

УДК 621.515  
doi:10.18720/SPBPU/2/id18-100

**Любимов Александр Николаевич**

Кандидат технических наук, начальник отдела перспективных разработок и проектирования  
liubimov@entechmach.com

**Чеглаков Иван Владимирович**

Специалист по компрессорным машинам  
cheglakov@entechmach.com

**Неверов Владимир Валерьевич**

Специалист по компрессорным машинам  
neverov@entechmach.com

**Райков Алексей Андреевич**

Специалист по компрессорным машинам  
raikov@entechmach.com

*ООО НПФ «ЭНТЕХМАШ» Санкт-Петербург, Россия*

## **МОДЕРНИЗАЦИЯ ВОЗДУШНЫХ ЦЕНТРОБЕЖНЫХ КОМПРЕССОРОВ**

Аннотация. Воздушные центробежные компрессоры находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Они выполняют как общие задачи – снабжение предприятия сжатым промышленным воздухом для внутренних нужд, так и специфические – подача сжатого воздуха для различных технологических процессов (производство аммиака, воздухоразделение, доменное дутье). Со временем происходит износ деталей агрегата в связи с длительной эксплуатацией, увеличиваются протечки и перетечки воздуха, не обеспечиваются паспортные параметры, а показатели не соответствуют современному уровню энергоэффективности. Параллельно с этим зачастую возникает потребность в изменении параметров назначения машин данного типа: повышение производительности, изменение конечного давления и пр. В данном случае одним из путей решения вышеуказанных проблем является модернизация компрессора. В 2017 году НПФ «ЭНТЕХМАШ» успешно провела модернизацию компрессора типа K500-61-1 и трех компрессоров типа K1500-62-2. Оба типа машин работают в составе воздухоразделительной установки на предприятиях химической и металлургической промышленности. Задачей модернизации стояло существенное увеличение производительности компрессоров на 12% при сохранении штатных корпусов.

Актуальной проблемой при модернизации являлась задача проектирования первой ступени компрессора, которая определяет пропускную способность компрессора. Решение заключалось в применении методов вычислительной газодинамики с одновременной конструкторской проработкой, выходящей за рамки классического подхода к проектированию рабочих колес. В результате проведенных работ были достигнуты заявленные результаты, а именно повышена производительность и энергоэффективность агрегатов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Центробежный компрессор, воздухоразделительная установка, модернизация, проточная часть, повышение производительности, энергоэффективность, вычислительная гидродинамика.

**Lyubimov, Alexander N.**

Candidate of Engineering Sciences, Head of Advanced Development and Design  
liubimov@entechmach.com

**Cheglakov Ivan V.**

Compressor Specialist  
cheglakov@entechmach.com

**Neverov Vladimir V.**

Compressor Specialist  
neverov@entechmach.com

**Raykov Alexey A.**

Compressor Specialist  
raikov@entechmach.com

*ООО НПФ «ENTECHMASH», Saint Petersburg, Russia*

## **AIR CENTRIFUGAL COMPRESSORS MODERNIZATION**

**Annotation.** Centrifugal air compressors are widely used in many industries. They perform both General tasks – supply of the enterprise with compressed industrial air for internal needs, and specific – supply of compressed air for various technological processes (production of ammonia, air separation, blast-furnace blowing). Over the time, the wear Assembly in connection with long-term operation, the increase of the air leak, is not provided with the passport settings, and indicators do not meet modern standards of energy efficiency. In parallel with this there is often a need to change the parameters of this type machines: performance, outlet pressure, etc. In this case, one of the solutions to the above problems is the modernization of the compressor.

In 2017, NPF “ENTECHMASH” successfully upgraded the compressor type K500-61-1 and three compressors type K1500-62-2. Both types of machines work as a part of the air separation unit in the chemical and metallurgical industries. The task of modernization was significant increase in compressor capacity by 12% while maintaining the regular buildings.

An urgent problem in the modernization was the problem of designing the compressor first stage, which determines the capacity of the compressor. The solution was to use computational gas dynamics methods with simultaneous design development that went beyond the classical approach to the design of impellers.

As a result of the work, the declared results were achieved, increased productivity and energy efficiency of the units.

**Keyword:** Centrifugal compressor, air separation unit, modernization, flowing part, productivity improvement, energy efficiency, computational fluid dynamics.

Воздушные центробежные компрессоры находят широкое применение во многих отраслях промышленности. Они выполняют как общие задачи – снабжение предприятия сжатым промышленным воздухом для внутренних нужд, так и специфические – подача сжатого воздуха для различных технологических процессов (производство аммиака, воздухоразделение, доменное дутье). Со временем происходит износ деталей агрегата в связи с длительной эксплуатацией, увеличиваются протечки и перетечки воздуха, не обеспечиваются паспортные параметры, а показатели не соответствуют современному уровню энергоэффективности. Параллельно с этим зачастую возникает потребность в изменении параметров назначения машин данного типа: повышение производительности, изменение конечного давления и пр. В данном случае одним из путей решения вышеуказанных проблем является модернизация компрессора [1, 2].

В 2017 году НПФ «ЭНТЕХМАШ» успешно провела модернизацию компрессора типа К500-61-1 и трех компрессоров типа К1500-62-2. Оба типа машин работают в составе воздухоразделительных установок на предприятиях химической и металлургической промышленности. Модернизация компрессоров производилась с целью повышения их производительности на ~12-18%. Весьма существенное форсирование компрессоров по производительности при условии сохранения штатных корпусов и электродвигателей достигается благодаря совершенствованию проточной части компрессора. Для обеспечения заданных параметров изготовлены новые роторы, диффузоры, диафрагмы. Новые проточные части устанавливаются в штатные корпуса.

Далее приведено более детальное описание модернизаций и преодоления возникших трудностей с помощью нестандартных технических решений.

### Компрессор типа К500-61-1

Турбокомпрессорный агрегат (центробежный компрессор типа К500-61-1 с приводным электродвигателем, мультипликатором и вспомогательным оборудованием) предназначен для сжатия и подачи воздуха промышленного назначения. Компрессор выполнен одноцилиндровым, трехсекционным. Каждая секция состоит из 2-х ступеней сжатия. Воздух после каждой секции охлаждается в промежуточном охладителе водяного типа. Для охлаждения воздуха после компрессора предназначен концевой воздухоохладитель. Все первые ступени секций выполнены с канальными диафрагмами (КД). Концевая ступень 1-й секции выполнена с лопаточным диффузором (ЛД), а концевые ступени 2-й и 3-й секции выполнены бездиффузорными. Концевые ступени всех секций имеют сборные камеры переменного сечения (улитки). Привод компрессора – синхронный электродвигатель типа СТД-3150-23УХЛ4» номинальной мощностью 3,15 МВт и частотой вращения  $n=3000$  об/мин. Мультипликатор типа РЦОТ-350-2,55-1К повышает частоту вращения до 7625 об/мин. Схема и фотография агрегата представлены на рисунках 1 и 2.

Перед фирмой НПФ «ЭНТЕХМАШ» была поставлена задача провести модернизацию компрессора типа К-500-61-1 в соответствии с целями:

- повышение производительности компрессора (на ~12% относительно проектной);
- снижение конечного давления (с 9 до 6,8 кгс/см<sup>2</sup> абс);
- повышения энергоэффективности.

Параметры компрессора до и после модернизации приведены в таблице 1. Из таблицы видно, что модернизированная проточная часть спроектирована с целью обеспечения необходимых параметров компрессора при меньшем давлении всасывания (0,97 против 1,0 кгс/см<sup>2</sup> абс.) и при летнем режиме работы, являющимся

наиболее тяжелым, с начальной температурой всасывания 35°C.

При проведении модернизаций компрессоров фирмой НПФ «ЭНТЕХМАШ» учитывается целесообразность и готовность Заказчика к объему вносимых изменений в проточную часть. В некоторых случаях модернизация компрессорных машин может производиться за счет частичной замены проточной части – например, модернизация ротора компрес-

сора с сохранением существующих статорных элементов или наоборот. Даже в таком случае параметры компрессора могут быть изменены и увеличены, но, как следствие, с несущественным компромиссным повышением энергоэффективности. Такой вид модернизации снижает объем поставки, что ведет к снижению стоимости продукции, и обеспечивает технологию Заказчика необходимыми параметрами газа.

Электродвигатель

Компрессор

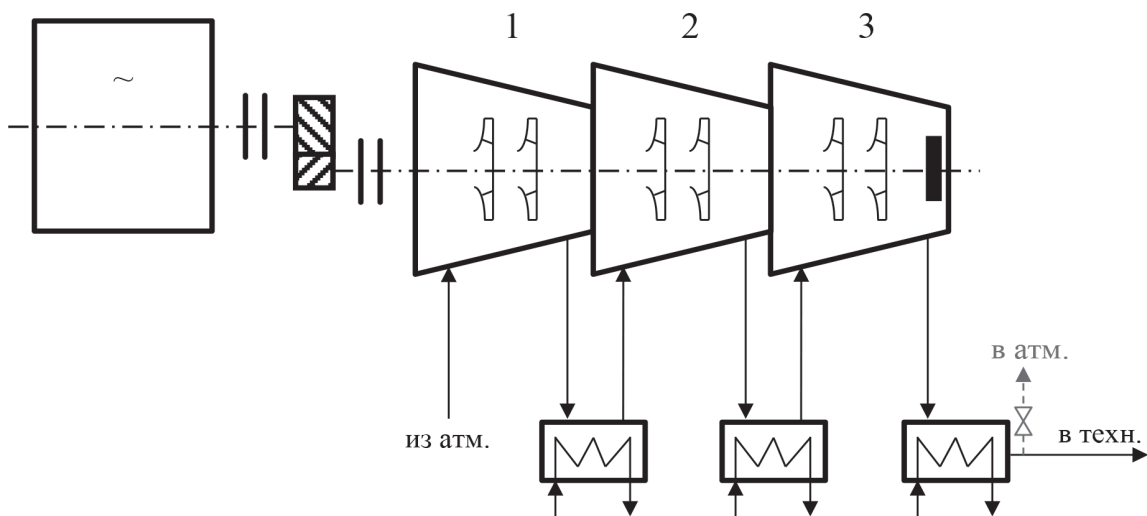


Рис. 1. Схема агрегата К500-61-1

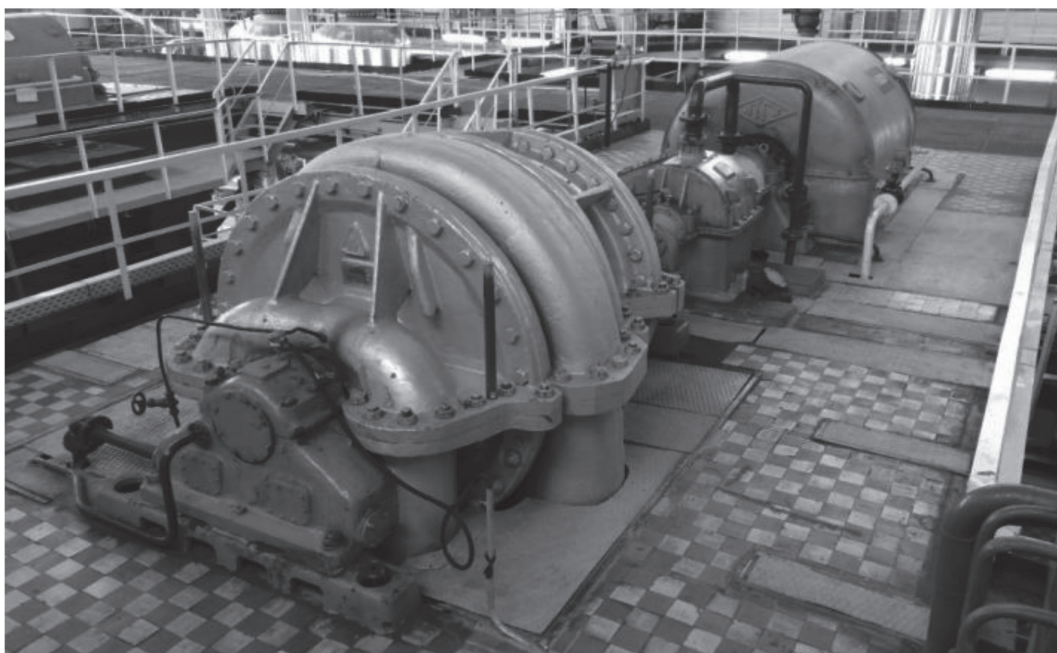


Рис. 2. Центробежная компрессорная машина К500-61-1

Таблица 1.

Название	Штатный компрессор	Модерниз. компрессор
Производительность на всасывании $Q_g$ при 20°C, 1 физ. атм., $\text{нм}^3/\text{ч}$	30480	33800
Объемная производительность на всасывании при начальных параметрах, $\text{м}^3/\text{мин}$	525	635
Начальное давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$ абс.	1,0	0,97
Конечное давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$ абс.	9,0	6,8
Начальные температуры на входе в секции, °C	20; 40; 40	35; 45; 45
Частота вращения ротора, об/мин	7625	7625
Потребляемая мощность, МВт	3,0	3,25

Также могут быть предложены варианты поэтапной модернизации, которая заключается в последовательной замене элементов компрессора для обеспечения целевых параметров компрессора с наибольшей энергоэффективностью на каждом этапе. Зачастую осуществляется модернизация по схемам – замена ротора с последующей заменой статорных элементов или посекционная и покорпусная модернизация компрессора. В этом случае модернизацию компрессора можно выполнять в течении нескольких лет, разрезая финансовые затраты на модернизацию и при этом получая существенную прибавку в выработке продукции уже на первом этапе. На последующих этапах параметры компрессора могут далее повышаться, а также достигается наиболее экономичная работа компрессорного агрегата в целом за счет согласования работы всех элементов. Такой вариант модернизации имеет еще одно преимущество – если по тем или иным причинам в процессе модернизации изменяются технологические параметры производства, то существует возможность с наименьшими возможными потерями в эффективности компрессора скорректировать за счет промежуточных этапов итоговые рабочие параметры.

Модернизации компрессора типа K500-61-1 выполнялась с учетом пожеланий Заказчика о сохранении штатных канальных диафрагм 2-й и 3-й. Замена канальных диафрагм 1-й секции являлась необходимым условием для достижения параметров модернизированного компрессора.

Первая ступень 1-й секции модернизированного компрессора выполнена с БЛД вместо КД, что позволяет увеличить диапазон устойчивой работы компрессора, а концевая ступень – с ЛД. Ступени 2-й и 3-й секции выполнены со штатными КД. Ротор выполняется с РК радиального типа высокой напорности в 1-й секции и низкой напорности во 2-й и 3-й секциях с загнутыми назад цилиндрическими лопатками, описанными дугой круга.

Модернизация компрессоров в штатных корпусах с значительным форсированием параметров работы зачастую сопровождается инженерными трудностями, такими как – ограничение в габаритных размерах ступеней, неудобные для проведения модернизации конструкторские решения штатного корпуса компрессора, повышение проектного расхода повышает уровень скоростей потока в трубопроводах и проточной части компрессора. Это ведет к необходимости применения

сложных и нестандартных технических решений. Такие решения постоянно разрабатываются инженерным составом фирмы и применяются при модернизации машин, обеспечивая необходимые параметры Заказчика и позволяя избежать дорогостоящей покупки нового компрессорного агрегата.

**Оптимизация проточной части 1-й секции компрессора типа К500-61-1 при помощи моделирования пространственного течения**

Актуальной проблемой при модернизации компрессора типа К500-61-1 являлась задача проектирования первой ступени компрессора, которая определяет пропускную способность компрессора. Ограничивающий фактор для проектирования 1-й ступени на заданные параметры – недостаток осевого пространства. Следствием являются повышенные числа Маха  $M_{w1} \approx 0,67$  на входе в РК, что является причиной скорого звукового запыриания каналов РК и совместно с ЛД – малого диапазона устойчивой работы.

Решение данной проблемы заключалось в применении методов вычислительной газодинамики [3] с конструкторской проработкой, выходящей за рамки классического подхода к проектированию РК.

Эскизная новая 1-я ступень 1-й секции с зауженным БЛД получена расчетом по методикам [4] и [5], входная кромка РК очерчена прямой линией, покрывающий диск выполнен по конусу. Использование БЛД (как менее габаритного элемента взамен относительно расширенного ЛД) позволило сдвинуть РК на валу в сторону нагнетания, увеличить угол наклона покрывающего диска  $\Theta$  и ширину на входе  $b_1$ , тем самым снизить число Маха  $M_{w1}$  до 0,57. Эскизно спроектированная по классическим методикам ступень рассчитана в программном комплексе вычислительной газодинамики «Numeca Fine/Turbo». Как результат расчета – раннее звуковое запыриание, имеющее место в штатном компрессоре при повышенном расходе, было ликвидировано, но наблюдалась об-

ширная отрывная зона на нерабочей стороне лопатки (синяя зона на рисунке 3а) и, как одно из следствий, ранняя потеря устойчивости компрессора. На рисунке 4 – распределение относительных скоростей на выходе из РК, видна повышенная неравномерность потока.

Для уменьшения отрывной зоны, повышения КПД и увеличения диапазона работы была проведена оптимизация РК первой ступени. В качестве инструмента совершенствования РК использована программа многопараметрической и многокритериальной оптимизации Numeca «Design 3D», построенная на моделировании пространственного вязкого течения. Данный расчетный метод целевым перебором вариантов различных геометрий позволяет найти оптимальный, удовлетворяющий всем указанным выше критериям.

Оптимизация проводилась в несколько этапов (рисунок 3):

1. Исходное РК, спроектированное по классическим методикам (рисунок 3а);
2. Совершенствование меридионального контура покрывающего диска;

На распределение скоростей в РК оказывает существенное влияние покрывающий диск. С помощью обеспечения наилучшего распределения скоростей в межлопаточном канале можно добиться ощутимого снижения потерь и повышения КПД, особенно в случае наличия развитого отрывного течения на покрывающем диске. По результатам расчета размер зоны отрыва потока уменьшен (рисунок 3б).

3. Улучшенный вариант с вогнутым контуром покрывающего диска и выпуклой входной кромкой лопаток;

Вторым этапом проведено сравнение влияния формы входной кромки в меридиональной проекции на изменение полного политропного КПД РК  $\eta^*_{РК}$  (рисунок 3в). В одной модели кромка выполнена по прямой линии, во второй – по радиусу. Полный политропный КПД  $\eta^*_{пол}$  варианта с выпуклой входной кромкой

оказался на 2,3% выше, отношение давлений возросло на 2,5%.

4. Окончательный вариант с вогнутым контуром покрывающего диска и выпуклой входной кромкой лопаток.

Окончательное профилирование покрывающего диска РК дало прирост  $\eta^*_{пол}$  на 0,3%. Уменьшилась зона отрыва потока с лопаток и улучшилась равномерность потока на выходе из РК (рисунок 3г).

На рисунке 4 также показано сравнение оригинального меридионального контура РК: исходный вариант РК (красные линии) и окончательный вариант РК (синие линии). Результаты расчетов подтверждают заложенный политропный КПД 1-й секции на уровне 83...84%, а также напорность и расходность секции.

По результатам проведенных приемочных испытаний модернизированно-

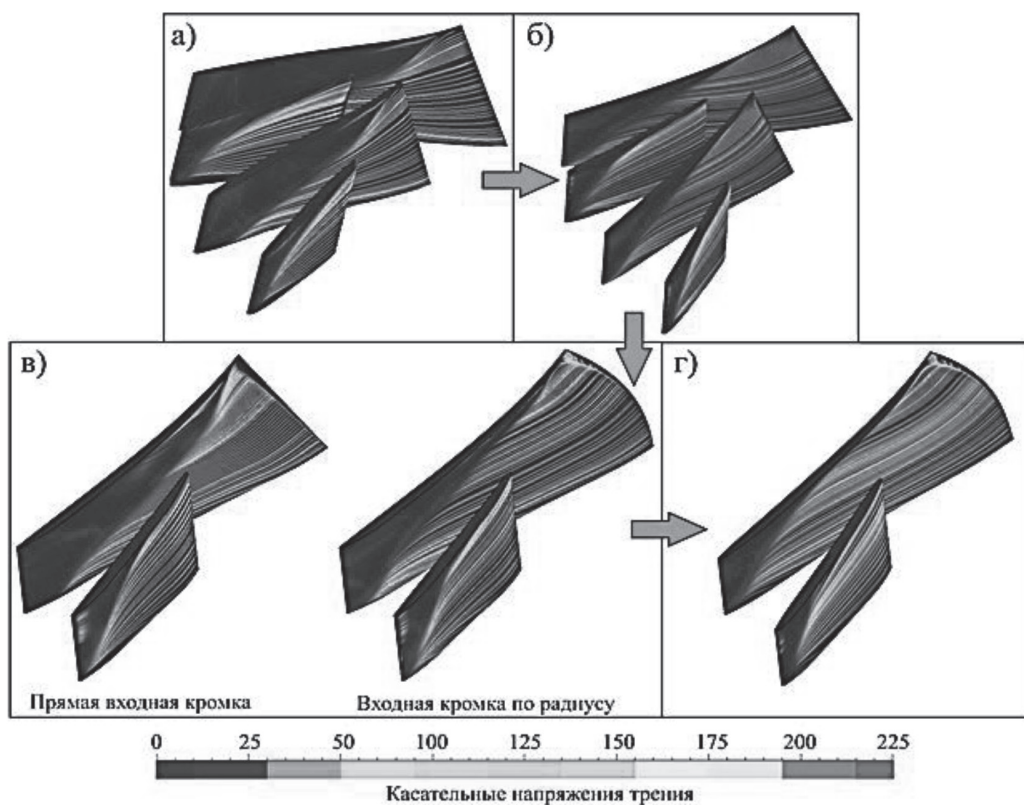


Рис. 3. Изменение касательных напряжений на этапах оптимизации РК

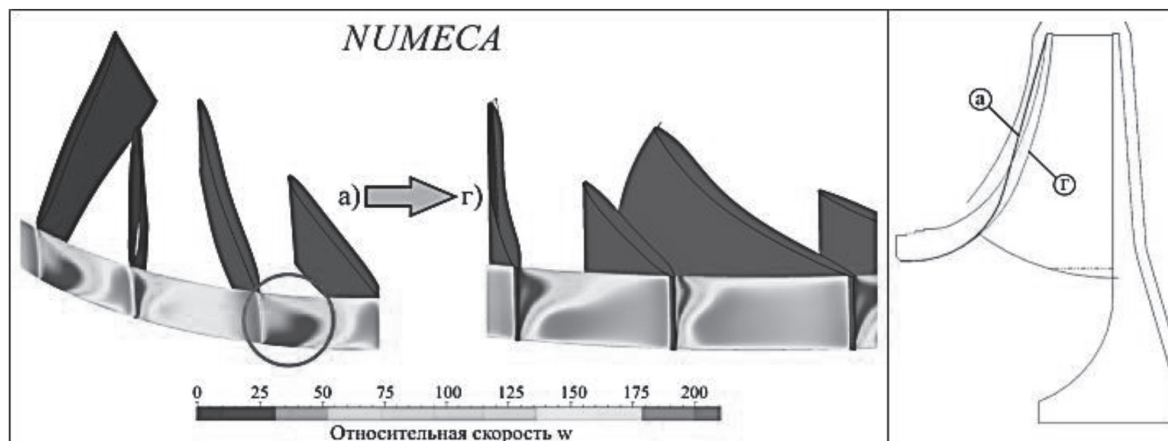


Рис. 4. Сравнение неравномерности потока и меридионального сечения исходного (1) и оптимизированного РК (4)

го компрессора подтверждены гарантийные параметры. Потребляемая мощность компрессора на гарантийном режиме работы составляет ~3,2 МВт. Энергоэффективность в результате модернизации достигнута, получены благодарственные отзывы от Заказчика.

#### Компрессор типа К1500-62-2

Турбокомпрессорный агрегат (центробежный компрессор типа К1500-62-2 с приводным электродвигателем, мультипликатором и вспомогательным оборудованием) предназначен для сжатия и подачи воздуха в воздухоразделительную

установку (ВРУ). Компрессор выполнен одноцилиндровым, трехсекционным. Секции расположены по «последовательной» аэродинамической схеме. Каждая секция состоит из 2-х ступеней сжатия. Воздух после каждой секции охлаждается в промежуточном охладителе водяного типа. Первая секция компрессора выполнена с ЛД. Первые ступени 2-й и 3-й секций выполнены с КД, а концевые выполнены бездиффузорными. Привод компрессора – синхронный электродвигатель типа СТД-10000-2У4 номинальной мощностью 10 МВт и частотой вращения  $n=3000$  об/мин. Мультипликатор типа

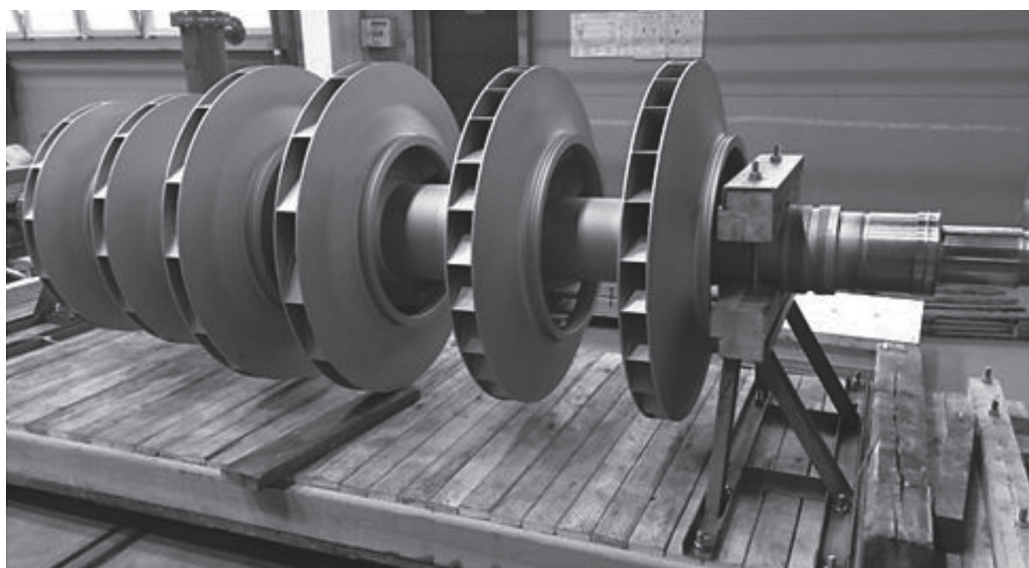


Рис. 5. Ротор модернизированного компрессора

Таблица 2.

Название	Штатный компрессор	Модерниз компрессор
Производительность на всасывании $Q_g$ при 20°C, 1 физ. атм., $\text{нм}^3/\text{ч}$	88800	101500
Объемная производительность на всасывании при начальных параметрах, $\text{м}^3/\text{мин}$	1590	1800
Начальное давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$ абс.	0,979	0,97
Конечное давление, $\text{кгс}/\text{см}^2$ абс.	7,5	7,5
Начальные температуры на входе в секции, °C	20; 32; 32	20; 40; 45
Частота вращения ротора, об/мин	4479	4553
Потребляемая мощность, МВт	7,7	9,37



P-8000/1,49 повышает частоту вращения до 4470 об/мин. Схема агрегата аналогична компрессору поз. K500-61-1 и приведена на рисунке 1.

Целями модернизации компрессора K1500-62-2 ставились: повышение производительности (на ~15% относительно проектной) и повышение энергоэффективности. Сравнение параметров штатного и модернизированного компрессоров приведено в таблице 2.

Повышение производительности компрессора выполняется за счёт модернизации ПЧ компрессора в существующем корпусе. Первая ступень 1-й секции модернизированного компрессора выполнена с БЛД вместо ЛД, а концевая – с ЛД. Ступени 2-й и 3-й секций выполнены со штатными КД. Ротор выполняется с РК радиального типа (рисунок 5). Зубчатая пара мультипликатора заменяется на но-

вую с повышенным передаточным отношением  $i=1,52$ .

Проточная часть 1-й секции выполнена по аналогии с 1-й секцией компрессора K500-61-1, которая была отработана с помощью ПО «Numeca Fine/Turbo» и оптимизирована с помощью Numeca «Design 3D».

### Заключение

В результате проведенных работ по модернизации компрессоров типа K500-61-1 и K1500-62-2 были достигнуты параметры назначения, а именно повышена производительность и энергоэффективность агрегатов. Специалистами НПФ «ЭНТЕХМАШ» в ходе приемочных испытаний получены опытные данные по работе высокорасходных ступеней, которые позволяют проводить работы по модернизации компрессоров различного назначения с существенным повышением производительности.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Семаков А.В., Евдокимов В.Е., Репринцев А.И., Любимов А.Н.** Новые технические решения по модернизации турбокомпрессоров аммиачного производства // Компрессорная техника и пневматика – 2014. – № 3. – С. 2-10

2. **Семаков А.В., Евдокимов В.Е., Репринцев А.И., Любимов А.Н.** Модернизация центробежных компрессоров на азотных производствах // Компрессорная техника и пневматика – 2013. – № 3. – С. 20-22

3. URL: <https://www.numeca.com/product/fineturbo>

4. **Рис В.Ф.** Центробежные компрессорные машины. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1981. – 3 : 351 с.

5. **Ден Г.Н.** Проектирование проточной части центробежных компрессоров. – Ленинград: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1980. – 232 с.