

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ГАЗОПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ АГРЕГАТОВ ГТК-10-4 НА ОСНОВЕ КОНТРОЛЯ ГЕОМЕТРИИ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТУРБИНЫ В РЕМОНТНОМ ЦИКЛЕ

Е. А. РЕВУНОВ

*Самарский государственный технический университет,
Самара, Россия*

Аннотация. В работе рассматривается влияние геометрии проточной части турбин газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ГТК-10-4 на восстановление мощности после средних и капитальных ремонтов. Проведен анализ дроссельных характеристик и измерений направляющего аппарата (НА) турбин высокого и низкого давления (ТВД и ТНД), выявлены отклонения размеров лопаток, приводящие к изменению площади проходного сечения и росту температуры газов, что ограничивает развиваемую мощность агрегата. Разработана методика инструментального контроля геометрии НА с применением специализированных шаблонов и калибров, внедренная в ремонтный процесс, позволяющая снизить удельный расход топлива и повысить ресурс турбин. Полученные результаты подтверждают необходимость контроля геометрии проточной части для повышения энергоэффективности ГПА.

Ключевые слова: газоперекачивающий агрегат, ГТК-10-4, направляющий аппарат, турбина высокого давления, турбина низкого давления, площадь проходного сечения, инструментальный контроль, энергоэффективность, ремонт, геометрия проточной части.

В парке газоперекачивающих агрегатов (ГПА) ПАО «Газпром» значительную долю составляют агрегаты типа ГТК-10-4, от надежности и эффективности которых напрямую зависит бесперебойность транспортировки газа. В последнее пятилетие наблюдается устойчивая тенденция: часть агрегатов после проведения средних и капитальных ремонтов выходит в эксплуатацию со стойким снижением развиваемой мощности на относительно доремонтных значений. Данное негативное явление приводит к прямым экономическим потерям, связанным с ростом удельного расхода топлива и снижением пропускной способности газотранспортной системы. Традиционные методы параметрической диагностики не всегда позволяют однозначно установить причину деградации характеристик, что указывает на необходимость углубленного анализа ремонтного цикла.

Целью работы является разработка мероприятия, направленного на восстановления мощностных параметров газотурбинной установки (ГТУ) ГТК-10-4 в процессе ремонтных работ.

В основу исследования лег ретроспективный анализ дроссельных характеристик и протоколов параметрических обследований агрегатов ГТК-10-4. Теоретический анализ результатов дроссельных характеристик двигателей показал, что ухудшение технического состояния ГТУ ГТК-10-4 после проведения ремонтов, связано с увеличением значения температуры перед турбиной высокого давления (ТВД) и за турбиной низкого давления (ТНД) относительно доремонтного значения. Рост температуры перед ТВД, после проведения ремонта, влияет на ограничение частоты вращения двигателя, не позволяя достичь ее номинального значения, соответственно, развиваемая мощность ограничивается.

В данной работе подробно рассмотрена одна из возможных проблем, влияющая на рост температуры продуктов сгорания в турбине – отклонений размеров сегментов направляющего аппарата турбин ТВД и ТНД от нормативных значений

Направляющий аппарат служит для преобразования потенциальной энергии газа в кинетическую и для подвода газа к рабочим лопаткам под заданным углом. Изменение площади

сечения направляющего аппарата и лопаточного угла ведет к изменению расчетной скорости потока, потерям энергии и к снижению КПД турбины, что влияет на корректную работу турбины и приводит к увеличению температуры продуктов сгорания в характерных сечениях турбины.

При проведении ремонтов обоймы черт. 186.003СБ, показанных на рисунках 1 и 2, агрегатов ГТК-10 необходимо контролировать площади проходных сечений направляющих аппаратов ТВД и ТНД, а также соотношение величин этих площадей.

Площадь проходных сечений направляющего аппарата ТВД, согласно чертежной документации, должна быть $1610 \pm 1\% \text{ см}^2$, а площадь проходных сечений направляющего аппарата ТНД согласно чертежу 186.003СБ3 составляет $3390 \pm 2\% \text{ см}^2$.

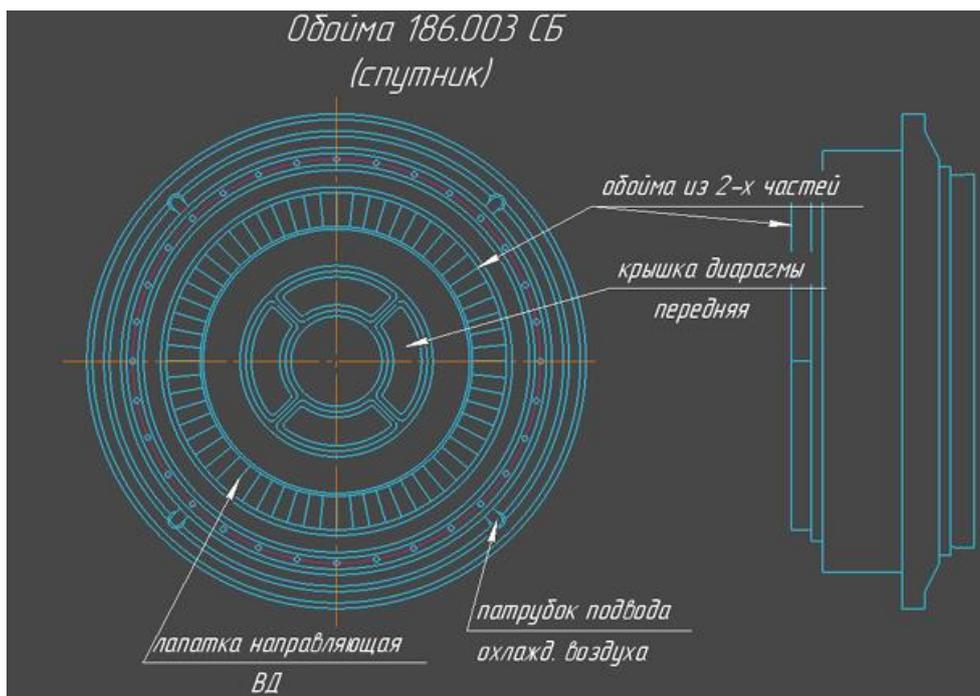


Рисунок 1. – Вид обоймы 186.003СБ со стороны передней крышки (вид на направляющие лопатки турбины высокого давления)

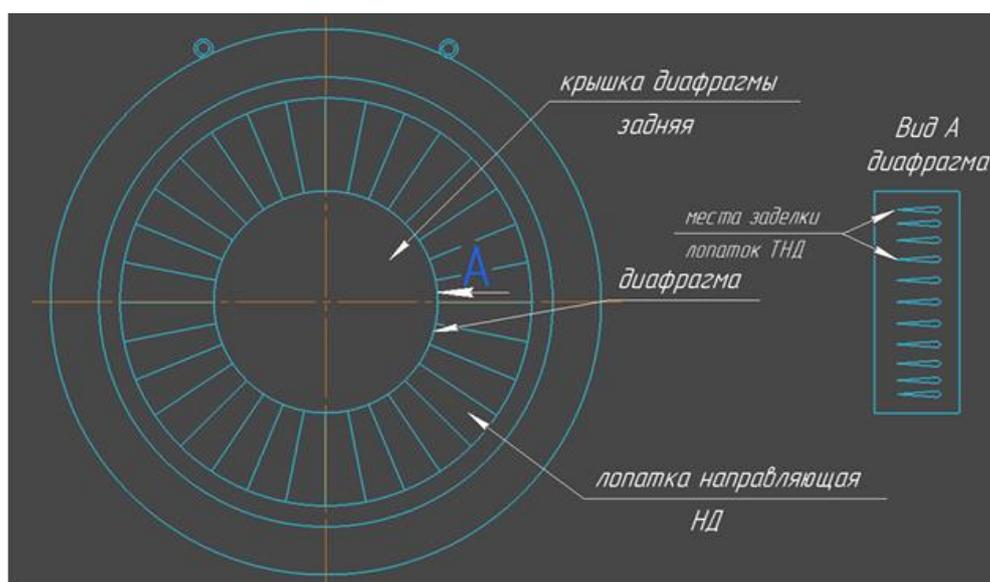


Рисунок 2. – Вид обоймы 186.003СБ со стороны задней крышки (вид на направляющие лопатки турбины низкого давления)

Для сбалансированности скоростей вращения валов и температуры за ТНД необходимо выдерживать соотношение площадей равным 0,47-0,48.

Для выполнения замеров площади сечения направляющего аппарата была разработана методика и специальная оснастка, включающая:

- Координатный замер высоты каждой лопатки в сегментах НА.
- Контроль угла установки лопаток.
- Расчет результирующей площади проходного сечения каждого канала.

Для реализации методики сконструированы и изготовлены специализированные шаблоны и калибры, обеспечивающие точность измерений ± 0.1 мм.

В рамках апробации разработанных приспособлений и методики был выбран ГПА с коэффициентом технического состояния ниже удовлетворительного предела после выполнения ремонтных работ.

Комиссионная разборка и последующие замеры выявили системные отклонения от паспортной геометрии:

– В НА ТНД: 70% замеренных лопаток имели положительный допуск по высоте (+1.2...+2.5 мм против допустимых ± 0.8 мм), что привело к увеличению суммарной площади проходного сечения на $\sim 3.5\%$.

– В НА ТВД: 54% лопаток имели отрицательный допуск по высоте (-1.0...-2.2 мм), что вызвало зауждение сечения на $\sim 2.8\%$.

Расчет площади проходных сечений происходит согласно формулам (1) и (2):

$$\sum F = k \cdot \frac{A_1 + A_2}{2} \cdot H \text{ см}^2, \quad (1)$$

где A_1, A_2 – величина горла лопаточного канала ТНД, см;
 H – высота пера лопатки ТНД, см;
 k – количество каналов направляющего аппарата ТНД.

$$\sum F = k \cdot d \cdot h \text{ см}^2, \quad (2)$$

где d – величина горла лопаточного канала ТВД, см;
 h – высота пера лопатки ТВД, см;
 k – количество каналов направляющего аппарата ТВД.

Расчет отклонения площади проходного сечения от нормативных значений производится согласно формуле (3).

$$\delta = \frac{\sum F - \sum F_{\text{чертежное}}}{\sum F_{\text{чертежное}}} \cdot 100 \quad (3)$$

где $\sum F$ – суммарная площадь проходного сечения ТНД или ТВД, см^2 ;
 $\sum F_{\text{чертежное}}$ – номинальная площадь проходного сечения ТНД или ТВД, см^2 .

Результаты исследования представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Результаты замера проходных сечений направляющих лопаток ТВД и ТНД

	Номинальное значение площади, см^2	Фактическое значение площади, см^2	Отклонение, %
ТНД	3390	3748	10,5
ТВД	1610	1607	0,2

Полученные данные имеют четкое физическое объяснение. Увеличение сечения НА ТНД снижает скорость потока и кинетическую энергию, подводимую к рабочим лопаткам. Заужение сечения НА ТВД увеличивает гидравлическое сопротивление и затраты энергии на проток. Совместное действие этих факторов смещает расчетные режимы работы ступеней турбины, снижая их КПД. Для компенсации возросших потерь и поддержания заданной частоты вращения ротора, система автоматического регулирования вынуждена увеличивать расход топлива. Это приводит к росту температуры рабочего тела на входе в ТВД. При достижении температурного предела (предела прочности лопаток) автоматика ограничивает топливоподачу, не позволяя агрегату выйти на номинальную частоту вращения и, следовательно, на номинальную мощность.

В результате работы была экспериментально подтверждена гипотеза о непосредственном влиянии несоблюдения геометрии проточной части на падение мощности ГПА ГТК-10-4 после ремонта. Установлена количественная связь между отклонениями размеров лопаток НА и ростом температур газов, ограничивающих мощность.

Разработанное мероприятие по инструментальному контролю геометрии НА внедрено в технологический процесс ремонтных предприятий. Его применение позволяет не только устранять последствия в виде падения мощности агрегатов, но и осуществлять превентивный контроль качества ремонтных операций, связанных с восстановлением лопаточного аппарата. Это обеспечивает значительный экономический эффект за счет снижения удельного расхода топлива и повышения ресурса деталей турбины, работающих в менее напряженных температурных условиях. Дальнейшие исследования планируется направить на формализацию методики и создание цифровых двойников проточной части для прогнозирования характеристик после ремонта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зарицкий С.П. Диагностика газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. – М.: Недра, 1987. – 198 с.
2. Методические указания по определению топливно-энергетических показателей ГПА типа ГТК-10, ГТ-750-6, ГТ-6-750, ГН-6, ГТК-5, ГТ-700-5. ПО «Союзоргэнергогаз». 1985 г. – 28 с.