

Опыт проектирования, изготовления, отработки высокоэффективных сменных проточных частей для повышения эффективности магистральных газопроводов



За всю историю компрессорного направления ПАО НПО «Искра» специалистами предприятия было реализовано большое количество проектов, связанных с реконструкцией и модернизацией компрессорной техники. В данном направлении работ большой объем занимают проекты по производству сменных проточных частей (СПЧ) для центробежных компрессоров (ЦБК), основным назначением которых является повышение эксплуатационных характеристик ЦБК при фактических режимах работы компрессорных станций (КС).

На сегодняшний день на объектах ПАО «Газпром» эксплуатируется большое количество ГПА с центробежными компрессорами СМНПО им. М. В. Фрунзе (Украина), поставка которых осуществлялась еще в советское время.

В течение времени режимы работы газопровода постепенно менялись под влиянием различных факторов, что привело к неоптимальной работе компрессоров – снижению политропного КПД и повышению потребляемой мощности.

В номенклатуру ПАО НПО «Искра» входит несколько десятков произведенных сменных проточных частей для линейных и дожимных компрессоров, как собственного производства, так и для реконструкции компрессоров ведущих отечественных и зарубежных производителей. Первый опыт модернизации зарубежных компрессоров ПАО НПО «Искра» получило на КС «Кунгурская», КС «Ныдинская» и КС «Новокомсомольская» (табл. 1) при реконструкции компрессоров производства СМНПО им. М. В. Фрунзе на линейные компрессорные станции для ПАО «Газпром». Именно на этих СПЧ был решен ряд проблем работоспособности и заложены технические решения, позже реализованные в более поздних конструкциях компрессоров и СПЧ.

В представленных СПЧ были применены центробежные ступени, спроектированные по заданию с НПО «Искра» в 1998–2000 годах кафедрой «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» Санкт-Петербургского политехнического университета им. Петра Великого. Применение в конструкции безлопаточных диффузоров и оптимизация профиля лопаток рабочих колес позволили получить широкую зону экономичной работы СПЧ (с КПД более 80%), что дает ей возможность эффективно работать в

Таблица 1.

Наименование параметра	СПЧ-16/76-1,44	СПЧ-16/ 61-1,64	СПЧ-16/76-1,35	СПЧ-16/76-1,35
Компрессорная станция	Кунгурская	Ныдинская	Новокомсомольская	Бобровская
Рабочее давление, МПа	7,45	6,99	7,16	7,16
Политропный КПД, %	84	78	85	85
Отношение давлений	1,44	1,64	1,35	1,35
Производительность, млн. м³/сут.	32	24,6	38	38
Сдан в эксплуатацию, год	2000	2002	2000	2008 / 2009
Объем поставки, шт.	2	4	1	10

диапазоне степеней сжатия, где штатные компрессоры не эксплуатируются. Длительная эксплуатация на объектах заказчика показала высокую надежность и эффективность работы СПЧ в сравнении с заменяемыми проточными частями производства СМНПО им. М. В. Фрунзе.

На протяжении нескольких лет ООО «Газпром трансгаз Югорск» реализует комплексную программу замены штатных проточных частей в компрессорах НЦ-16/76-1,44 (производство СМНПО им. М. В. Фрунзе) на новые сменные проточные части в целях повышения эффективности работы ГПА и оптимизации параметров компрессоров на рабочих режимах. Испытания СПЧ проводились на стенде ПАО НПО «Искра».

В рамках данного проекта в 2015 году ООО «Газпром трансгаз Югорск» заключило договор на поставку комплектов СПЧ с АО «Искра-Авигаз» и изготовлено несколько единиц СПЧ с разными вариантами исполнения проточной части. Испытания СПЧ проводились на стенде ПАО НПО «Искра». Максимальное значение политропного КПД, достигнутое при испытаниях на КС, составило 85,5%.

В 2021 году в качестве поставщика 109 единиц СПЧ на те же параметры было выбрано ПАО НПО «Искра». В соответствии с исходными требованиями заказчика, для достижения экономической выгоды от реализации программы новая СПЧ-16/76-1,35-01 должна обладать политропным КПД не ниже 86...87%. Повышение КПД на 1...2% позволяет снизить потребляемую компрессором мощность на 2...4%, вследствие чего сокращается потребление топливного газа и расходы эксплуатирующей организации на собственные нужды.

Достижение нового уровня газодинамического совершенства конструкций и, соответственно, политропного КПД стало возможным благодаря применению специалистами НПО «Искра» в рабочих колесах лопаток пространственной формы и оптимизации проточной части в заданных габаритах компрессора (корпус и крышки использовались штатные). На сегодняшний день ПАО НПО «Искра» обладает современным программным обеспечением и станочным парком, что в связке с коллективом высококлассных специалистов, дает возможность находить эффективные технические решения и реализовывать их в «железе».

Современный уровень развития численных методов позволил НПО «Искра» выполнять все этапы проектирования центробежных ступеней вычислительной газодинамики (CFD).

При этом изначально, учитывая высокую планку по КПД СПЧ, рассматривались три возможных варианта исполнения СПЧ-16/76-1,35-01 для их применения в существующих компрессорах НЦ-16/76-1,44.

Вариант двухступенчатого исполнения с безлопаточным диффузором:

- Исходный вариант СПЧ, реализованный на первой партии и прошедший заводские испытания;
- Расчетная величина политропного КПД компрессора с этой СПЧ – 85...86%;
- СПЧ обладает пологой ГДХ.

Вариант трехступенчатого исполнения СПЧ-16/76-1,35 с безлопаточным диффузором:

- Наиболее эффективный вариант, позволяющий достичь значений политропного КПД до 87%;
- СПЧ обладает пологой ГДХ;

- Требуется глубокой модернизации компрессора с изготовлением новых крышек, в связи с чем, не рассматривался к реализации.

Вариант двухступенчатого исполнения СПЧ-16/76-1,35 с лопаточным диффузором второй ступени:

- Компромиссный вариант, позволивший достичь требуемых по ТЗ значений политропного КПД. Обладает более крутой характеристикой на краях (области максимальных и минимальных расходов газа) по сравнению с вариантом с БЛД;
- Политропный КПД компрессора с этой СПЧ – 85,5...86,5%.
Головные образцы СПЧ-16/76-1,35-01 были разработаны и изготовлены в двухступенчатой компоновке (рис. 1) с безлопаточными диффузорами и рабочими колесами с лопатками пространственной формы.



Рис. 1. Модель СПЧ-16/76-1,35-01

По результатам ПСИ головного образца СПЧ стало понятно, что при обеспечении расходно-напорной характеристики, требуемый уровень КПД достигнут не был.

Фактические значения политропного КПД ниже требований технического задания:

- по результатам ПСИ на 0,8...1,0%;
- по результатам на КС на 1,9...2,0%. >>>

Таблица 2. Результаты, полученные по итогу заводских приемо-сдаточных испытаний СПЧ-16/76-1,35-01 и испытаний на КС в составе ГПА:

Наименование параметра	Режимы								
	Номинальный			Зимний			Летний		
	Тех. задание	ПСИ	КС	Тех. задание	ПСИ	КС	Тех. задание	ПСИ	КС
Производительность объемная, приведенная к температуре 20°C и давлению 0,1013 МПа, млн м³/сут.	38,6			33,0			40,25		
Производительность объемная, приведенная к начальным условиям, м³/мин	435			399			435		
Давление газа на выходе, абсолютное, МПа	7,45			7,45			7,45		
Отношение давлений	1,35			1,44			1,30		
Мощность, потребляемая, не более, МВт	14,8	14,8	15,0	16,0	15,8	16,0	13,5	13,4	13,6
Политропный КПД, % не менее	86,0	85,0±1,2	84,1±1,7	84,5	84,5±0,9	83,3±1,6	85,5	84,8±1,3	83,9±1,6
Расчетная частота вращения ротора, об/мин	5200	5210	5140	5530	5520	5480	4960	4960	4890
Начальные условия									
Расчетная температура газа на входе, °C	15,0			15,0			15,0		
Давление газа на входе, абсолютное, МПа	5,521			5,175			5,732		

Ввиду того, что к моменту проведения испытаний и получения результатов, было изготовлено уже несколько десятков рабочих колес и диафрагм, пути оптимизации конструкции и увеличения КПД искали в рамках изготовленной материальной части для исключения заказа новых заготовок и как следствие значительного сдвига сроков изготовления и поставки.

Специалистам НПО «Искра» предстояло ответить на два вопроса – «почему» так получилось и «как» исправить.

Поскольку необходимо было найти незначительные потери КПД на элементах конструкции, которые в совокупности давали в пределах погрешности испытаний неудовлетворительный результат, то рассматривались все возможные причины.

Анализируя причины отклонения величины политропного КПД при ПСИ и на КС от требований ТЗ специалистами НПО «Искра» было отмечено, что условия испытаний на воздухе при ПСИ не позволяют имитировать условия эксплуатации, а именно:

1. При испытаниях на воздухе используется трубная обвязка не штатной конструкции (отсутствуют конфузор и диффузор на входе и выходе корпуса, места отбора давлений и температур также не соответствуют штатным);
2. Перед масляными уплотнениями на ПСИ вдувается буферный воздух, для исключения попадания масла в проточную часть. Фактический расход перекачиваемого газа при ПСИ больше, чем замерено по расходомерному узлу. Фактические ГДХ должны сдвигаться в сторону больших расходов.
3. Перегрев корпуса и внутреннего корпуса после проведения механических испытаний, влияющий на выходную температуру и, как следствие, на расчетную величину КПД.

При испытаниях на компрессорной станции к отклонению величины политропного КПД по сравнению с результатами ПСИ может привести следующее:

1. Фактические протечки через уплотнение думмиса в условиях эксплуатации значительно выше протечек через думмис при ПСИ;
2. Погрешности определения состава газа;
3. Погрешность определения параметров, в том числе вызванные нестабильностью режимов работы, условий работы агрегата, мест замера параметров;
4. Погрешность расчета и пересчета параметров.

Подробный разбор факторов, вызывающих отклонение газодинамических характеристик, полученных при испытаниях, от фактических характеристик выходит за рамки этой статьи.

В целом можно утверждать, что совокупное влияние представленных выше факторов приводит к тому, что полученные в ходе испытаний газодинамические характеристики и параметры работы СПЧ-16/76-1,35-01 отличаются от реальных (фактических). Несмотря на это, основной причиной «недобора» КПД при испытаниях следует признать конструктивное исполнение

проточной части СПЧ-16/76-1,35-01, определенное конструктивными ограничениями базового компрессора НЦ-16/76-1.44. Корпус компрессора НЦ-16/76-1.44 обладает «зажатыми» патрубками и неэффективными всасывающей и нагнетательной камерами, из-за конструкции крышек.

Для гарантированного выполнения требований технического задания наиболее эффективным, но радикальным в плане доработок вариантом, является переход на трехступенчатое исполнение проточной части СПЧ-16/76-1,35-01, которое в силу конструктивных особенностей обладает более высоким газодинамическим совершенством. Эксплуатация трехступенчатых центробежных компрессоров серии НЦ-16С/120 «Урал», НЦ-25ДКС «Урал» и НЦ-25М/120 «Урал», схожих по конструкции с СПЧ-16/76-1,35, показали высокий уровень политропного КПД – не менее 86...87%.

При очевидном преимуществе трехступенчатого исполнения СПЧ данный вариант не был реализован в силу того, что он требует более глубокой модернизации компрессора, включающей замену крышек, а также доработку корпуса (в идеале изготовление нового) в части диаметров проходного сечения патрубков до размеров не менее 500 мм.

В итоговом решении по доработке СПЧ оставлен вариант двухступенчатого исполнения СПЧ-16/76-1,35-01 без изменения конструкции (геометрии) рабочих колес.

Таблица 3. Доработки, реализованные для повышения газодинамической эффективности СПЧ:

Дорабатываемый элемент	Суть доработки	Ожидаемый прирост КПД
Камера всасывающая	Установка дополнительных ребер в камере, всасывающей для снижения коэффициента потерь и организации более равномерного потока на входе в РК	0,1%
Диффузор первой ступени	Изменение профиля диффузора первой ступени	0,1%
Дополнительная лабиринтная втулка	Установка дополнительной лабиринтной втулки на внутреннюю поверхность думмиса с целью снижения протечек через уравнительную линию ЦБК	0,42..0,5% Эффект достигается на КС при рабочем давлении газа на входе в компрессор. При испытаниях на воздушном стенде эффект минимальный
Диффузор второй ступени	Установка в диффузор второй ступени лопаточного аппарата	0,4..0,5%

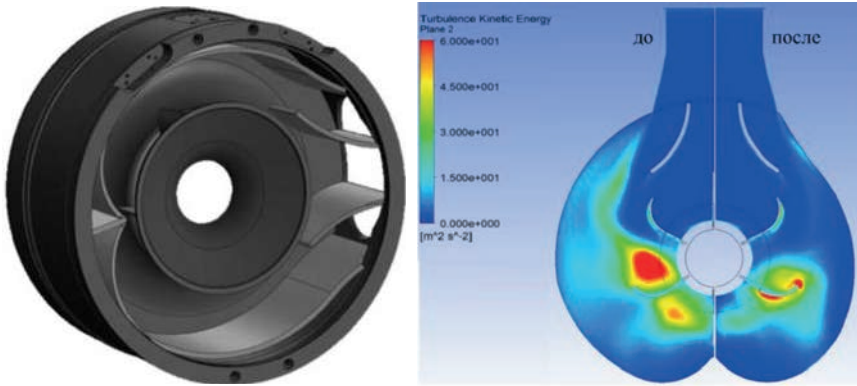


Рис. 2. Установка дополнительных ребер в камере всасывающей и результаты расчетов исходной и оптимизированной геометрии

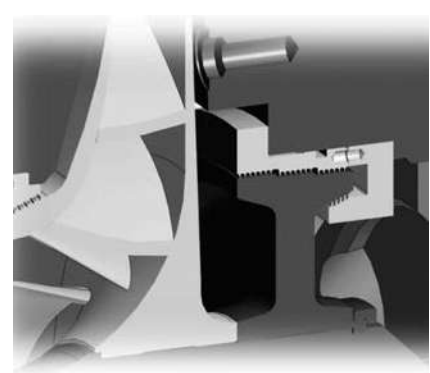


Рис. 3. Доработка думмисной втулки

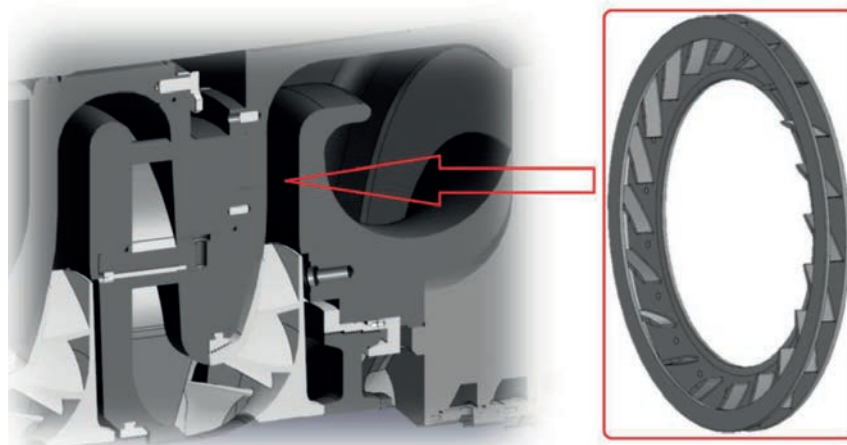


Рис. 4. Ведение лопаточного диффузора на второй (концевой) ступени

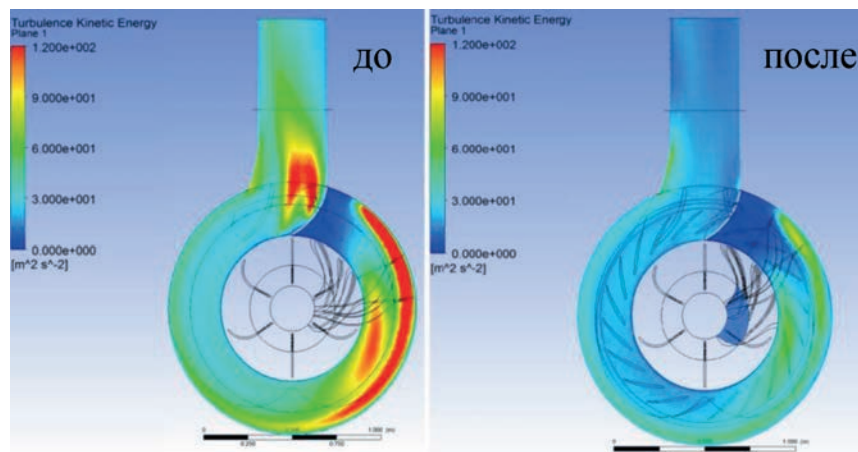


Рис. 5. Области с возмущенным потоком газа в статорных элементах второй ступени



Повторные испытания СПЧ-16/76-1,35-01 на заводском воздушном стенде и на КС в составе ГПА показали высокую эффективность выполненных доработок. Все заявленные в ТЗ параметры работы СПЧ были достигнуты.

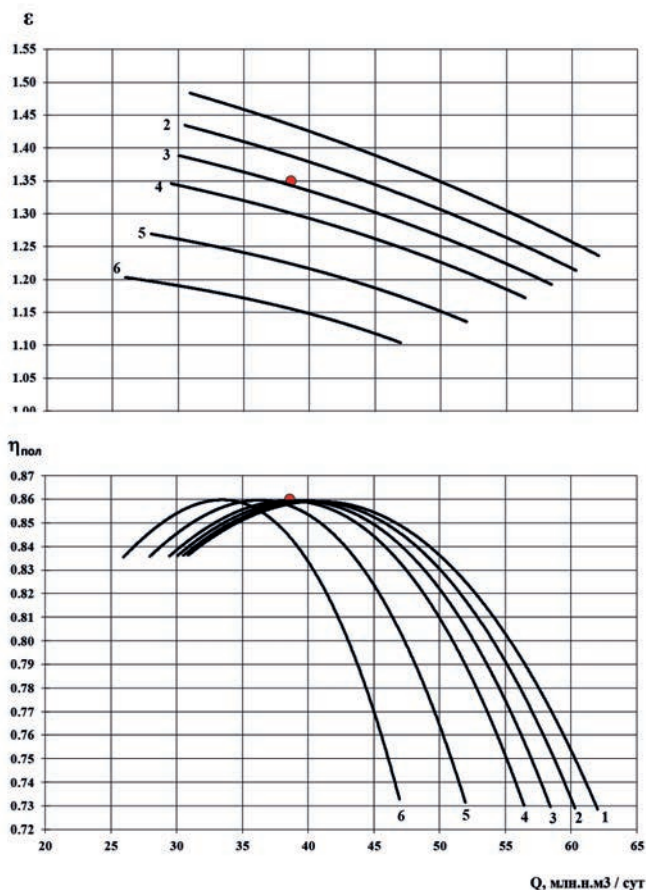


Рис. 6. Газодинамические характеристики доработанного СПЧ-16/76-1,35-01 производства НПО «Искра» по итогам испытаний на КС

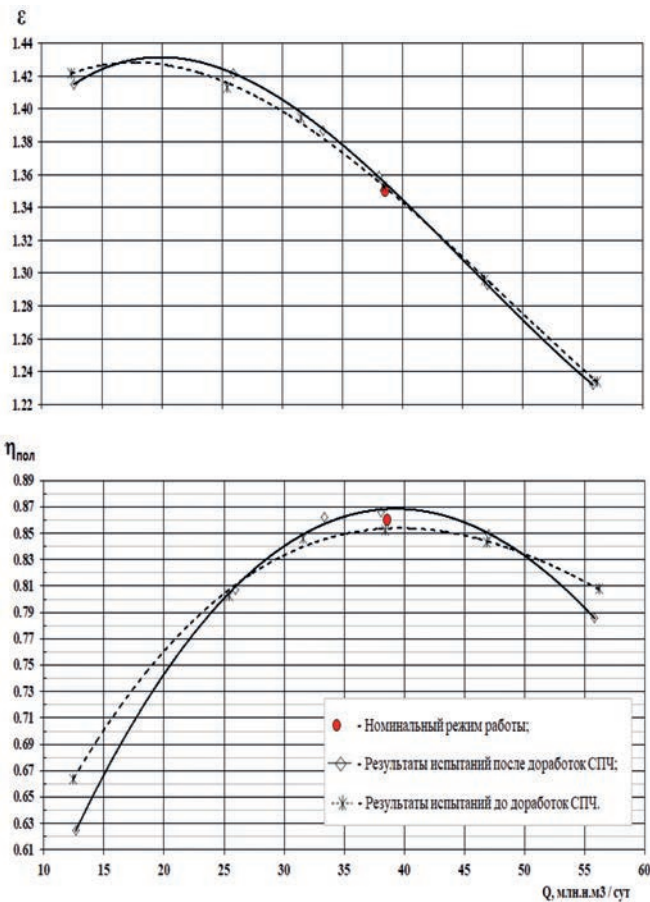


Рис. 7. Сравнение газодинамических характеристик до и после доработки СПЧ-16/76-1,35-01, полученных при испытаниях на воздухе

при $T_n=15^\circ\text{C}$; $P_k=7,45$ МПа; $R=509,8$ Дж/(кг·К); ρ при 20°C и $101,3$ кПа= $0,679$ кг/м³; $z=0,896$;
 1 – 5565 об/мин; 2 – 5300 об/мин; 3 – 5035 об/мин;
 4 – 4770 об/мин; 5 – 4240 об/мин; 6 – 3710 об/мин.

- – номинальный режим работы;
- Q – производительность коммерческая, приведенная к температуре 20°C и давлению $101,3$ кПа;
- ε – отношение давлений;
- N – потребляемая мощность;
- $\eta_{\text{пол}}$ – КПД политропный.

На сегодняшний день ПАО НПО «Искра» изготовлено и введено в эксплуатацию несколько десятков СПЧ-16/76-1,35-01. Каждая поставляемая СПЧ подвергается эксплуатационным испытаниям в составе ГПА (включая газодинамические испытания). Средний уровень политропного КПД СПЧ на номинальном режиме работы составляет 86,0%. Максимальные значения КПД, зафиксированные во время испытаний, составляют 87,2...87,3%, что является наилучшим для этого типа СПЧ для всех производителей.

Научный потенциал ПАО НПО «Искра» в области создания компрессорного оборудования позволяет решать задачи Заказчика любой сложности. Полученный специалистами опыт уже сейчас применяется при модернизации компрессоров General Electric, Siemens, Dresser Rand, Thermodyne и др. производителей на объектах нефтегазовых компаний.



ПАО НПО «Искра»
 614038, Пермь, ул. Академика Веденеева, 28
 тел. (342) 262-72-72, 262-71-72
 e-mail: info@npoiskra.ru
<https://npoiskra.ru>