

<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

**Ключові слова:** турбокомпресорний агрегат, відцентровий компресор, газотурбінний двигун, політропний ККД компресора, ефективний ККД двигуна.

УДК 621.515

## ВЫБОР СИСТЕМНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЙ.

### Ч. I. Состояние вопроса и объекты исследования

*Робота присвячена розробці методики вибору системної характеристики турбокомпресорних агрегатів на основі аналізу результатів випробувань стендового і дослідного зразків турбокомпресорних агрегатів потужністю 6,3 МВт, на основі яких було створено нове покоління високоефективних агрегатів типу ГПА-Ц-6,3 А. В ч. I роботи висвітлено стан, а також об'єкти досліджень. Сформульовано вимоги до випробувань окремих систем з метою термодинамічного аналізу характеристик агрегату при його роботі в умовах стенда замкнутого контура.*

### Введение

Блочно-комплектные турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) природного и нефтяного газа на основе конвертированных газотурбинных двигателей (ГТД) и центробежных компрессоров (ЦК) мощностью 4–32,0 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.

В процессе освоения производства агрегатов типа ГПА-Ц-6,3А конструкции СМНПО были проведены натурные испытания двух образцов ТКА с двигателями типа Д-336 мощностью 6,3 МВт: заводские испытания стендового агрегата ГПА-Ц-6,3В/56-1,45 с двигателем Д-336-1 и ЦК НЦВ-6,3/56-1,45, а также испытания опытного образца серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А. На первом этапе работ осуществлялись испытания опытного образца ЦК НЦВ-6,3/56-1,45 типа «баррель», созданного в СМНПО с учетом опыта производства и эксплуатации ЦК аналогичной конструкции мощностью 16 МВт (агрегат ГПА-Ц-16/76-1,44 конструкции Сумского филиала СКБ ТХМ (г. Москва) с двигателем НК-16СТ конструкции НПО «Труд», г. Самара), и двигателя типа Д-336 производства ПАО «Мотор-Сич» разработки ГП «Ивченко-Прогресс» мощностью 6,3 и 8 МВт. Двигатель создан взамен ГТД НК-12СТ конструкции АО «СКБМ» (г. Самара), которым длительное время комплектовался известный агрегат типа ГПА-Ц-6,3М конструкции Сумского филиала СКБ ТХМ с ЦК НЦВ-6,3/56-1,45, созданный Специальным конструкторским бюро по компрессоростроению (СКБ-К, г. Казань) для первого поколения блочно-комплектных агрегатов типа ГПА-Ц-6,3.

### 1. Состояние вопроса

На сегодняшний день системному анализу эффективности рабочего процесса агрегатов типа ГПА-Ц как сложной термодинамической системы, а также блочно-комплектных ТКУ на их основе

© В. П. Парафейник, Н. С. Щербаков, А. А. Рябов, В. В. Шевчук, В. Н. Разношинский, И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, 2016

при работе в составе КС газовой и нефтяной промышленности посвящено значительное количество работ специалистов СМНПО и других организаций [1–7 и др.].

В процессе анализа особенностей конструкции, а также особенностей их рабочего процесса получен ряд принципиально важных результатов:

- обосновано понятие интегральной и системной характеристик агрегата на основе ранее выполненных и новых исследований [1–3]; при этом интегральная характеристика ТКА определяется на основе мощностного баланса ЦК и ГТД с использованием первого закона термодинамики, а системная характеристика агрегата получена на основе первого и второго законов термодинамики в процессе эксергетического анализа особенностей его рабочего процесса.

Под интегральной характеристикой агрегата подразумевается зависимость, отражающая только эффективность процессов выработки механической энергии и сжатия [1]

$$\eta_{\Sigma}^{\text{ТКА}} = \eta_{\Pi}^{\text{ЦК}} \cdot \eta_{\text{е}}^{\text{ГТД}},$$

где  $\eta_{\Sigma}^{\text{ТКА}}$  – интегральный КПД агрегата;  $\eta_{\Pi}^{\text{ЦК}}$  – политропный КПД компрессора;  $\eta_{\text{е}}^{\text{ГТД}}$  – эффективный КПД приводного двигателя в составе агрегата, а под системной характеристикой подразумевается эксергетический КПД агрегата, отражающий эффективность его рабочего процесса с учетом работы всех систем, имеющихся в составе ТКА, в форме [2, 3]

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ТКА}} = \eta_{\text{ex}}^{\text{ЦК}} \cdot \eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}},$$

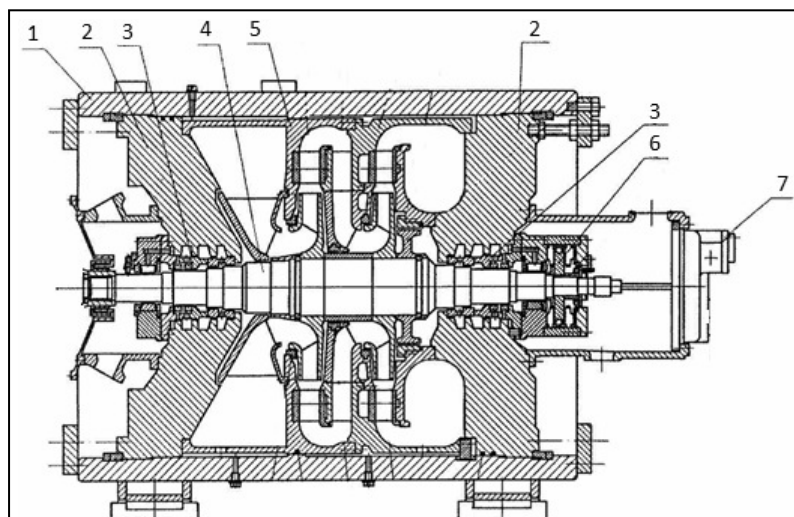
где  $\eta_{\text{ex}}^{\text{ЦК}}$  – эксергетический КПД компрессора как единой системы оборудования, в т.ч. системы охлаждения газа на основе АВО (для двухкорпусного ЦК);  $\eta_{\text{ex}}^{\text{ГТП}}$  – эксергетический КПД газотурбинного привода (ГТП) как единой системы основных и вспомогательных узлов, обеспечивающих эффективную и надежную работу ГТД, т.е. его работу в составе агрегата с учетом систем всаса, выхлопа, смазки, вентиляции, утилизации теплоты выхлопных газов и т.д.;

- разработана методика выбора оптимального КПД агрегата с учетом особенностей изменения характеристик эффективности ЦК и ГТП в диапазоне значений мощностей, соответствующих требуемым режимам эксплуатации [3, 5, 6];
- установлено определяющее влияние характеристик эффективности компрессора и ГТД на соответствие системной характеристики агрегата оптимальному режиму его работы [5];
- установлено влияние различных систем ЦК на его эксергетический КПД [6];
- определена интегральная эффективность агрегатов типа ГПА-Ц различного назначения с ГТД мощностью 6,3–25 МВт, достигающая по величине КПД значения 25–34%.

В последние годы на основе эксергетического подхода [6–12] выполнены исследования в области термотрансформаторов, холодильных, газотранспортных агрегатов и установок, существенно расширяющие возможности термодинамического анализа их эффективности. Это создает предпосылки для развития и совершенствования методологии проектирования ТКА. В работах [12, 13] в процессе анализа схемных решений по созданию дожимных ТКА газовой промышленности предпринята попытка создания обобщенной методики термодинамического анализа эффективности рабочего процесса агрегатов природного газа типа ГПА-Ц конструкции СМНПО. Однако в упомянутой работе не до конца решен вопрос о взаимном влиянии различных систем в составе агрегата на величину потерь эксергии, исходя из понятия деструкции эксергии и различных ее составляющих [8–11], а также влияние основных элементов ТКА на характер изменения системной характеристики агрегата. Актуальным является также вопрос о создании методики термоэкономического анализа схемных решений на предпроектной стадии работ по созданию агрегатов типа ГПА-Ц, что требует проведения дальнейших исследований с использованием экспериментальных данных.

## 2. Объект исследования

В качестве объектов исследования при выборе и анализе системной характеристики блочно-комплектного агрегата типа ГПА-Ц использованы стендовый агрегат ГПА-Ц-6,3В/56-1,45 и опытный образец серийного агрегата ГПА-Ц-6,3А/56-1,45, созданные в СКБ СМНПО для линейных КС магистральных газопроводов. ТКА с различными модификациями компрессоров могут применяться также в качестве дожимных агрегатов и в составе станций подземных хранилищ газа.



**Рис. 1. Центробежный компрессор НЦ-6,3/56В-1,45 мощностью 6,3 МВт:**

- 1 – корпус; 2 – крышки корпуса; 3 – концевые уплотнения ротора;
- 4 – ротор; 5 – статорные элементы; 6 – масляные подшипники;
- 7 – маслонасос системы смазки

Исследуемый агрегат представляет собой автоматизированную установку контейнерного исполнения с ГТД авиационного типа, созданным на основе двигателей Д-36 и Д-136, применяющихся в составе силовой установки наиболее крупного в мире вертолета МИ-26.

По основным энергетическим характеристикам стендовый и опытный образцы агрегата практически не отличаются, т.к. новые конструктивные решения по агрегату затрагивают, в основном, его экологические и эксплуатационные характеристики. Некоторое снижение показателей термодинамической эффективности агрегата может проявиться из-за увеличения гидравлических потерь в двухступенчатом комплексном воздухоочистительном

устройстве (КВОУ) воздухоприемного тракта (ВПТ), а также в связи с изменением конструкции системы вентиляции отсека двигателя, которые введены в конструкцию опытного образца серийного агрегата.

Двухступенчатый компрессор НЦ-6,3/56В-1,45 (рис. 1) является основной функциональной системой агрегата, обеспечивающей его эксплуатационные параметры. Основные проектные параметры компрессора представлены ниже.

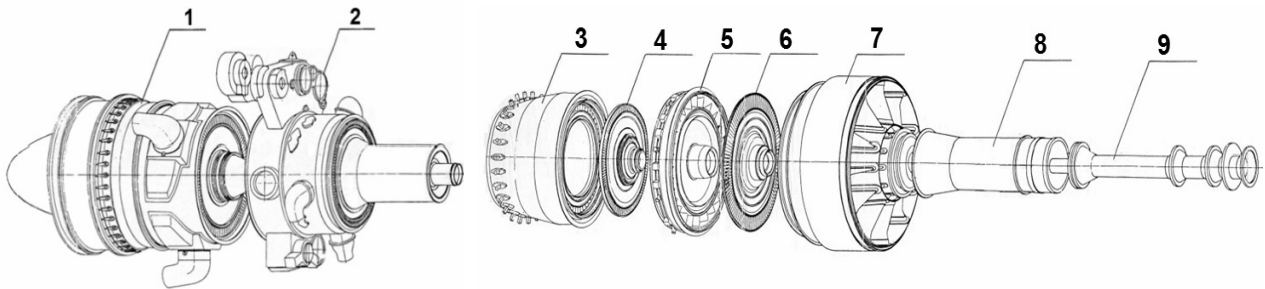
Производительность объемная, по условиям всасывания м <sup>3</sup> /с (м <sup>3</sup> /мин)	3,44 (206,4)
Давление начальное номинальное, МПа (кГс/см <sup>2</sup> )	3,79 (38,6)
Давление конечное номинальное, МПа (кГс/см <sup>2</sup> )	5,49 (56)
Отношение давлений	1,45
Мощность, потребляемая компрессором (на валу свободной турбины (СТ), кВт	
– номинальная	6300
– минимальная	3100
Политропный КПД (рабочего процесса сжатия)	0,85
Температура газа на входе и выходе соответственно, К	288, 320
Частота вращения ротора компрессора расчетная, об/мин	8200
Безвозвратные потери масла в маслосистеме, кг/ч	0,25
Габаритные размеры (l×b×h), мм	2260×1320×1430
Общая масса, кг	9600

Проточная часть исследуемого компрессора является моделью широко известного компрессора НЦ-16/76-1,44 мощностью 16 МВт (коэффициент моделирования равен 0,658).

Как видно из рис. 1, данный ЦК по своей конструкции соответствует особенностям параметрического ряда компрессоров, созданных в СМНПО на основе корпусов типа «баррель», имеющих вертикальный разъем.

Ротор компрессора имеет 2 рабочих колеса (РК) с наружным диаметром  $D_2 = 550$  мм, втулки, думмис и зубчатую полумуфту. Ротор вращается на колодочных подшипниках скольжения 6. Уплотнение ротора и герметизация рабочих полостей ПЧ обеспечивается щелевыми масляными уплотнениями с плавающими кольцами 5.

Как указано выше, ГТД агрегата создан на основе двигателя Д-336-2/1 конструкции ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» [14]. Компоновочная схема двигателя представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Компоновочная схема двигателя модульной конструкции типа Д-336:**

- 1 – компрессор низкого давления (КНД); 2 – корпус промежуточный (главный модуль);  
 3 – камера сгорания (КС); 4 – ротор турбины первой ступени; 5 – корпус опор турбин;  
 6 – ротор турбины второй ступени; 7 – СТ; 8 – балка коническая; 9 – вал ведущий

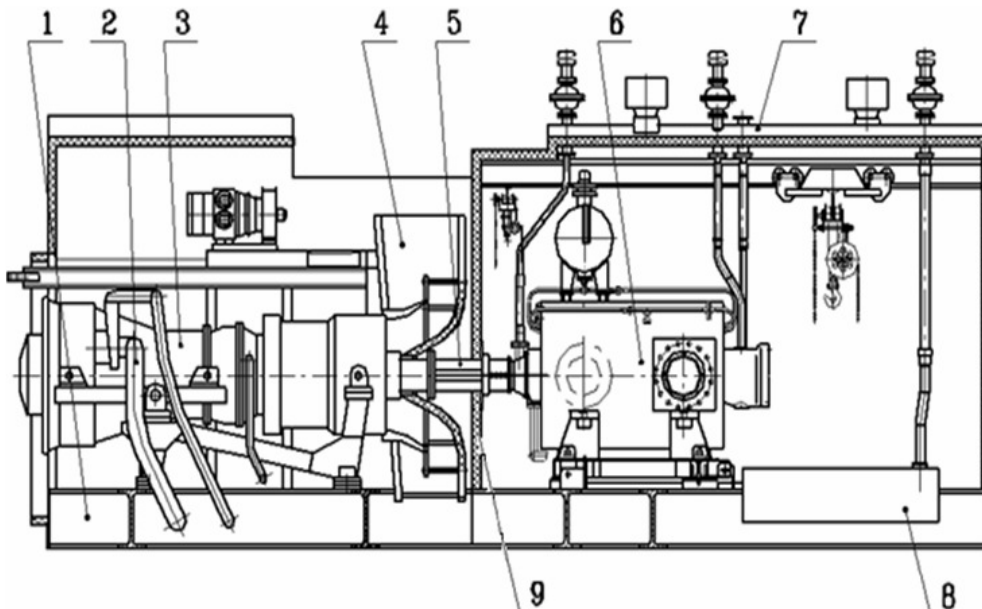
На номинальном режиме работы ( $T_a = 288$  К;  $P_a = 101325$  Па) двигатель Д-336-2/1 имеет следующие характеристики: массовый расход циклового воздуха (ц. в.) 32 кг/с; мощность 6,3 МВт; эффективный КПД 31% (ISO-2314); диапазон вращения СТ 5740 – 8610 об/мин; максимальная частота вращения ротора компрессора высокого давления 13400 об/мин; максимальная температура газов после СТ (ном.) 730 К (457 °С);

Система топливопитания: топливо – природный газ (ГОСТ 28775-90, ГОСТ 5542-2014); давление газа  $P_{вх} = 2,35$  МПа; температура газа  $T_{вх} = 288 – 323$  К; массовый расход топлива 0,4 кг/с.

Масса-габаритные характеристики ГТД: масса 1470 кг; длина 5379 мм; ширина 1068 мм, высота 1227 мм.

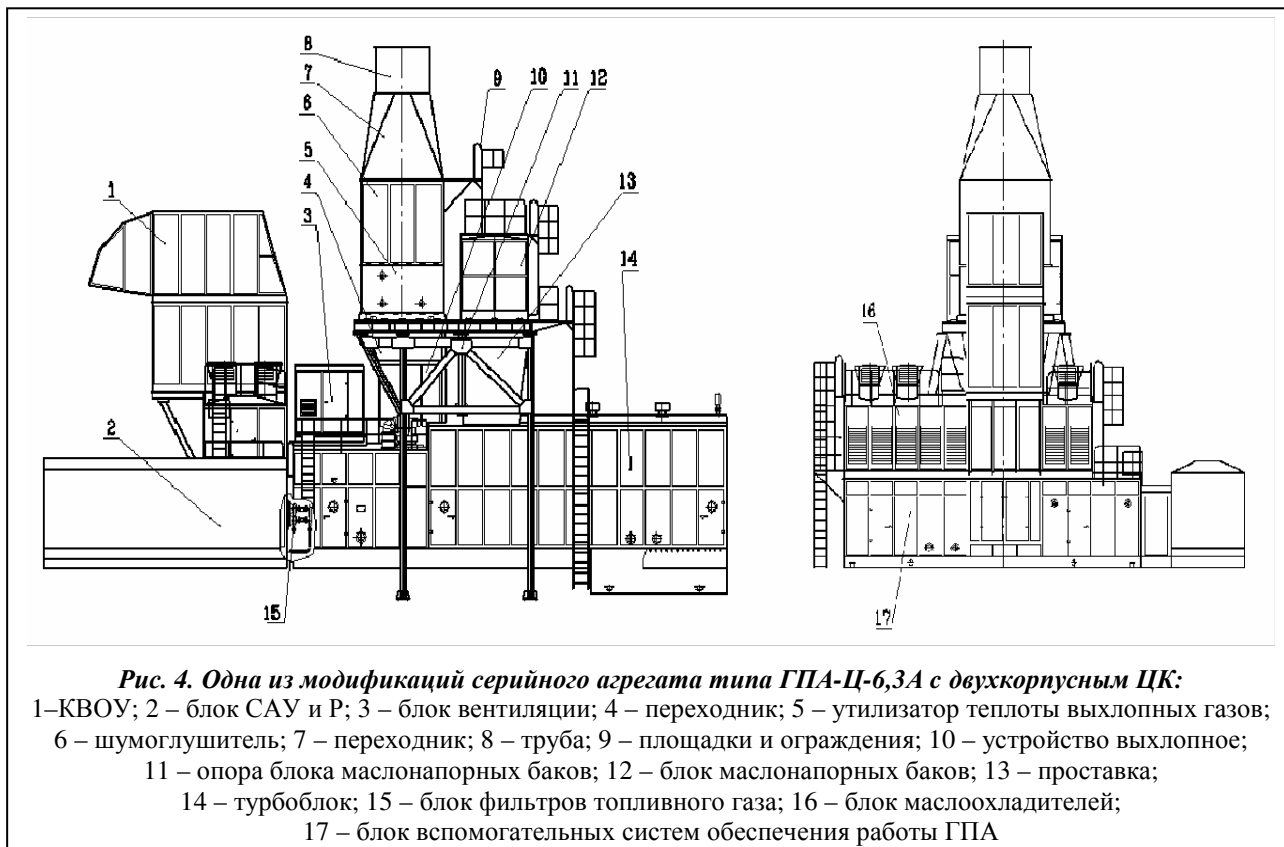
Компрессор и ГТД агрегата, размещаемые на фундаментной раме совместно с элементами силового каркаса, выхлопной системы, систем смазки, топливопитания и запуска, трансмиссией, образуют турбоблок агрегата (рис. 3).

Турбоблок является основным системообразующим блоком ТКА. Он объединяет основные и вспомогательные системы агрегата и обеспечивает реализацию технологического процесса компримирования и транспорта газа.



**Рис. 3. Турбоблок стендового блочно-комплектного агрегата контейнерного исполнения ГПА-Ц-6,3В/56-1,45:**

- 1 – рама; 2 – газопровод; 3 – двигатель Д-336-2/1; 4 – улитка; 5 – вал торсионный;  
 6 – компрессор НЦВ-6,3/56-1,45; 7 – контейнер турбоблока; 8 – маслобак;  
 9 – герметичная перегородка между отсеками ГТД и ЦК



Как видно из рис. 3, все элементы турбоблока располагаются на единой фундаментной раме, что является одним из наиболее характерных решений в конструкции агрегатов конструкции СМНПО. Такое решение предопределяет ряд несомненных преимуществ и достоинств конструкции агрегатов типа ГПА-Ц: высокий уровень заводской готовности, транспортабельность, удовлетворительные виброхарактеристики, низкие трудозатраты при монтаже, сокращение сроков монтажа и ввода агрегатов в эксплуатацию. В то же время процесс создания агрегатов на основе автономных ГТП и отдельных блоков-модулей ЦК предопределяет более широкие возможности по унификации не только компрессорного, но и других типов энергосилового оборудования.

По компоновке оборудования турбоблоки, предназначенные для блочно-комплектных агрегатов контейнерного исполнения для линейных или дожимных КС, практически однотипны (при отсутствии в составе турбоблока мультипликатора), но могут отличаться конструкцией укрытия силового блока (ГТД+ЦК), схемой выкатки ГТД, а также конструктивными размерами мест крепления рам ЦК, ГТД и выхлопной улитки, трассировкой трубопроводных и кабельных систем САУ и Р. Общий вид опытного образца одной из модификаций серийного агрегата типа ГПА-Ц-6,3А показан на рис. 4, а его основные технические характеристики представлены ниже.

Коммерческая производительность при 15 °С, млн. м <sup>3</sup> /сутки	12,0
Температура газа на входе в компрессор, К (°С)	288 (+15)
Давление начальное номинальное, МПа (кг/с/см <sup>2</sup> )	3,79 (38,6)
Отношение давлений	1,45
Повышение температуры газа на нагнетании, К	32±1
Номинальная мощность привода, МВт	6,3
Номинальная частота вращения СТ, с <sup>-1</sup> (об/мин)	136,7 (8200)
Эффективный КПД привода в стационарных условиях, %	30; 29*
Потребление топливного газа, кг/с (кг/ч)	0,42 (1510)
Массовый расход выхлопных газов, кг/с	32
Температура выхлопных газов, К (°С)	704 (431)

Безвозвратные потери масла в маслосистеме, кг/ч	0,3
Потребляемая электрическая мощность при работе в магистраль, кВт	35
Габаритные размеры ( $l \times b \times h$ ), м	14,2×10,3×9,5**
Масса агрегата, т	73,5**
Содержание вредных веществ в выхлопных газах NO <sub>x</sub> , CO, мг/нм <sup>3</sup>	150; 300

\* Величина показателя по ТЗ

\*\* Для стендового агрегата.

Анализ основных характеристик агрегатов типа ГПА-Ц-6,3А показывает, что по экономичности привода они не уступают мировому уровню [15]. По другим показателям соответствуют (массогабаритные показатели) или несколько уступают лучшим мировым образцам (ресурсные показатели, расход масла, содержание вредных примесей в выхлопных газах). Однако с учетом условий работы агрегатов на КС (режимы работы МГ и другие условия) имеется возможность обеспечить требования эффективной эксплуатации ГТД за счет применения различных проектно-конструкторских решений как на стадии создания нового оборудования, так и в процессе реконструкции КС.

Таким образом, анализ конструкции агрегата и его блоков-модулей позволяет отметить особенности, определяющие компоновочную схему агрегата и унифицированных генеральных планов КС, создаваемых на основе блочно-комплектных агрегатов типа ГПА-Ц, а также общий подход к разработке методике термодинамического анализа ТКА контейнерного исполнения:

- Агрегат имеет Т-образную компоновочную схему размещения блоков-модулей на двух уровнях. В отсеках-контейнерах располагается основное и вспомогательное оборудование агрегата.
- Серийный агрегат оснащен двухступенчатым КВОУ циклового воздуха (ц. в.) с фильтрами инерционно-жалюзийного типа и фильтрами тонкой очистки. КВОУ имеет в своем составе СПЦВ двигателя с использованием отборов ц.в. для защиты узлов ВПТ от обледенения.
- ВПТ имеет блок одноступенчатого пластинчатого шумоглушителя на всасе и камеру всасывания в составе блока вспомогательных систем обеспечения работы агрегата, а также защитную решетку перед ГТД.
- Над отсеками блока систем обеспечения с двух сторон блока шумоглушителей в составе ВПТ находятся 2 блока маслоохладителей систем смазки и уплотнения ГТД и ЦК, созданные на основе ПРТ с осевыми вентиляторами вертикальной компоновки (рис. 4).
- Маслосистема агрегата, обеспечивающая смазку и охлаждение опорных узлов ГТД и ЦК, а также работу системы концевых уплотнений ротора ЦК, имеет развитую компоновку, а ее элементы располагаются в отсеках ЦК и ГТД, блоке вспомогательных систем обеспечения работы агрегата и в составе блоков маслоохладителей.
- Шахта выхлопного тракта (ВТ) агрегата с блоком шумоглушителя располагается на крыше турбоблока, что обеспечивает минимальные размеры: фундамента турбоблока, шага агрегатов в составе КС, производственной площадки станции.

Для осуществления обобщенного термодинамического анализа эффективности рабочего процесса ТКА и построения его системной характеристики по параметрам, полученным в процессе испытаний стендового и опытного образцов агрегата, требуются следующие данные [13]:

- экспериментальные – о составе технологического газа в замкнутом контуре; давлениях, температуре и расходах рабочих сред на входе и выходе из основных энерготехнологических систем (ЦК и ГТП);
- газодинамические характеристики ЦК  $\eta_{\text{п}}$ ,  $\psi_{\text{п}} = f(N_{\text{ЦК,СТ}})$ ;
- характеристики эффективности работы ГТД, получаемые на основе пересчета характеристик двигателя, полученных на основе мощностного баланса СТ и гидротормоза в составе испытательного стенда ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс», а также по замеру крутящего момента и параметров электрогенератора стенда ПАО «Мотор-Сич» и баланса мощности СТ и ЦК в составе ТКА, в виде зависимости  $\eta_e = f(N_{\text{СТ}})$ ;
- уровень гидравлических потерь в ВПТ и ВТ;
- баланс теплоты, связанной с повышением температуры технологического газа, отводом теплоты от корпуса ЦК в виде теплоизлучения, ее отдачей в масло от подшипниковых узлов ГТД и ЦК, а также с теплоотводом в АВО систем смазки и технологического газа;

- затраты энергии на теплоотвод из отсека (кожуха) ГТД для его охлаждения;
- доля полезно используемой теплоты выхлопных газов при наличии утилизатора теплоты в составе агрегата;
- дополнительные затраты энергии, связанные с функционированием маслосистемы, системы топливопитания (особенно при наличии специальной компрессорной установки т. г.), бесшмазочной роторной системы (в случае применения бесшмазочного ЦК), системы управления и других систем агрегата.

С учетом указанных данных разрабатывались программы и методики натурных испытаний, а также выполнялись приборное оснащение и методика обработки экспериментальных данных. Интегральный термодинамический анализ, выбор и анализ системной характеристики агрегата осуществляются с использованием полученных экспериментальных данных на основе соблюдения его материального, энергетического и эксергетического балансов.

### Литература

1. Соколов, С. Г. Газоперекачивающие агрегаты с авиаприводом и способы повышения их эффективности / С. Г. Соколов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.; 1984. – 18 с.
2. Парафейник, В. П. Системный подход к анализу режима работы газотурбинного привода турбокомпрессорного агрегата / В. П. Парафейник // Пром. теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 3. – С. 54–61.
3. Системный анализ эффективности блочно-комплектной турбокомпрессорной установки природного газа с авиаприводом / В. П. Парафейник, И. И. Петухов, С. Д. Фролов, Ю. В. Шахов // Вісн. двигунобудування. – 2003. – № 2. – С. 29–36.
4. Прилипко, С. А. Анализ эффективности блочно-комплектной турбокомпрессорной установки природного газа с газотурбинным приводом / С. А. Прилипко, В. П. Парафейник, И. Н. Тертышный // Техн. газы. – 2012. – № 4. – С. 42–50.
5. К вопросу оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа / В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, В. Е. Евдокимов, И. Н. Тертышный // Компрес. техника и пневматика. – 2012. – № 2. – С. 18–25.
6. Анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы / И. Н. Тертышный, В. П. Парафейник, А. Н. Нефедов, С. А. Рогальский // Компрес. и энерг. машиностроение. – 2014. – № 4. – С. 6–10.
7. Сагитов, Р. Р. Повышение эффективности эксплуатации элементов компрессорных станций на базе эксергетического анализа / Р. Р. Сагитов : Автореф. дис. ... канд. тех. наук. – М., 2014. – 167 с.
8. Тсатсаронис, Дж. Взаимодействие термодинамики и экономики для минимизации стоимости энергопреобразующей системы / Дж. Тсатсаронис. – Одесса: Негоциант, 2002. – 152 с.
9. Morosuk, T. A new approach to the exergy analysis of absorption refrigeration machines / T. Morosuk, G. Tsatsaronis // Energy. – 2008. – № 33. – P. 890–907.
10. Термоэкономический подход к диагностике холодильных машин и тепловых насосов / Э. Г. Братута, В. А. Тарасова, Д. Х. Харлампыди, А. В. Шерстюк // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – №5 (145). – С. 39–44.
11. Системно-структурный анализ пароконпрессорных термотрансформаторов / Ю. М. Мацевитый, Э. Г. Братута, Д. Х. Харлампыди, В. А. Тарасова. – Харьков: Ин-т пробл. машиностроения им. А. Н. Подгорного НАН Украины, 2014. – 269 с.
12. Вопросы термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Ч.1. / И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, Е. А. Мирошниченко, В. П. Парафейник // Пробл. машиностроения. – 2015. – Т. 18, № 4/1. – С. 9–17.
13. Вопросы термодинамического анализа эффективности рабочего процесса дожимных газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом. Ч. 2. / И. Н. Тертышный, С. А. Прилипко, В. П. Парафейник // Пробл. машиностроения. – 2016. – Т. 19, № 2. – С. 10–18.
14. Анализ влияния систем газотурбинного привода на эффективность работы турбокомпрессорного агрегата / О. Ф. Муравченко, В. П. Парафейник, С. В. Елифанов, Р. П. Зеленский // Авіац.–косм. техніка і технологія. Зб. наук. пр. Вип.26. Двигуни та енергоустановки. – Харків: Харк. авіац. ін-т, 2001. – С. 24–30.
15. Состояние и проблемы развития механического привода для ГТС Украины / А. А. Халатов, А. А. Долинский, Д. А. Костенко, В. П. Парафейник // Пром. теплотехника. – 2010. – Т. 32, № 1. – С. 44–53.

Поступила в редакцию 19.10.16