

<sup>1</sup> В. П. Парафейник, д-р техн. наук<sup>1</sup> Н. С. Щербаков<sup>2</sup> А. А. Рябов<sup>2</sup> В. В. Шевчук<sup>3</sup> В. Н. Разношинский<sup>1</sup> И. Н. Тертышный<sup>1</sup> С. А. Прилипко<sup>1</sup> ПАО «Сумское НПО», г. Сумы<sup>2</sup> ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс»,  
г. Запорожье<sup>3</sup> ПАО «Мотор-Сич», г. Запорожье

УДК 621.515

**ВЫБОР СИСТЕМНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ  
ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО  
ЭФФЕКТИВНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.****Ч. П. Методологические подходы к созданию  
блочно-комплектных турбокомпрессорных аг-  
регатов для компрессорных станций газовой  
промышленности**

**Ключові слова:** *стенд замкнутого кон-  
туру, турбокомпресорний агрегат, відце-  
нтрівий компресор, газотурбінний двигун,  
політропний ККД компресора, ефектив-  
ний ККД двигуна.*

*Розглянуто особливості створення агрегатів типу ГПА-Ц та їх доводка на основі результатів натурних випробувань агрегату ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 в складі стенда замкнутого контуру. Показано, що це дозволяє отримати характеристики ефективності роботи основних і допоміжних систем, а також системну характеристику агрегату.*

**Введение**

Блочно-комплектные турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) природного и нефтяного газа на основе конвертированных газотурбинных двигателей (ГТД) и центробежных компрессоров (ЦК) мощностью 4,0–32,0 МВт являются энергосиловыми системами, рабочий процесс которых сопровождается сложными термодинамическими явлениями. Несмотря на то, что в отечественной практике их создание на основе ГТД промышленного типа и ЦК относится еще к 50-м годам прошлого века, системный анализ рабочего процесса ТКА с использованием первого и второго законов термодинамики стал возможным только в 90-х годах XX столетия. Был обобщен опыт создания, производства и эксплуатации блочно-комплектных агрегатов типа ГПА-Ц в Сумском машиностроительном научно-производственном объединении (СМНПО) и решены задачи повышения их эффективности на основе системных исследований особенностей рабочего процесса блочно-комплектных турбокомпрессорных установок (ТКУ), создаваемых на основе ТКА для работы в составе компрессорных станций (КС) газовой и нефтяной промышленности.

Создание ТКА для предприятий газовой и нефтяной промышленности и, прежде всего, компрессорных станций (КС) газотранспортной системы с учетом их эксплуатации в различных климатических условиях невозможно без проведения комплекса испытаний как агрегатов, узлов и систем вновь создаваемого изделия – ТКА, так и последующей его доводки согласно предъявляемым к нему требованиям [1–5]. Особенно важно обеспечить надежность эксплуатации конвертированных авиационных и судовых газотурбинных двигателей (ГТД) различной мощности в составе ТКА при их работе на природном, нефтяном или синтетическом газе.

Блочно-комплектные ТКА в Украине создаются следующими предприятиями: ПАО «Сумское машиностроительное НПО» (СМНПО), ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект» (г. Николаев), ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» и ПАО «Мотор-Сич» (г. Запорожье). Первое из них создает и производит центробежные компрессоры (ЦК) высокого давления, а также осуществляет «пекидж» и поставку агрегатов, остальные предприятия производят судовые, авиационные и конвертированные ГТД для наземного применения в различных отраслях промышленности.

Для создания современных ТКА, обеспечивающих надежную эксплуатацию газотранспортной системы, была создана соответствующая производственная и экспериментальная база на предприятиях-изготовителях. В частности, в СМНПО действует блок испытательных стендов, обеспечивающий натурные испытания ЦК высокого давления (1,2–12,0 МПа), ГТД мощностью 4,0–25,0 МВт

© В. П. Парафейник, Н. С. Щербаков, А. А. Рябов, В. В. Шевчук, В. Н. Разношинский,  
И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, 2017

и ТКА в целом с учетом их комплектующих систем в условиях, максимально приближенных к условиям эксплуатации. При этом программа создания ТКА может состоять из таких этапов:

- создание опытных образцов ГТД и ЦК, которые проходят предварительные испытания на стендах предприятий-изготовителей;
- изготовление стендового образца агрегата, в составе которого проводятся доводочные и контрольные испытания ГТД и ЦК, а также вспомогательных систем для получения основных характеристик;
- создание опытного образца серийного агрегата, который проходит заводские и приемочные испытания на стенде СМНПО.

Такой подход был апробирован в процессе создания агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 с компрессором НЦВ-6,3/56-1,45 типа «баррель» конструкции СМНПО и ГТД Д-336-1 конструкции ГП «Ивченко-Прогресс».

### **1. Стенды для испытания ГТД в организации-разработчика и на заводе-изготовителе. Методические особенности испытаний двигателя**

При создании и доводке двигателя Д-336-1 для агрегата типа ГПА-Ц-6,3А использовали гидротормозной стенд (ГТС) организации-разработчика [6], газовый стенд ПАО «Мотор-Сич», а также стенд замкнутого контура (ЗК) СМНПО [1, 3].

Работы по созданию двигателя проводились в следующей последовательности:

- испытания авиационного прототипа Д-136 двигателя Д-336-1 на ГТС;
- поверочные (предварительные) испытания двигателя Д-336-1 в составе стендового агрегата ГПА-Ц-6,3В/56-1,45 на испытательном стенде СМНПО;
- заводские и межведомственные испытания в составе опытного образца серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 на стенде ЗК.

На ГТС разработчика испытаниям подвергался двигатель, выработавший летный ресурс, созданный на основе авиационного ГТД Д-136, после его разборки, дефектации деталей узлов, а также при необходимости их замены на вновь изготовленные. Испытания двигателя проводились на керосине и предусматривали реализацию программ по отработке запусков; снятию дроссельных характеристик с получением зависимостей  $G_{Т.Г.}, N_{СТ}, n_{НД}, n_{ВД} = f(\pi_{К\Sigma})$  ( $G_{Т.Г.}$  – массовый расход топлива, кг/с;  $N_{СТ}$  – мощность силовой турбины (СТ), кВт;  $n_{НД}$ ,  $n_{ВД}$  – частота вращения компрессоров низкого и высокого давлений соответственно;  $\pi_{К\Sigma}$  – суммарная степень сжатия воздуха в ГТД); получению предварительных данных о настроечных параметрах системы автоматизированного управления и регулирования (САУ и Р) двигателя.

С учетом испытаний ГТД на стенде ГТС двигатель был подготовлен к испытаниям на газе. Узел камеры сгорания (КС), учитывая перевод на газ и жесткие нормы по содержанию вредных веществ в выхлопных газах (в.г.), практически заменен новым: изменена конструкция жаровой трубы, форсунок, коллектора и пр. До постановки на двигатель узел КС прошел лабораторные испытания на п.г. с целью определения поля температур на выходе, содержания вредных выбросов с в.г., диапазона устойчивой работы.

Учитывая то, что двигатель типа Д-336 по своим характеристикам близок к двигателям-прототипам Д-36 (двигатель самолета ЯК-42) и Д-136 (двигатель вертолета Ми-26), такие испытания как тензометрирование лопаток компрессора, термометрирование горячих узлов, определение непробиваемости корпусов при обрыве лопаток и другие (обязательные при испытаниях ГТД), на нем не проводились.

Для испытания серийных ГТД в ПАО «Мотор-Сич» был создан специальный стенд для испытания серийных двигателей на газообразном топливе. Конструктивная схема и состав оборудования стенда, представленные на рис. 1, отражают особенности работы воздухоприемного тракта (ВПТ) двигателя в составе ТКА и позволяют определять не только его основные характеристики, но и изучить неравномерность поля давлений и скоростей перед воздухозаборным устройством ГТД. В связи с этим на испытательном стенде ПАО «Мотор-Сич» был поставлен специальный эксперимент по исследованию поля давлений на входе в ГТД с использованием вертикально и горизонтально расположенных гребенок с приемниками полного давления, расположенными непосредственно на входе в двигатель (рис. 2). Замер давлений в процессе испытаний производился за 2 прохода.

С точки зрения определения характеристик эффективности ГТД, используемых при верификации расчетной модели системной характеристики ТКА, важнейшими параметрами являются: крутящий момент на валу СТ, определяемый с использованием измерителя крутящего момента (ИКМ), смонтированном в редукторе стенда (рис. 2), а также замер объемного расхода топливного газа (т.г.) на входе в дозатор топлива.

Точностные характеристики измерительных средств, используемые в составе стенда, соответствуют ГОСТ Р 52782-2007 и удовлетворяют предъявляемым требованиям. Для нахождения параметров ГТД при определении его эффективности были привлечены как штатные измерительные средства, используемые в серийных авиационных двигателях, так и стендовые средства измерений [6, 7]: для измерения частоты вращения роторов – прибор ДТА-10 с погрешностью измерения  $\leq 0,2\%$ ; температур – прибор Т80-Т в рабочем диапазоне от 473 до 1100 К, обеспечивающий точность измерений не ниже  $\pm 0,9\%$ ; давления воздуха и масла – прибор «Элемер-100Вн-ДИ» в диапазоне измерения от 0,5 до 2,0 МПа и от 0 до 0,5 МПа с погрешностью не выше  $\pm 0,8$  и  $\pm 3,2\%$  соответственно; температура масла – прибор П-109 и ТСП-8040Р в рабочем диапазоне 243–373 К, 213–423 К с точностью  $\pm 2,4$  и  $\pm 1,0\%$  на входе и выходе из двигателя соответственно; расход т.г. определялся прибором «ФЛОУТЕК-ТМ» (ГОСТ 8.586.1-2005) для диапазона 0–2000 м<sup>3</sup>/ч с погрешностью не более 1,0%.

В процессе испытаний определяются такие основные параметры, необходимые для получения системной характеристики ТКА:

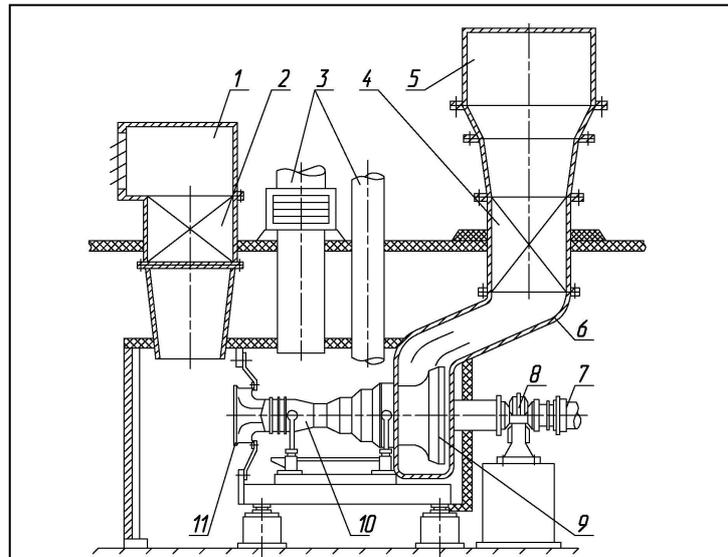
- частота вращения роторов (измеряется бесконтактными датчиками оборотов);
- мощность двигателя – определяется по показаниям давления ИКМ и вычисляется по формуле

$$N_{СТ\text{изм}} = 0,0267706 \cdot P_{ИКМ} \cdot n_{СТ} + \Delta N^*,$$

где 0,0267706 – переводной коэффициент;  $N_{СТ\text{изм}}$  – измеренная мощность на выводном валу СТ, кВт;  $P_{ИКМ}$  – давление в ИКМ, кгс/см<sup>2</sup>;  $n_{СТ}$  – измеренная частота вращения ротора СТ, мин<sup>-1</sup>;  $\Delta N$  – поправка на мощность, учитывающая потери полного давления на входе в двигатель и механические потери в редукторе, кВт;

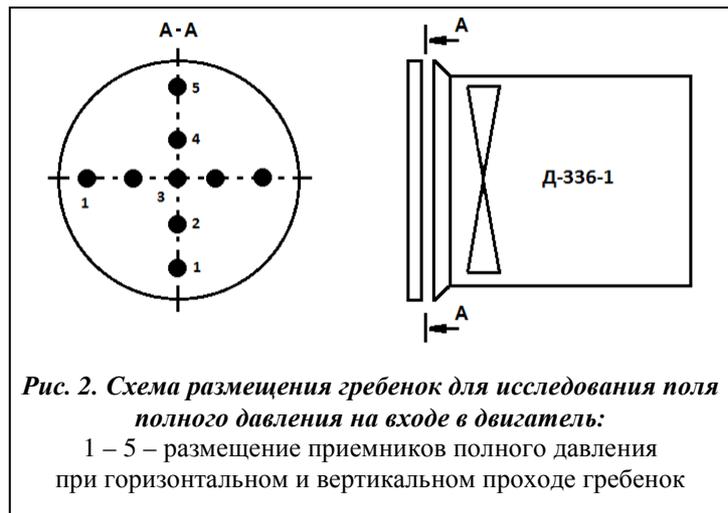
– расход т.г. на стенде – определяется штатной системой измерения. В состав системы входят датчики измерения температуры и давления т.г., а также перепада давления на шайбе. Пересчет рас-

– расход т.г. на стенде – определяется штатной системой измерения. В состав системы входят датчики измерения температуры и давления т.г., а также перепада давления на шайбе. Пересчет рас-



**Рис. 1. Стенд для испытания двигателей типа Д-336, АИ-336 на газообразном топливе:**

- 1 – шахта ВПТ; 2 – шумоглушитель; 3 – воздухопроводы системы вентиляции; 4 – шумоглушитель выхлопа;
- 5 – шахта ВТ; 6 – газотвод; 7 – вал электрогенератора;
- 8 – редуктор с ИКМ; 9 – выходное устройство двигателя;
- 10 – ГТД; 11 – входное устройство



**Рис. 2. Схема размещения гребенок для исследования поля полного давления на входе в двигатель:**

- 1 – 5 – размещение приемников полного давления при горизонтальном и вертикальном проходе гребенок

\*Зависимость получена с учетом размерности давления в ИКМ в единицах давления кгс/см<sup>2</sup>.

хода т.г. на условное топливо (у.т.) (100% метана с  $H_0=50056$  кДж/кг (11950 ккал/кг) выполняется по формуле

$$G_{\text{т.г. усл}} = G_{\text{т.г.}} \cdot H_U / 11950 \text{ [кг/ч]},$$

где  $G_{\text{т.г.}}$  – массовый расход т.г., кг/ч;  $H_U$  – удельная теплотворная способность т.г. (при 20 °С и 760 мм рт. ст.), ккал/кг; 11950 – удельная теплотворная способность у.т., ккал/кг.

Удельный расход т.г. определяется как

$$c_{\text{еуд.}} = \frac{(G_{\text{т.г.}})_{\text{у.т.}}}{(N_{\text{СТ}})_{\text{н}}} \text{ [кг/кВт·ч]},$$

где  $(G_{\text{т.г.}})_{\text{у.т.}}$  – нормальный массовый расход у.т., определяемый с использованием дроссельных характеристик двигателя, кг/ч;  $(N_{\text{СТ}})_{\text{н}}$  – номинальная мощность двигателя при нормальных условиях, кВт;

– суммарное отношение давлений воздуха в компрессоре газогенератора ГТД

$$\pi_{\text{к}\Sigma} = (P_{\text{квд}} + P_{\text{н}}) / P_{\text{н}}.$$

где  $P_{\text{квд}}$  – избыточное давление воздуха за компрессором высокого давления (КВД), МПа;  $P_{\text{н}}$  – давление атмосферного воздуха, МПа;

– эффективный КПД двигателя – определяется по формуле

$$\eta_e = \frac{3600}{c_{\text{еуд.}} \cdot 50056} \cdot 100 (\%).$$

Используемые стенды, их оснащение и методика исследований позволили получить экспериментальные данные, необходимые для интегрального термодинамического анализа и построения системной характеристики агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45.

## 2. Стенды для испытания и доводки агрегатов типа ГПА-Ц

Для аэродинамических и натурных испытаний ТКА, укомплектованных ЦК и ГТД, в СМНПО созданы [1, 2]:

- воздушные стенды для испытания ЦК, позволяющие проводить газодинамические исследования их проточных частей (ПЧ), а также механические испытания опытных образцов компрессоров;
- блок испытательных стендов ЗК для натурных испытаний ТКА и их систем на природном газе в широком диапазоне режимов работы, а также межведомственных испытаний агрегатов в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным на КС.

Типичная схема стенда ЗК для испытаний ТКА представлена на рис. 3 [2, 3]. Газовый контур стенда рассчитан на давление 5,49 МПа и оснащен специальным дросселирующим устройством, позволяющим испытывать ЦК в широком диапазоне изменения конечных давлений\*. Контур имеет систему охлаждения газа, созданную на основе аппаратов воздушного охлаждения (АВО) типа АВГ-160 (11). Для плавного регулирования давления и защиты от «помпажа» между участками ЗК высокого и низкого давления, кроме крана 16, имеются байпасный контур Ду200, оснащенный дроссельным краном 14 и антипомпажным клапаном 17. Заполнение ЗК и его подпитка газом во время испытаний производится от специального газопровода с использованием дожимной компрессорной установки 7. Контур оборудован системами для сброса технологического газа на «свечу» 9, 10, продувки сборника уплотнительного масла 12 ротора ЦК, а также приспособлением для отбора проб технологического газа 18 при определении его химического состава перед снятием газодинамических характеристик ЦК. Контур оснащен запорной арматурой 8, 15, 16 для регулирования производительности ЦК, а также расходомерными устройствами для замера: расхода т.г. 3 в ГТД 1, производительности ЦК 4, расхода технологического газа 5 в контуре стенда.

\*Дроссельное устройство, обеспечивающее испытание ЦК на  $P_{\text{к}} = 7,45\text{--}12,0$  МПа, на рис. 3 не показано.

Основной системой стенда является стендовый или опытный образец серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45. Подготовка агрегатов и стенда ЗК к испытаниям соответствует общепринятым правилам с соблюдением требований к размещению и выполнению мест отбора давлений, температур и других необходимых параметров, а также требований программ и методик испытаний ЦК, ГТД и агрегата в целом [2, 5, 7].

Для проведения испытаний стенд укомплектован такими средствами измерений: датчиками давления и пульсаций давления, температуры, уровня вибраций, а также средствами для автоматизации процесса обработки результатов испытаний. Вторичные приборы и образцовые манометры, используемые в процессе испытаний, располагаются в специальном боксе рядом с агрегатом. Управление работой стенда осуществляется из операторной.

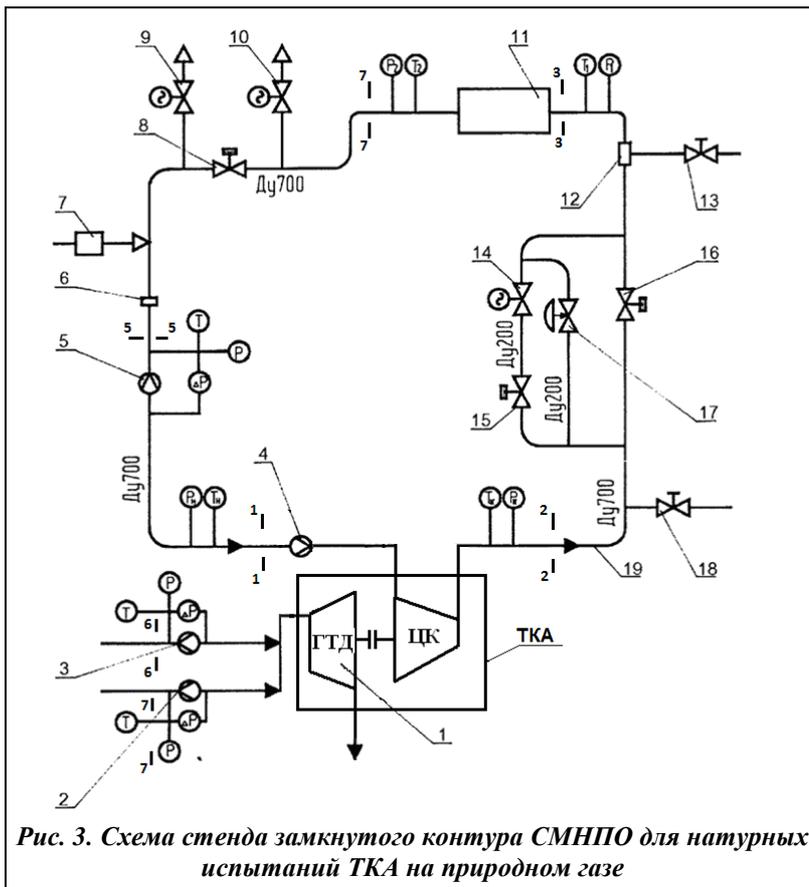


Рис. 3. Схема стенда замкнутого контура СМНПО для натурных испытаний ТКА на природном газе

Для определения характеристик ЦК на стендах применяются приборы класса точности не выше 0,4 при измерениях давлений в диапазонах 0–6,0 МПа и 0–10 МПа; при измерении температур – термометры лабораторные с ценой деления 0,2 К для диапазона измерения температуры от 243 до 428 К. Для определения частоты вращения ротора ЦК – комплект 3300 «Bentley Nevada». Барометрическое давление задается по данным метеостанции с погрешностью не выше 0,2% в диапазоне 720–780 мм рт. ст. Характеристики измерительных средств в составе стенда соответствуют ГОСТ Р 52782-2007 и удовлетворяют предъявляемым требованиям.

Кроме испытаний ЦК и вспомогательных систем агрегата, на стенде ЗК проводились контрольные испытания головного образца двигателя типа Д-336 в составе стендового агрегата ГПА-Ц-6,3В/56-1,45, а в дальнейшем и его приемо-сдаточные и государственные испытания в составе опытного образца серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45.

### 3. Программа и методические особенности испытаний основных и вспомогательных систем ТКА на стенде замкнутого контура

Турбокомпрессорные агрегаты типа ГПА-Ц-6,3А, создававшиеся на основе новых конструкций ЦК и ГТД, являются агрегатами нового поколения. В связи с этим создание, испытание и доводка опытного образца агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 осуществлялась в несколько этапов. На первом этапе был создан стендовый агрегат ГПА-Ц-6,3В/56-1,45 с ЦК НЦВ-6,3/56-1,45 типа «баррель» и ГТД Д-336-1, который прошел предварительные и контрольные испытания на стенде ЗК СМНПО. При этом ЦК прошел предварительные испытания на аэродинамическом стенде, а двигатель – на ГТС ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» для испытания двигателя Д-136. Результаты испытаний ЦК и ГТД, а также других систем в составе стендового агрегата позволили создать опытный образец серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45, который прошел заводские и межведомственные испытания на стенде ЗК. При этом впервые при создании блочно-комплектных агрегатов одновременно проводились приемочные и государственные испытания двигателя и агрегата. Новый агрегат по своим технико-

экономическим показателям показал существенное улучшение по сравнению со своим предшественником – агрегатом типа ГПА-Ц-6,3М с двигателем НК-12СТ и ЦК типа НЦГ-6,3 [1].

Специфичность конструкции ЦК высокого давления, а также требования эффективной и надежной эксплуатации ГТД авиационного типа в условиях КС газовой промышленности потребовали выполнения комплекса испытаний узлов и систем агрегата с точки зрения его энергоэффективности, надежности, экологичности и удобства эксплуатации. Все эти аспекты были учтены при разработке соответствующих программ испытаний.

### 3.1. Методические особенности испытаний ЦК на стенде замкнутого контура

В процессе создания компрессора НЦВ-6,3/56-1,45 предварительно были выполнены механические испытания, снятие размерных и безразмерных газодинамических характеристик на модельном аэродинамическом стенде  $\eta_{\Pi} = f(\Phi_0)$ ,  $\psi_{\Pi} = f(\Phi_0)$  ( $\eta_{\Pi}$  – политропный КПД,  $\Phi_0$  – условный коэффициент расхода,  $\psi_{\Pi}$  – коэффициент политропного напора) [2, 4, 5].

Натурные испытания ЦК на стенде ЗК первоначально были проведены в составе стендового образца агрегата, а затем в составе опытного образца серийного агрегата при давлении 5,49 МПа. Природный газ, использовавшийся в ЗК стенда при испытаниях ЦК, соответствовал ГОСТ 5542-2015.

При испытаниях ЦК в составе стендового агрегата, были получены безразмерные газодинамические характеристики  $\eta_{\Pi}, \psi_{i,\Pi}, \pi_K = f(\Phi_0)$ , а также размерные характеристики  $N_i, \pi_K, \eta_{\Pi} = f(V_H)$  в зависимости от объемного расхода  $V_H$  компрессора ( $\text{м}^3/\text{с}$ ) в достаточно широком диапазоне изменения частоты вращения ротора ( $n = 7800 \div 8400$  об/мин). При этом состав газа и условия испытаний по давлению и температуре обеспечивали выполнение условий автомодельности по числам Маха  $M_{u_2}$  и Рейнольдса  $Re_{u_2}$ .

Проверка соответствия характеристик компрессора техническому заданию на создание ЦК для агрегата линейной КС проведена согласно программе испытаний [4], разработанной в соответствии с [5]. Перед испытаниями все приборы прошли поверку в государственной метрологической службе.

Определение мощности, потребляемой компрессором в процессе испытаний, выполнялось с использованием его параметров с применением метода теплового баланса. Обработка результатов испытаний ЦК производилась согласно общепринятым методикам по таким формулам [1, 2, 4]

– отношение давлений

$$\pi_K = P_K / P_H ; \quad (1)$$

– политропный КПД

$$\eta_{\Pi} = \lg \pi_K / \left( \left( \frac{k}{k-1} \right) \cdot \ln \left( \frac{T_K}{T_H} \right) \right); \quad (2)$$

– массовый расход, кг/ч

$$G = \alpha \cdot \varepsilon \cdot 3,1416 \frac{d^2}{4} \cdot \sqrt{g(\Delta P_{D_1} + \Delta P_{D_2})} \cdot \rho_D \cdot 3600 ; \quad (3)$$

– объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$

$$V_H = G / \rho_H ; \quad (4)$$

– политропный напор, Дж/кг

$$H_{\Pi} = R \cdot T_H \cdot \sigma \cdot \left( \pi^{\frac{1}{\sigma}} - 1 \right); \quad (5)$$

– число политропы

$$\sigma = \eta_{\Pi} \cdot k / (k - 1); \quad (6)$$

– полный напор, Дж/кг

$$H_i = H_{\Pi} / \eta_{\Pi}; \quad (7)$$

– коэффициент политропного напора

$$\Psi_{\Pi} = H_{\Pi} / u_2^2; \quad (8)$$

– окружная скорость рабочего колеса, м/с

$$u_2 = \pi D_2 n / 60; \quad (9)$$

– коэффициент внутреннего напора

$$\Psi_i = \Psi_{\Pi} / \eta_{\Pi}; \quad (10)$$

– условный коэффициент расхода

$$\Phi_0 = 4V_{\text{H}} [3,1416 \cdot (D_0^2 - d_{\text{em}}^2) \cdot u_2]. \quad (11)$$

При этом в формулах (1) – (11) использовано следующие обозначения:  $P_{\text{H}}$  и  $P_{\text{K}}$  – начальное и конечное давление, Па;  $k$  – показатель адиабаты;  $T_{\text{H}}$ ,  $T_{\text{K}}$  – начальная и конечная температура, К;  $\alpha$ ,  $\varepsilon$  – коэффициент расхода и поправочный множитель на расширение измерительной диафрагмы [4];  $d$  – диаметр измерительной диафрагмы, м;  $\Delta P_{\text{д}}$  – перепад давления на диафрагме, Па;  $\rho_{\text{д}}$  – плотность газа перед диафрагмой, кг/м<sup>3</sup>;  $R$  – газовая постоянная, Дж/(кг·К).

Величина среднеквадратичных погрешностей определения параметров для номинального режима работы ЦК с  $\pi_{\text{K}} = 1,5\text{--}2,2$ , согласно данным работы [2], не превышает (%):  $\sigma_{\eta_{\Pi}}$ ,  $\sigma_{\Psi_{\Pi}} = \pm 1,5\text{--}2$ ;  $\sigma V_{\text{H}} = \pm 1\text{--}1,5$ ;  $\sigma N_i = \pm 2\text{--}2,5$ . Расчетные значения среднеквадратичных погрешностей определения основных показателей для компрессора НЦВ-6,3В/56-1,45, полученные в процессе его испытаний на стенде ЗК, для режима, близкого к номинальному, не превышают вышеуказанный диапазон значений погрешностей.

### 3.2. Методические особенности испытаний ЦК на стенде замкнутого контура

Одним из условий испытаний ГТД в составе стендового агрегата на втором этапе работ было определение механической мощности, производимой ГТД, по параметрам ЦК. Погрешность определения мощности при этом не должна превышать  $\pm 2\%$ . Перед контрольными испытаниями ГТД были выполнены: монтаж, отладка и запуск двигателя; проверка работоспособности систем двигателя в объеме 300 ч; определение характеристик ГТД и проверка их соответствия характеристикам ЦК; анализ вибрационных характеристик во всем диапазоне рабочих частот вращения роторной системы ТКА. С учетом полученных результатов были также проведены эквивалентно-циклические испытания (ЭЦИ) двигателя на ресурс 10 и 15 тыс. ч по наработке основных узлов и деталей, а также его комплектующих изделий. Были также приняты во внимание результаты ранее проведенных исследований на ГТС в ГП «Ивченко-Прогресс» по определению внешней характеристики двигателя  $N_{\text{СТ}} = f(n_{\text{СТ}})$  при условии постоянной частоты вращения ротора газогенератора  $n_{\text{ВД}} = \text{const}$ , а также результаты исследования возможности достижения эксплуатационного ресурса 25–30 тыс. ч, исходя из результатов ЭЦИ, и назначенного ресурса 100 тыс. ч, а также исходя из анализа наиболее нагруженных деталей газогенератора двигателя (рабочая лопатка и диск ТВД, диск 5-й ступени КВД). Учитывались также ресурс подшипников, вибрационная напряженность деталей роторов компрессоров низкого и высокого давления; рабочих лопаток турбин высокого и низкого давления, СТ и дисков турбин (величины пределов выносливости дисков определялись расчетно-экспериментальным путем); динамической прочности валов и трубопроводов; вибрационных характеристик двигателя в целом, а также безотказности двигателя, составившей 4000 ч по наработке на отказ.

При подготовке и реализации третьего этапа работ в процессе испытаний и доводки опытного образца серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45 по ГТД был выполнен комплекс исследований, заключавшийся в следующем:

- проверка системы топливopитания и регулирования на всех режимах при давлении газа на входе в дозатор топлива  $2,4 \pm 0,1$  МПа;
- определение теплотехнических характеристик двигателя в составе агрегата по параметрам работы ЦК;

- определение характеристик запуска (время выхода на режим малого газа 45–55 с при температуре газа за турбиной 793 К);
- определение характеристик двигателя при переходе с режима «малый газ» на режим 7,8 МВт; при этом величина  $\Delta P_{\text{вх}} = 30$  мм вод. ст., а потери  $\Delta P_{\text{вых}} = 290$  мм вод. ст.;
- виброисследование с определением виброперегрузок в плоскостях передней и задней опор двигателя (виброскорости не превышали 8 мм/с при допустимом значении 35 мм/с);
- определение эмиссии СО и NOx в продуктах сгорания двигателя (концентрация NOx – 99,2 мг/нм<sup>3</sup>; СО – 125 мг/нм<sup>3</sup> для сухой пробы при температуре 273,15 К, давлении 0,1013 МПа и условной концентрации кислорода 15%), а также токсичность воздушной среды на расстоянии 20 и 60 м от ТКА (измерения показали полное рассеивание СО и NOx в соответствующих точках измерения);
- определение уровня шумов (на низких частотах уровень шумов намного ниже, чем двигателя-аналога НК-12СТ в предыдущей модификации агрегата);
- испытания на превышение частоты вращения роторов НД, ВД и СТ (двигатель обеспечивает надежную работу при превышении частоты вращения ротора НД на 13%; ВД – на 7,6–7,8% и СТ – на 11,4–11,9%);
- оценка работоспособности системы смазки и суфлирования показала, что она обеспечивает работоспособность двигателя на всех эксплуатационных режимах;
- оценка пусковых свойств двигателя (система обеспечивает стабильный запуск от минус 60 до плюс 45 °С и высотах до 1000 м над уровнем моря);
- проверка системы автоматизированного управления и контроля (система обеспечивает настройку любого режима в диапазоне «малый газ – максимальный режим» и обеспечивает выход и устойчивую работу до  $N_e = 7,68$  МВт);
- проверка влияния максимальных отборов воздуха на параметры двигателя показала устойчивость его работы при соответствующих отборах.

Оценка возможности надежной эксплуатации двигателя в условиях обледенения, а также при попадании воды в его ПЧ показала, что работа двигателя в составе ТКА будет достаточно надежной. Ряд проверок, таких, как оценка устойчивости работы камеры сгорания, оценка температурных полей перед ТВД и ТНД, контролепригодности и технологии изготовления двигателя, а также оценка ремонтпригодности двигателя типа Д-336, осуществлялись с учетом наличия соответствующих данных по авиационным двигателям-прототипам Д-36 и Д-136.

### 3.3. Некоторые особенности испытания вспомогательных систем ТКА

При работе ТКА в составе стенда ЗК проводились также испытания вспомогательных систем агрегата с целью определения: величины гидравлических потерь в ВПТ и выхлопном тракте (ВТ); параметров работы системы вентиляции отсека двигателя; пульсаций давления и скорости потока в сечении канала всасывания непосредственно перед входом потока циклового воздуха в ГТД (см. п.1); экологических характеристик агрегата, в т. ч. шумовых характеристик, и уровня рассеивания выхлопных газов ГТД в зоне расположения ТКА.

Отметим некоторые методические особенности испытаний, результаты которых оказывают непосредственное влияние на термодинамические и энергетические показатели ТКА. В частности, величина гидравлических потерь в ВПТ определяется с использованием дифференциальных водяных манометров при их подключении к камере всасывания ВПТ с помощью специальных штуцеров.

Гидравлические потери в ВТ определялись с использованием специально изготовленных гребенок с цилиндрическими насадками для замера потерь полного давления. Точность замера составляла  $\pm 2$  мм. вод. ст.

Испытания системы вентиляции отсека ГТД при работе всех вентиляторов суммарной мощностью 15 кВт сводились к определению максимальной температуры воздуха в отсеке двигателя в местах расположения различных приборов: светильников, датчика загазованности, датчиков системы пожаротушения.

**Заключение**

Создание блочно-комплектного ТКА на основе ЦК высокого давления и конвертированного ГТД авиационного типа мощностью 6,3 МВт потребовало создания экспериментальной базы для модельных и натурных испытаний, а также освоения методики испытаний и доводки различных систем ТКА. Это позволило освоить производство газоперекачивающего оборудования как для новых КС, так и для модернизации газотранспортных систем Украины и других стран.

**Литература**

1. *Апанасенко, А. И.* Монтаж, испытания и эксплуатация газоперекачивающих агрегатов в блочно-контейнерном исполнении / А. И. Апанасенко, Н. Г. Крившич, Н. Д. Федоренко. – Л.: Недра, 1991. – 361 с.
2. *Парафейник, В. П.* Научные основы совершенствования турбокомпрессорных установок с газотурбинным приводом: Автореф. дис. д-ра техн. наук / В. П. Парафейник – Харьков, 2009. – 41 с.
3. *Стенды для испытаний газоперекачивающих агрегатов типа ГПА-Ц / А. И. Апанасенко, В. П. Парафейник, А.М. Хорощенко, Ю.Л. Рухлов, С.В. Барнев // Хим. и нефт. машиностроение. – 1985. – № 6. – С. 27–28.*
4. *Компрессор центробежный. Программа и методика приёмо-сдаточных испытаний со снятием газодинамических характеристик. 177.0000.000-06 ПМ. – Сумы, ОАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе» – ВНИИГаз. 2003. – 17 с.*
5. *API STANDARD 617. Axial and Centrifugal Compressors and Expander-compressors. Eighth Edition, API Publishing Services. 2014. –386 p.*
6. *Солохин, Э. Л.* Испытание воздушно-реактивных двигателей / Э. Л. Солохин. – М.: Машиностроение, 1975. – 356 с.
7. *Повх, И. Л.* Аэродинамический эксперимент в машиностроении / И. Л. Повх. – М.: Машиностроение, 1974. – 480 с.

Поступила в редакцию 19.10.16

**А. И. Бабаев**

Институт проблем  
машиностроения  
им. А. Н. Подгорного  
НАН Украины, г. Харьков,  
e-mail: babayev\_ai@mail.ru

УДК 621.165

## **АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМБИНИРОВАННЫХ СТОПОРНО- РЕГУЛИРУЮЩИХ КЛАПАНОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН**

*Наведено аналіз сучасних конструкцій комбінованих стопорно-регулюючих клапанів для потужних паротурбінних установок. Порівняльний аналіз дозволив визначити основні переваги та недоліки конструкцій, надійність їх експлуатації. Визначено, що використання наведених конструкцій приводить до зниження гідралічного опору, металосності та значно спрощує компонування вузла паророзподілу*

**Ключові слова:** регулюючий клапан, паророзподіл, парова турбіна.

**Актуальность темы**

Основными элементами системы автоматического регулирования и защиты всех паротурбинных установок являются дроссельно-регулирующие клапаны.

Независимо от конструкции любой клапан обладает гидравлическим сопротивлением, что неизбежно приводит к снижению давления перед проточной частью турбины. При этом за счет снижения располагаемого теплоперепада увеличивается удельный расход топлива.

Одним из современных направлений в проектировании новых турбоустановок является применение комбинированных стопорно-регулирующих клапанов (СРК) в части высокого давления (ВД) и после промежуточного перегрева (ПП) перед частью среднего давления.

Стремление объединить в едином корпусе регулирующий клапан (РК) и стопорный клапан (СК) обусловлено следующими факторами [1]:

– снижением гидравлического сопротивления части паровпуска;

© А. И. Бабаев, 2017