унифицированных центробежных компрессоров состоит в уменьшении сроков изготовления и затрат на производство.

Ключевые слова: центробежный компрессор, политропный КПД, проточная часть, уплотнения, подшипники, эффективность, унификация центробежных компрессоров, электроприводной газоперекачивающий агрегат.

Для повышения эффективности компрессорного оборудования необходимо использовать инновационные технологии, а также новые подходы к проектированию и изготовлению. Известно, что проточная часть центробежного компрессора (ЦК) состоит из элементов, включающих всасывающую камеру, рабочее колесо (РК), диффузор либо бездиффузорную улитку, обратный направляющий аппарат (ОНА), в случае многоступенчатого исполнения, и выходное устройство (рис. 1). Проточные части первых отечественных ЦК были малоэффективными и имели относительно невысокий политропный КПД $\eta_{пол}$ (60–70 %). С развитием систематических исследовательских работ по газодинамике

и прочности политропный КПД ЦК достиг мирового уровня (87–88 %).

Накопленный многолетний опыт проектирования Невского завода, вошедшего в 2007 г. в ЗАО «РЭПХ», позволяет разрабатывать высокоэффективные проточные части ЦК с достаточно широкой областью работы [1]. Эти достижения прежде всего были достигнуты благодаря систематическим исследованиям аэродинамики в элементах проточных частей, начавшимся в середине 50-х гг. прошлого столетия. В то время еще отсутствовали проверенные методики измерений внутри каналов, не было также отработанных конструкций передатчиков давления для измерений внутри высокооборотных рабочих колес. Неясным был вопрос о применимости

классических методов газовой динамики используемых теорий газодинамических решеток и пограничного слоя для лопаточных систем центробежных ступеней, имеющих чрезвычайно малые удлинения лопаток. Для решения этого вопроса необходимо было получить такие экспериментальные данные, которые можно было бы сопоставлять с результатами теоретических расчетов. Для исследования особенностей течения в отдельных элементах ступени не создавались какие-либо специальные экспериментальные установки: опыты производились на экспериментальных установках, содержащих все элементы проточной части и предназначенных для получения суммарных газодинамических характеристик одно- или многоступенчатой секции конкретной проектируемой заводом машины (рис. 2). При таких условиях невозможно было исследовать по отдельности каждый элемент проточной части, поэтому приходилось достаточно много времени тратить на создание моделей, являющихся прототипом будущего натурального компрессора. В настоящее время исследования всех элементов проведены не только экспериментальным способом, но и численными методами, использующими при этом высокопроизводительные и современные вычислительные программные комплексы. Ниже приведены основные исследования элементов проточной части с использованием передовых технологий.

Назначение всасывающей камеры состоит в организованном подводе потока газа

* Протокол первого расширенного заседания Ассоциации производителей газоперекачивающего оборудования под руководством председателя правления ОАО «Газпром» А.Б. Миллера. Москва, 9 октября 2012 г.

в рабочее колесо первой ступени. В отличие от осевого подвода в ней имеются потери, зависящие от геометрических форм самой камеры и влияющие на политропный КПД и напор. Проводившиеся на Невском заводе исследования в целях выявления и устранения дополнительных потерь во всасывающей камере показали, что наибольшие потери возникают при резком повороте потока от входного патрубка до входа в рабочее колесо. Введение разделительного ребра на входе во всасывающую камеру позволило устранить закрутку и неравномерность потока на входе в ступень. Исследования показали, что наименьшие потери во всасывающей камере возникают при плавном изменении направления потока и зависят от радиуса закругления внутренней стенки на выпуклой стороне. Получены значения наименьших потерь до $\xi = 0,15$. Обычные конструкции всасывающих камер имеют значения коэффициентов потерь около $\xi = 0,4-0,5$.

Рабочее колесо является единственным элементом ступени, в котором происходит увеличение энергии газового потока: механическая энергия привода затрачивается на увеличение потенциальной и кинетической энергии газа и преодоление сопротивления течению. Целью всех проводившихся исследований рабочих колес, по существу, являлось установление связи между коэффициентом теоретической работы φ_{u2} и коэффициентом расхода φ_{r2} , установление закономерностей, связывающих политропный КПД с геометрией ступени и условным числом Маха по окружной скорости M_u , уточнение методов расчета $\beta_{тр}$ и $\beta_{пр}$. Систематические исследования в части модельных рабочих колес с пространственными лопатками позволяют повышать эффективность проточной части за счет повышения политропного КПД. В настоящее время на предприятии ЗАО «РЭПХ» разработаны и испытаны осерадиальные рабочие колеса (ОРК) с пространственными лопатками (рис. 3). Известно, что основными достоинствами проточных частей ЦК с ОРК являются: повышенная расходность, выражаемая коэффициентом расхода φ_{r2} , повышенная напорность, оцениваемая коэффициентом удельной работы Ψ . Благодаря этим качествам центробежные ступени с ОРК по сравнению с обычными ступенями с цилиндрическими

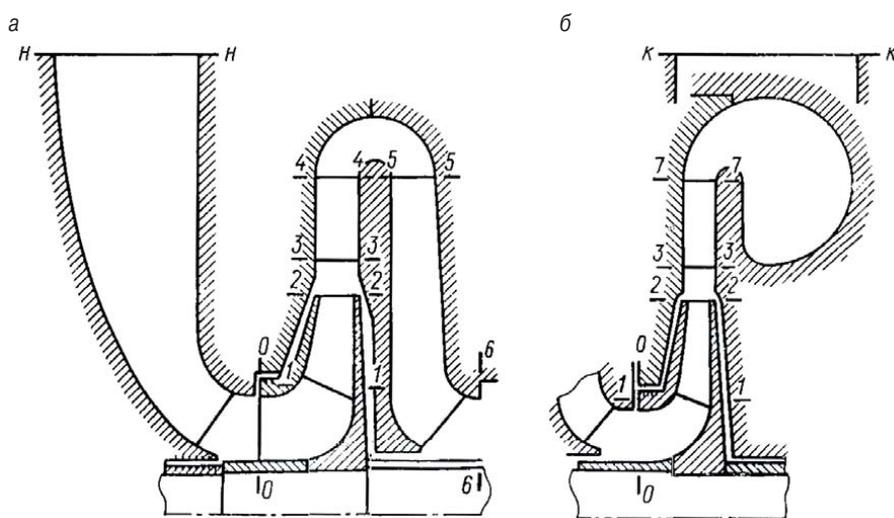


Рис. 1. Элементы проточной части промежуточной (а) и конечной (б) центробежной ступени:

$H-H$ – вход во всасывающую камеру; $0-0$ – вход в рабочее колесо; $1-1$ – вход в межлопаточные каналы рабочего колеса; $2-2$ – выход из рабочего колеса; $3-3$ – вход в межлопаточные каналы диффузора; $4-4$ – выход из диффузора; $5-5$ – вход в межлопаточные каналы обратного направляющего аппарата; $6-6$ – выход из обратного направляющего аппарата; $7-7$ – вход в выходную камеру; $к-к$ – выход из нагнетательного патрубка

РК при одних и тех же начальных условиях отличаются повышенной быстроходностью и существенно сниженными габаритами. Указанные преимущества ОРК привели в мировой практике к их широкому внедрению в стационарное центробежное компрессоростроение.

Следующим элементом проточной части ЦК, на котором проводились исследования и были достигнуты большие успехи,

является диффузор. Конструкция диффузора практически не оказывает влияния на мощность, потребляемую ступенью, и ее теоретический напор H . Однако тип диффузора существенно влияет на КПД ступени и протяженность ее зоны устойчивой работы. Выполненные исследования течения потока газа и потерь в диффузорах различного типа позволили установить влияние конструкции диффузора на КПД



Рис. 2. Экспериментальный стенд для модельных испытаний



Рис. 3. Модельные осерадialные рабочие колеса с пространственными лопатками

ступени и вскрыть причину более низких КПД в ступенях с безлопаточным диффузором (БЛД) и большей крутизны напорной характеристики при наличии лопаточного диффузора (ЛД). Компрессоры со ступенями с БЛД имеют ряд преимуществ: больше зона устойчивой и экономичной работы, дешевле и проще изготовление, не приходится опасаться износа направляющих лопаток диффузора при эксплуатации, более равномерное распределение давлений за рабочим колесом способствует уменьшению неуравновешенного усилия на ротор и повышению динамической прочности ротора, более устойчива работа при высоких числах Маха из-за отсутствия скачков уплотнения в диффузоре. Компрессоры со ступенями с ЛД обычно имеют повышенный политропный КПД по сравнению ЦК с БЛД, но менее устойчивую зону работы.

За диффузорами в промежуточной центробежной ступени стоит ОНА, следовательно, скорости потока перед ОНА невелики, однако потери энергии в ОНА соизмеримы с потерями в диффузорах или рабочих колесах. Около 40 % потерь в ОНА составляют потери в кольцевом колене, расположенном между диффузором и лопатками ОНА. Пути снижения этих потерь пока не ясны, хотя некоторые соображения по уменьшению зоны отрыва на выпуклой стороне кольцевого колена подтверждаются экспериментальными работами.

Наконец, последним элементом проточной части является выходная камера. Численное моделирование течения в спиральной камере представляет собой актуальную задачу [2]. Снижение потерь в спиральной камере обеспечивает повышение политропного КПД проточной части. В последние годы появились программы и вычислительные комплек-

сы, способные моделировать реальные течения в сложных областях при покрытии последних многоблочными сетками. Применение коммерческих программных пакетов, несомненно, позволит сократить временные и материальные затраты при проектировании новых или при модернизации уже существующих видов спиральных камер. Однако при применении коммерческих программ также возникает вопрос, насколько точно получаемое решение. Основные трудности на пути к численному моделированию течения связаны со сложностью явлений и многообразием факторов, формирующих пространственное турбулентное течение в геометрически сложной области. К их числу относятся входные условия, отрывы, развитие вихрей, вторичные течения, начальная турбулентность.

Полученные результаты исследовательской деятельности позволили осуществить разработку серийного центробежного компрессора в составе электроприводного газоперекачивающего агрегата (ЭГПА) нового поколения [3]. ЭГПА-4,0 эксплуатируется на КС Володино, КС Парабель, КС Чажемто и на других КС ООО «Газпром трансгаз Томск». Преимущество же ЭГПА в «сухом» исполнении очевидно: отсутствие маслосистемы с насосами и маслоохладителями; надежность конструкции уплотнений вследствие отсутствия контакта между парами трения; уменьшение механических потерь в 20–30 раз; повышенный КПД – до 89 %; применение частотно-регулируемого электропривода, отсутствие редуктора; полная автоматизация оборудования, применение малолюдных технологий; возможность дистанционного управления оборудованием компрессорной станции; соответствие современным экологическим требованиям. На ЭГПА-4,0 и ЭГПА-6,3

применены сухие газодинамические уплотнения (СГУ) и активные магнитные подшипники (АМП).

На предприятии ЗАО «РЭПХ» согласно плану ОАО «Газпром» проводится унификация ГПА, в составе которых поставляются унифицированные центробежные компрессоры мощностью 16, 25 и 32 МВт. Изготовлен ЦК 405-21-1С для унифицированного ГПА-16У с политропным КПД 87,5 % с рабочими колесами с пространственными лопатками.

Произведены унификация и стандартизация узлов и элементов проточной части центробежных компрессоров. Для создания унифицированного и высокоэффективного ЦК необходимо было разработать структуру и этапы проектирования и изготовления ЦК [4]. Создание высокоэффективного ЦК включает следующие этапы:

1) разработку принципиальной схемы проточной части центробежного компрессора на базе экспериментально-исследовательского опыта и расчетно-исследовательского анализа трехмерных течений газа;

2) моделирование характеристик ступеней и рабочих колес с пространственными лопатками. Научно-исследовательскую и конструкторскую работу по определению наилучших показателей эффективности модельных рабочих колес и отработку на экспериментальном стенде;

3) разработку и выпуск конструкторской документации;

4) изготовление опытного образца и испытание на стенде предприятия;

5) проведение приемочных испытаний на месте эксплуатации.

Таким образом, использование передовых технологий позволяет создать высокоэффективные компрессоры, которые конкурируют с зарубежными аналогами.

Список литературы

1. Ширманов В.М., Спиринов В.В., Чернин М.Е. и др. Перспективы развития турбокомпрессорного оборудования и электротехнических устройств в ЗАО «РЭПХ» // Компрессорная техника и пневматика. – 2011. – № 7. – С. 16–21.
2. Юн В.К., Карлин А.А. Численное моделирование трехмерного течения в спиральной камере на основе модели турбулентности k-epsilon // Техника и технология современного нефтехимического и нефтегазового производства: мат-лы 2-й науч.-техн. конф. аспирантов, магистрантов, студентов, творческой молодежи

профильных предприятий и организаций, учащихся старших классов, посвященной 70-летию ОмГТУ (Омск, 11 мая 2012 г.): в 2 кн. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2012. – Кн. II. – С. 189–194.

3. Каменев В.М., Фафинов М.А., Чернин М.Е. и др. Электроприводные газоперекачивающие агрегаты нового поколения производства ЗАО «РЭПХ» // Тез. докл. III междунар. конф. «Газотранспортные системы: настоящее и будущее». – М., 2009. – С. 23.
4. Юн В.К., Чернин М.Е. Разработка ряда проточных частей унифицированных центробежных компрессорных машин на базе аэродинамических схем // Компрессорная техника и пневматика. – 2010. – № 8. – С. 17–22.

Advanced technologies to benefit centrifugal compressor performance

Yun V.K. (Institute of power engineering industry and electrical engineering, RF, St. Petersburg)
E-mail: v.yun@reph.ru

This is a summary of main guidelines to centrifugal compressor design and manufacture, based on research into modelled impellers manufactured using advanced domestic engineering technologies. With a centrifugal compressor coming from REP Holding, we produced highly efficient flow parts which goal was achieved through greater polytropic efficiency. According to Gazprom's compressor part unification programme, it was possible to design and build a unified centrifugal compressor with 16 MW capacity and polytropic efficiency ranging 87–88% or higher. The unification implied the development of standardised flow elements, seal assemblies, and bearings. The chief advantage of such standardised centrifugal compressor comes from shorter fabrication time and smaller factory costs.

Keywords: bearings, seals, efficiency, centrifugal compressors, standardisation, gas compressor, electric drive.

References

1. Shirmanov V.M., Spirin V.V., Chernin M.E., Romanov A.A., Yun V.K., Yakovlev A.V. Perspektivy razvitiya turbokompressornogo oborudovaniya i elektrotekhnicheskikh ustroystv v ZAO «REPKh» [Prospects for the development of the turbo compressor equipment and electrotechnical devices in ZAO REPKh]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2011, no. 7, pp. 16–21.
2. Yun V.K., Karlin A.A. *Tekhnika i tekhnologiya sovremennogo neftekhimicheskogo i neftegazovogo proizvodstva: materialy 2-i nauch.-tekhn. konf. aspirantov, magistrantov, studentov, tvorcheskoi molodezhi profil'nykh predpriyatii i organizatsii, uchashchikhsya starshikh klassov, posvyashchennoi 70-letiyu OmGTU (Omsk, 11 maya 2012 g.): v 2 kn.* [Technique and technology of modern petrochemical and oil and gas industry: Materials of 2nd scientific and engineering conference of postgraduates, undergraduates, students, creative youth relevant enterprises and organizations, senior pupils, dedicated to 70th anniversary of OmSTU (Omsk, 11.05.2012). In 2 vols]. Omsk, OmGTU Publ., 2012, V. II, pp. 189–194.
3. Kamenev V.M., M.A. Fafinov, Chernin M.E., Shirmanov V.M., Yun V.K. *Tezisy dokladov. III mezhdunarodnaya konferentsiya «Gazotransportnye sistemy: nastoyashcheye i budushcheye»* [Theses of reports of the III International Conference "Gas Transportation Systems: Present and Future"]. Moscow, 2009. 23 p.
4. Yun V.K., Chernin M.E. *Razrabotka ryada protochnykh chastei unifikirovannykh tsentrobeznykh kompressornykh mashin na baze aerodinamicheskikh skhem* [Development of a number of flow parts of unified centrifugal compressor machines based on aerodynamic schemes]. *Kompressornaya tekhnika i pnevmatika*, 2010, no. 8 pp. 17–22.

13-я международная
специализированная
выставка



КРИОГЕН-ЭКСПО

Промышленные Газы

28-30 октября 2014

Москва, ЦВК «Экспоцентр», пав. 5



Проводится при содействии

- ▶ Международного института холода
- ▶ Международной академии холода
- ▶ Украинской ассоциации производителей технических газов «УА-СИГМА»



ТЕМАТИКА ВЫСТАВКИ

- Криогенное оборудование
- Воздухоразделительные установки
- Вакуумное оборудование
- Насосное, компрессорное и теплообменное оборудование
- Метрология и средства измерения при низких температурах
- Оборудование для хранения, транспортировки, распределения и потребления промышленных газов и СПГ
- Промышленные и редкие газы, СУГ, попутный нефтяной газ
- СПГ-технологии
- Водородные технологии
- Гелиевые технологии
- Производство CO₂
- Технологии генерации и использования озона
- Газовые смеси
- Микрокриогенная техника

Деловая программа:
28-30 октября 2014

11-я международная конференция «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития»
Международная конференция «Промышленные Газы»
Международная конференция «Сжиженный Природный Газ»

Международная конференция «Углекислотное оборудование»

Международная конференция «Актуальные проблемы в сфере безопасности производства, хранения и транспортировки промышленных газов»

Дирекция выставки:

Москва, пр-кт Андропова, д. 22
Тел/факс: +7 499 618 0565, +7 499 618 3688
E-mail: info@cryogen-expo.ru
Сайт: www.cryogen-expo.ru
Твиттер: @cryoexpo_ru
Канал на YouTube: youtube.com/user/cryoexpo