

## ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА УГЛА УСТАНОВКИ ВХОДНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАГНЕТАТЕЛЯ

М.В. Крутиков, студент,  
e-mail: [michail.krutikov2809@mail.ru](mailto:michail.krutikov2809@mail.ru)  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»

В.Л. Блинов, канд. техн. наук, доц.,  
e-mail: [v.l.blinov@urfu.ru](mailto:v.l.blinov@urfu.ru)  
ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет»

В настоящей работе рассмотрено влияние поворота входного направляющего аппарата на параметры работы центробежного нагнетателя природного газа с применением методов вычислительной газовой динамики. Построена численная модель исследуемого объекта, проведена серия расчетов и представлены полученные результаты. Создание численной модели базировалось на результатах проведенного трехмерного сканирования. Расчеты проведены на основе верифицированной модели. Результаты осуществленного численного моделирования выражены в виде полиномиальных линий тренда исследуемых параметров для номинального режима работы объекта исследования. С использованием полученных данных предложен способ выбора угла установки лопаток входного направляющего аппарата центробежного нагнетателя природного газа в условиях эксплуатации. Предложенный способ представляет из себя последовательность действий, которые можно разделить на пять этапов.

**Ключевые слова:** *центробежный нагнетатель, входной направляющий аппарат, регулирование, численное моделирование*

### ВВЕДЕНИЕ

Центробежные нагнетатели (ЦБН) представляют собой оборудование, входящее в группу компрессоров динамического типа с радиальной конструкцией. Благодаря их устройству они могут использоваться при интенсивной эксплуатации в промышленных масштабах – в энергетике, нефтеперерабатывающей отрасли, металлообработке и других сферах деятельности.

Особо широкое обращение ЦБН нашлось на газоперекачивающих станциях отечественной газотранспортной системы (ГТС). Большинство из них спроектировано и введено в эксплуатацию до 90-х годов предыдущего столетия. В связи с постепенным изменением направлений и объемов транспорта газа, а также развитием новых технологий проектирования и изготовления оборудования данного класса, возникает необходимость в модернизации проточных частей ЦБН или адаптации существующих конструкций к новым режимам работы ГТС [1]. Некоторые типы ЦБН оснащены входным направляющим аппаратом (ВНА) с возможностью перестановки положения лопаток в периоды остановки оборудования. Использование регулируемого ВНА позволяет закручивать поток на входе в рабочее колесо ЦБН по направлению вращения или против него, тем самым изменяя основные параметры нагнетателя, такие как напор, расход и степень сжатия [2]. Таким образом, за счет обоснованного выбора угла установки лопаток ВНА можно оказать благоприятное влияние на режим работы оборудования в новых условиях.

## ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объекта исследования выбран ЦБН типа RF-2ВВ-36 «Крезолуар» [2]. Нагнетатель состоит из двух ступеней с рабочими колесами (РК) закрытого типа и лопаточными диффузорами (ЛД) (рис. 1). ЦБН оборудован настраиваемым входным направляющим аппаратом первой ступени, состоящим из 12 поворотных лопаток с настраиваемым углом поворота. Особенностью конструкции данного ЦБН является то, что регулирование положения лопаток ВНА возможно осуществить только вручную на остановленном агрегате, т.е. невозможно использование онлайн регулирования в процессе эксплуатации. Угол установки лопаток ВНА имеет определенное положение, заданное заводом-изготовителем. В технической документации к данному нагнетателю указанное положение никак не обосновано и рекомендаций к его регулированию отсутствуют.

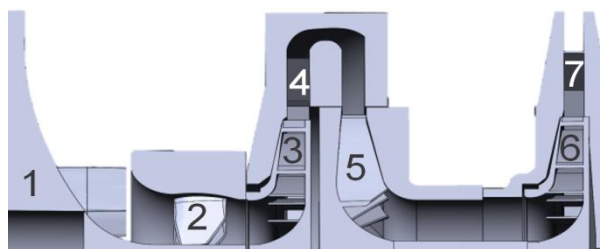


Рисунок 1 – Проточная часть ЦБН RF-2ВВ-36 «Крезолуар»:  
1 – торцевая крышка, 2 – ВНА, 3 – РК 1-й ступени, 4 – ЛД 1-й ступени; 5 – лопаточный ОНА;  
6 – РК 2-й ступени; 7 – ЛД 2-й ступени

## ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Настоящее исследование направлено на анализ выбора обоснованного угла установки ВНА, для возможности обеспечения наиболее благоприятных условий в эксплуатации исследуемого нагнетателя. Для выполнения поставленной цели решены следующие задачи:

- 1) создание численной модели объекта исследования;
- 2) проведение численного моделирования при различных положениях ВНА;
- 3) построение линий тренда основанных на результатах моделирования;
- 4) разработка рекомендаций по выбору положения ВНА ЦБН RF-2ВВ-36 «Крезолуар» в условиях эксплуатации.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящее время все чаще используют методы вычислительной газовой динамики для анализа условий работы турбомашин различного назначения, что способствует значительной экономии времени и средств в сравнении с натурными испытаниями [3]. Для обоснования угла установки ВНА в условиях эксплуатации проведено численное исследование течения потока в проточной части ЦБН. Численное моделирование течения осуществлялось в программном комплексе Ansys CFX, расчеты проводились в стационарной установке [4]. На основе данных, полученных в ходе проведения трехмерного сканирования [5], были получены необходимые геометрические характеристики исследуемой машины и выполнялось построение численной модели ее проточной части (рис. 2). На основании анализа результатов моделирования осуществлялось обоснование выбора угла установки ВНА.

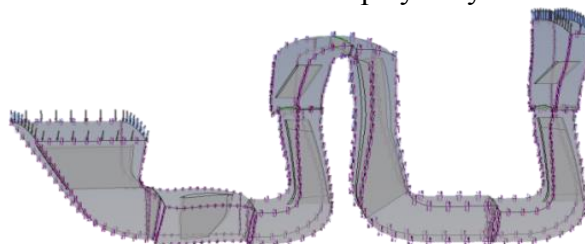


Рисунок 2 – Численная модель проточной части ЦБН

Расчетная модель состоит из семи доменов, которые разбиты на структурированную сетку конечных объемов с применением автоматизированного алгоритма построения топологии сеток ATM Optimazed. Количество элементов расчетной сетки на один домен составляло примерно 250 тыс. ячеек (около 2 млн. на всю модель). На входе в численную модель задавался массовый расход и температура, а на выходе статическое давление. На боковых поверхностях задавалось условие периодичности, подразумевающее передачу граничных условий изнутри домена с одной поверхности на другую в качестве уже внешних параметров, и наоборот. Поверхности обводов Hub и Shroud проточной части и лопаток Blade задавались как непроницаемые стенки Wall. Условия обтекания были выбраны No slip wall, что подразумевает стенку без скольжения. Для доменов РК первой и второй ступеней задавалась частота вращения в зависимости от рассматриваемого режима. Рабочим телом для расчетов послужила модель CH4RK. В качестве смены координат между доменами использовалась модель Stage и frozen rotor. Интерфейс Stage применялся в случае перехода с одной неподвижной области на другую, а при связывании неподвижной области с вращающейся применялась модель frozen rotor. В качестве модели турбулентности использовалась модель SST. Результаты верификации модели представлены в работе [6].

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В результате проведенного численного исследования получены зависимости изменения основных параметров работы ЦБН (мощность ( $N$ ), степень сжатия ( $\varepsilon$ ), КПД ( $\eta$ ) и расход ( $Q$ )) при изменении положения ВНА (рис. 3). Для всех графиков ось ординат представлена в виде величины изменений рассматриваемых параметров относительно их номинала (кроме зависимости  $\varepsilon=f(\text{ВНА},n)$ ).

На основе полученных линий тренда осуществлена разработка способа выбора положения ВНА в условиях эксплуатации исследуемого нагнетателя. Предложенный способ представляет из себя последовательность действий, которые можно разделить на пять этапов.

На первом этапе осуществляется запись параметров на текущем режиме работы ЦБН ( $Q, \varepsilon, N, n$ ). Далее потребуется учесть влияния поворота ВНА на рассматриваемые параметры ( $\Delta_i$ , где  $i$  – рассматриваемый параметр) на основе линий тренда (рис. 3). Перед тем как применять указанные поправочные коэффициенты, необходимо исходные параметры рассматриваемого режима привести к номинальному режиму. Данный шаг связан с тем, что коэффициенты  $\Delta$  получены на основе номинального режима работы нагнетателя.

На втором этапе для приведения параметров рассматриваемого режима к номинальному используются следующие зависимости:

$$Q_{\text{пр0}} = Q \left( \frac{n_0}{n} \right),$$

$$\varepsilon_{\text{пр0}} = \left[ 1 + \left( \frac{n_0}{n} \right)^2 \left( \varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

$$N_{\text{пр0}} = \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{n_0}{n} \right)^3 N,$$

где  $Q_{\text{пр0}}$  и  $Q$  – приведенный и фактический объемные расходы, м<sup>3</sup>/мин;  $n_0$  и  $n$  – номинальная и фактическая частоты вращения ротора нагнетателя, об/мин;  $k$  – показатель адиабаты;  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотность газа фактическая и номинальная, кг/м<sup>3</sup>;  $\varepsilon_{\text{пр0}}$  и  $\varepsilon$  – приведенная и фактическая степени сжатия;  $N_{\text{пр0}}$  и  $N$  – приведенная и фактическая мощности, МВт.

Стоит отметить, что параметр КПД не приводится.

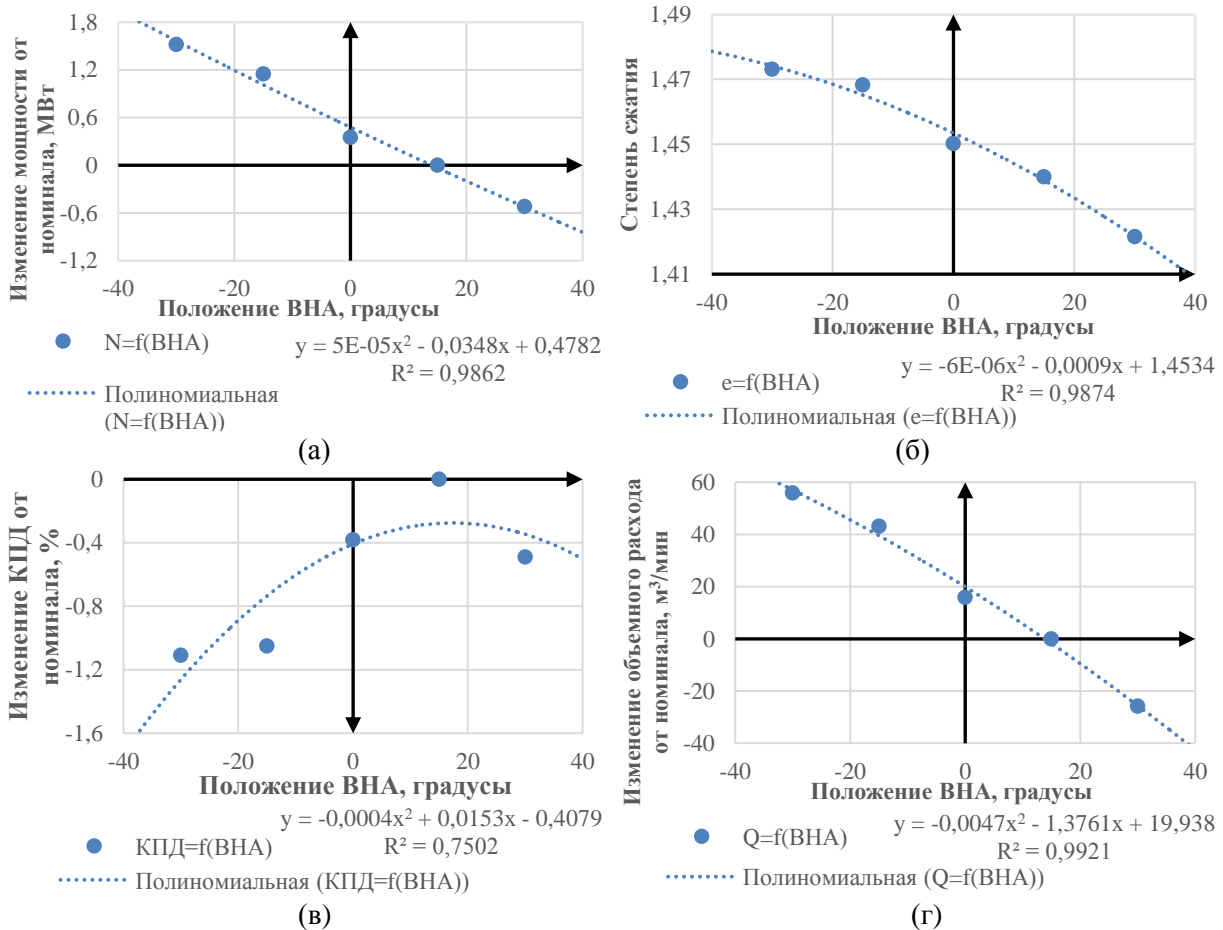


Рисунок 3 – Зависимости изменения основных параметров работы ЦБН при разных положениях ВНА: мощности от положения ВНА (а); степени сжатия от положения ВНА (б); КПД от положения ВНА (в); объемного расхода от положения ВНА (г)

Таким образом, мы получаем новый набор параметров рассматриваемого режима. На третьем этапе чтобы учесть возможное влияние ВНА к полученным значениям степени сжатия, мощности и КПД прибавляем величины поправок  $\Delta_i$ , на четвертом этапе вносим поправку на расход:

$$\begin{aligned} \varepsilon' &= \varepsilon_{\text{пр}0} + \Delta_{\text{степень сжатия}}, \\ N' &= N_{\text{пр}0} + \Delta_{\text{мощность}}, \\ \eta' &= \eta + \Delta_{\text{КПД}}, \\ Q' &= Q_{\text{пр}0} + \Delta_{\text{расход}}. \end{aligned}$$

На последнем этапе производится обратное приведение к условиям текущего режима работы нагнетателя:

$$Q_{\text{пр}} = Q' \left( \frac{n}{n_0} \right),$$

$$\varepsilon_{\text{пр}} = \left[ \frac{\left( \frac{n}{n_0} \right)^2 + \varepsilon'^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\left( \frac{n}{n_0} \right)^2} \right]^{\frac{k}{k-1}},$$

$$N_{\text{пр}} = \frac{\rho}{\rho_0} \left( \frac{n}{n_0} \right)^3 N'.$$

Таким образом, получаем набор параметров рассматриваемого режима с учётом возможного влияния изменения положения лопаток ВНА для рассматриваемого типа ЦБН. На рис. 4 продемонстрированы этапы предложенного подхода в графическом виде для одного из режимов работы нагнетателя RF-2BB-36 при повороте ВНА в противоположную сторону

вращения РК на 30 град (с +15 до -15 град). На рис. 4 точкой 1 отмечен текущий режим работы ЦБН до изменения положения ВНА, точкой 5 – режим работы ЦБН, если бы было осуществлено изменение положения ВНА, точками 2-4 для наглядности продемонстрированы параметры на разных этапах расчета (реально ЦБН в этих точках работать не будет).

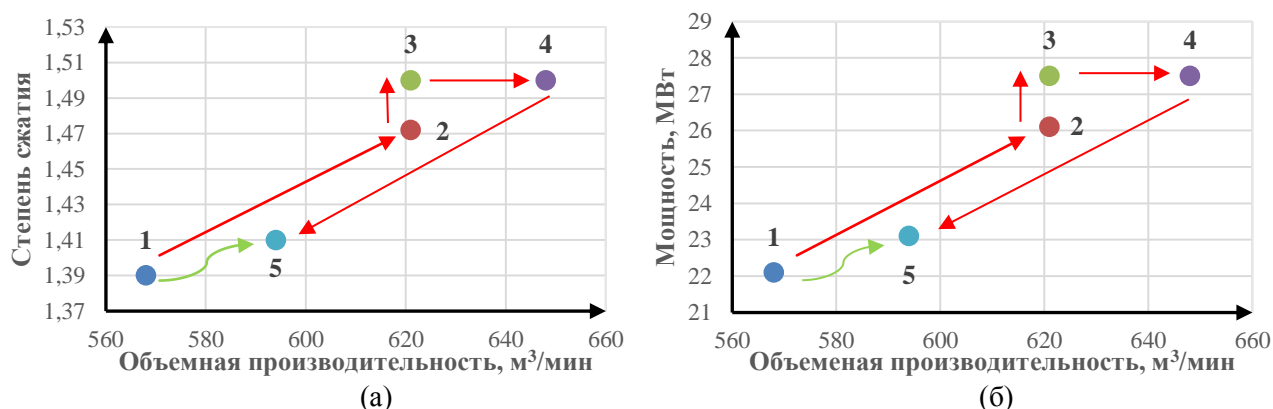


Рисунок 4 – Графическое представление работы методики для одного из режимов работы RF-2ВВ-36, где 1, 2, 3, 4 и 5 – этапы методики (а) -  $\varepsilon = f(Q)$ ; (б) -  $N = f(Q)$ .

На основе полученных результатов можно судить о качественном соответствии методики реальным физическим процессам [7, 8]. Так, например, придание отрицательной закрутки (изменение угла установки лопаток ВНА с +15 до -15 град), привело к увеличению степени сжатия (и, соответственно, напора), расхода и потребляемой мощности. Точность рассмотренного подхода в основном будет определяться погрешностью вычислительной модели. Для верификации предложенного подхода требуется проведение натурных испытаний ЦБН.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведенных исследований и анализа полученных результатов можно сделать следующие выводы:

1. Построена численная модель ЦБН типа RF-2ВВ-36. На ее основе получены линии тренда исследуемых параметров работы ЦБН при различном положении ВНА.
2. На основе построенных зависимостей предложен способ обоснования выбора положения ВНА исследуемого объекта в условиях его эксплуатации. Описанный способ позволяет проводить анализ влияния положения ВНА. Для оценки точности количественных результатов требуется получение экспериментальных данных на натурном объекте исследования.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сальников, С.Ю. Проблемы поддержания работоспособности газокompрессорного парка в современных условиях / С.Ю. Сальников, В.А. Щуровский // *Фундаментальные проблемы применения современных ГТУ в отечественной экономике – результаты освоения и эксплуатации и задачи на будущее*, 12-15 сентября 2017 г., г. Казань: сборник докладов LXIV Научно-технической сессии по проблемам газовых турбин и парогазовых установок. – Казань, 2017.
2. Ревзин, Б.С. Особенности конструкций одно- и двухступенчатых нагнетателей природного газа: учебное пособие / Б.С. Ревзин. – Екатеринбург: 2000. – 102 с.
3. Моделирование физических процессов в турбомашинах: учебно-методическое пособие / В.А. Седунин [и др]. – Екатеринбург: УрФУ, 2016. – 127 с.
4. Крутиков, М.В. Моделирование процесса сжатия газа в проточной части центробежного нагнетателя с регулируемым входным направляющим аппаратом / М.В. Крутиков,

В.Л. Блинов // Материалы международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург: СПбФ НИЦ МС, 2019. – №2. – С. 117-120.

5. Крутиков, М.В. 3D-сканирование и доработка проточной части центробежного нагнетателя RF-2ВВ-36 / М.В. Крутиков, Д.Е. Ледков, В.Л. Блинов // Труды третьей научно-технической конференции молодых ученых УрФУ. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2018.

6. Крутиков М.В. Влияние густоты сетки расчетной области на моделирование газодинамических характеристик двухступенчатого центробежного нагнетателя / М.В. Крутиков, В.Л. Блинов // Труды четвертой научно-технической конференции молодых ученых УрФУ. – Екатеринбург: Изд-во УрФУ, 2019.

7. Ден, Г.Н. Проектирование проточной части центробежных компрессоров / Г.Н. Ден. – Ленинград: Машиностроение; Ленингр. отд-ние, 1980. – 232 с

8. Кампсти, Н. Аэродинамика компрессоров / Н. Кампсти. – Москва: Изд-во Мир, 2000. – 688 с.

## JUSTIFICATION FOR CHOOSING THE INSTALLATION ANGLE THE INPUT GUIDE APPARATUS CENTRIFUGAL SUPERCHARGER

M.V. Krutikov, student,  
e-mail: [michail.krutikov2809@mail.ru](mailto:michail.krutikov2809@mail.ru)  
Ural Federal University

V.L.Blinov, Associate Professor  
e-mail: [v.l.blinov@urfu.ru](mailto:v.l.blinov@urfu.ru)  
Ural Federal University

In this paper, the influence of the rotation of the input guide device on the operation parameters of a natural gas centrifugal compressor with the use of computational gas dynamics methods is considered. A numerical model of the object under study is constructed, a series of calculations are performed, and the results are presented. Creating a numerical model was based on the results of three-dimensional scanning. The calculations are based on a verified model. The results of numerical simulation are expressed in the form of polynomial trend lines of the studied parameters for the nominal operation mode of the research object. Using the obtained data, a method is proposed for selecting the angle of installation of the blades of the inlet guide device of a natural gas centrifugal supercharger under operating conditions. The proposed method consists of a sequence of actions that can be divided into five stages.

**Key words:** *centrifugal compressor, input guide device, regulation, numerical simulation*