

УДК 621.438
doi:10.18720/SPBPU/2/id18-106

Паненко Вадим Григорьевич
Генеральный конструктор-начальник СКБ
info@snpo.ua

Парафейник Владимир Петрович
Ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук
vpp-38@i.ua

Смирнов Андрей Витальевич
Технический директор кандидат технических наук
tkm@snpo.ua

Ушаков Сергей Михайлович
Главный конструктор компрессорного оборудования.
info@snpo.ua

Щербаков Олег Николаевич
Заместитель начальника конструкторского отдела специальных систем ГПА,
кандидат технических наук
shcherbakov.o.n@gmail.com

ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ АГРЕГАТОВ ТИПА ГПА-Ц КОНСТРУКЦИИ ПАО «СУМСКОЕ НПО»

Аннотация. В статье рассмотрены основные направления совершенствования конструкции газотурбинных компрессорных агрегатов (далее ГПА), позволяющие повысить энергоэффектив-

ность и надежность ГПА, а также улучшить их экологические характеристики.

В частности рассмотрены вопросы согласования характеристик центробежного компрессора (ЦК) и газотурбинного привода с целью снижения расхода топливного газа; применения

Ключевые слова: Газоперекачивающий агрегат, газотурбинный привод, центробежный компрессор, согласование характеристик, тепловое состояние, выхлопной тракт, утилизация теплоты, экологические характеристики, каталитическая очистка

Panenko Vadim G.

General technologist, Head of Special Design Bureau
info@snpou.ua

Parafeinik Vladimir P.

Candidate of Engineering Sciences, Leading Researcher
vpp-38@i.ua

Smirnov Andrey V.

Candidate of Engineering Sciences, Technical Director
tkm@snpou.ua

Ushakov Sergey M.

Chief technologist for Compressor Equipment
info@snpou.ua

Shcherbakov Oleg N.

Deputy chief of the special systems technology division
shcherbakov.o.n@gmail.com

PAO "Sumskoe NPO", Sumy, Ukraine

PROSPECTIVE IMPROVEMENT DIRECTIONS OF THE GPA-C TYPES UNITS DESIGNS OF THE PAO "SUMSKOE NPO"

Annotation. The article deals with the improving the gas turbine compressor units design (GPA), allowing to improve energy efficiency and reliability of it, as well as improve their environmental characteristics.

In particular, the issues of centrifugal compressor (CC) and gas turbine drive characteristics coordination in order to reduce fuel gas consumption; the use of energy-efficient technologies, including heat recovery of exhaust gases and gas-oil heat exchanger in the lubrication system and seals CC; ensuring an acceptable temperature mode of the gas turbine engine as part of the power unit; as well as reducing emissions of carbon monoxide with the help of the catalytic purification of exhaust gases usage.

Keyword: Gas pumping unit, gas turbine drive, centrifugal compressor, characteristics matching, thermal condition, exhaust tract, heat recovery, environmental characteristics, catalytic cleaning.

Введение

Турбокомпрессорные агрегаты для газовой промышленности типа ГПА-Ц создаются в ПАО «Сумское НПО» (далее ПАО) на основе центробежных компрес-

соров (ЦК) с давлением 1,26...50,0 МПа и конвертированных авиационных и судовых газотурбинных двигателей (ГТД) мощностью 4,0...25,0 МВт конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Ни-

колаев, Украина), ГП ЗМКБ «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье, Украина), ОАО «КУЗНЕЦОВ» (г. Самара, РФ), ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь, РФ) и ОАО «УМПО» (г. Уфа, РФ). Агрегаты типа ГПА-Ц являются результатом длительного процесса их развития, начиная с 70-х гг. XX столетия. Их модификации, создаваемые в блочно-контейнерном, а также в ангарном исполнении с применением блочно-модульного энерготехнологического оборудования характеризуются разнообразием конструкций и технологических параметров, определяемых характером рабочих процессов и, соответственно, типом ЦК разработки ПАО.

Турбокомпрессорные агрегаты типа ГПА-Ц и ТКА-Ц конструкции, применяются в газовой и нефтяной промышленности Украины, России, Ирана, Узбекистана, Турции, Аргентины и других стран, обеспечивая добычу, транспорт и переработку газообразных углеводородов. Суммарная установленная мощность этого оборудования производства ПАО составляет более десяти миллионов кВт, а расход топливного газа для работы газотурбинного привода (ГТП) составляет заметный объем в топливном балансе стран-потребителей. В связи с этим возрастает актуальность задачи дальнейшего совершенствования всех систем агрегатов этого типа с целью улучшения энергетических и экологических характеристик, повышения ресурса и надежности работы, а также снижения стоимости их жизненного цикла (СЖЦ).

Освоение производства блочно-комплектных компрессорных агрегатов для линейных компрессорных станций (ЛКС) магистральных газопроводов (МГ), а также блочно-комплектных компрессорных установок (КУ) на их основе знаменовало в свое время начало нового этапа в развитии компрессоростроения для газовой и нефтяной промышленности (ГП и НП). Его суть заключалась в том, что благодаря освоению производств агрегатов типа ГПА-Ц удалось резко поднять темпы ввода в эксплуатацию МГ и других объ-

ектов ГП и НП, т. к. сроки сооружения их компрессорных станций (КС) удалось сократить с 1,5...2 лет до 4...6 месяцев. За счет улучшения технических показателей вновь создаваемого оборудования на основе конвертированных ГТД и новых конструкций ЦК удалось в целом поднять не только уровень технического совершенства КС, но и уровень их эксплуатации. Однако в настоящее время перед создателями компрессорного оборудования для ГП и НП возникают новые задачи, требующие неотложного решения:

- снижение энергозатрат, как за счет создания более экономичного энерготехнологического оборудования, так и учета изменившихся режимов эксплуатации МГ при его разработке;

- совершенствование конструкции основных систем агрегатов и установок с целью повышения надежности и ресурса их работы, в частности, ГТД за счет дальнейшего развития принципов конвертирования, а также совершенствования систем ГТП, обеспечивающих их эффективную эксплуатацию (воздухоприемного тракта, выхлопных систем, шумоглушения и т.д.);

- улучшение экологических характеристик агрегатов по химическому, шумовому и тепловому загрязнению окружающей среды;

- дальнейшее повышение уровня автоматизации агрегатов и установок, а также совершенствование конструкции энерготехнологического оборудования с целью внедрения безвахтенного обслуживания оборудования на КС в отдаленных регионах их эксплуатации;

- развитие методов проектирования компрессорных агрегатов и установок как сложных энергопреобразующих объектов с целью оптимизации основных технических параметров и режимов их работы.

1. Создание ГПА на основе новых конструкций ЦК

Основными направлениями снижения энергозатрат при работе агрегата, т. е.

повышения его экономичности является, как известно, повышение КПД двигателя, ЦК, а также экономия вторичных энергоресурсов, в т. ч. путем утилизации теплоты выхлопных газов ГТД. В настоящее время для крупных многоцеховых ЛКС мощностью 300 тыс. кВт и более существует тенденция к повышению единичной мощности ГПА для уменьшения количества агрегатов в составе КС с целью сокращения эксплуатационных затрат и общей СЖЦ оборудования. Это возможно, в первую очередь, за счет повышения экономичности ГТД при увеличении их единичной мощности. Кроме того, с момента ввода ЛКС в эксплуатацию существенно изменяются режимы их работы [1]. В связи с этим стано-

вится актуальным применение в составе ГПА низконапорных ЦК с $\text{пк} \leq 1,35$, для которых целесообразно применение высокоэффективных проточных частей, обеспечивающих политропный КПД 89...90%. Для примера в таблице 1 представлено сопоставление двух агрегатов, создаваемых на основе ГТД судового типа ДУ80Л и ДУ 32, конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев). Один из агрегатов типа ГПА-Ц-25С оснащен 2-х ступенчатым компрессором ЦК352ГЦ2-715/56-М2 традиционной конструкции ПАО, а второй типа ГПА-Ц-32С мощностью 32 МВт может быть оснащен одноступенчатым компрессором К421ГЦ2-925/56-76М1 новой конструкции (Рис. 1).

Таблица 1

Основные конструктивные и энергетические показатели ГПА, оснащенных ГТД и газовыми компрессорами различной мощности

Показатели	ГПА	Тип агрегата	
		ГПА-Ц-3	ГПА-Ц-25С
Тип привода*		ДУ 32А	ДУ 80
Мощность привода, МВт		32,0	25,0
Эффективный КПД ГТД, %		38,2	35,1
Производительность коммерческая (при 20 °С), млн. м ³ /сутки		85	63,6
Отношение давлений в ЦК		1,35	1,35
Количество ступеней и схема компрессора		1 Консольная с оригинальной ПЧ	2 Унифицированная с проходным валом
Диаметр РК, мм		1065	835
Политропный КПД ЦК, %		90	86
Частота вращения, об/мин		5340	4900
Расход топливного газа в ГТД, кг/ч (кг/сут)		5985 (143640)	5268 (126432)
Относительный расход топливного газа (кг т. г./млн. м ³ технол. г.)		1690	1987

* Показатели ГПА мощностью 32 МВт анализировались для конструкций ГТД, создаваемых в ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь) и ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев).

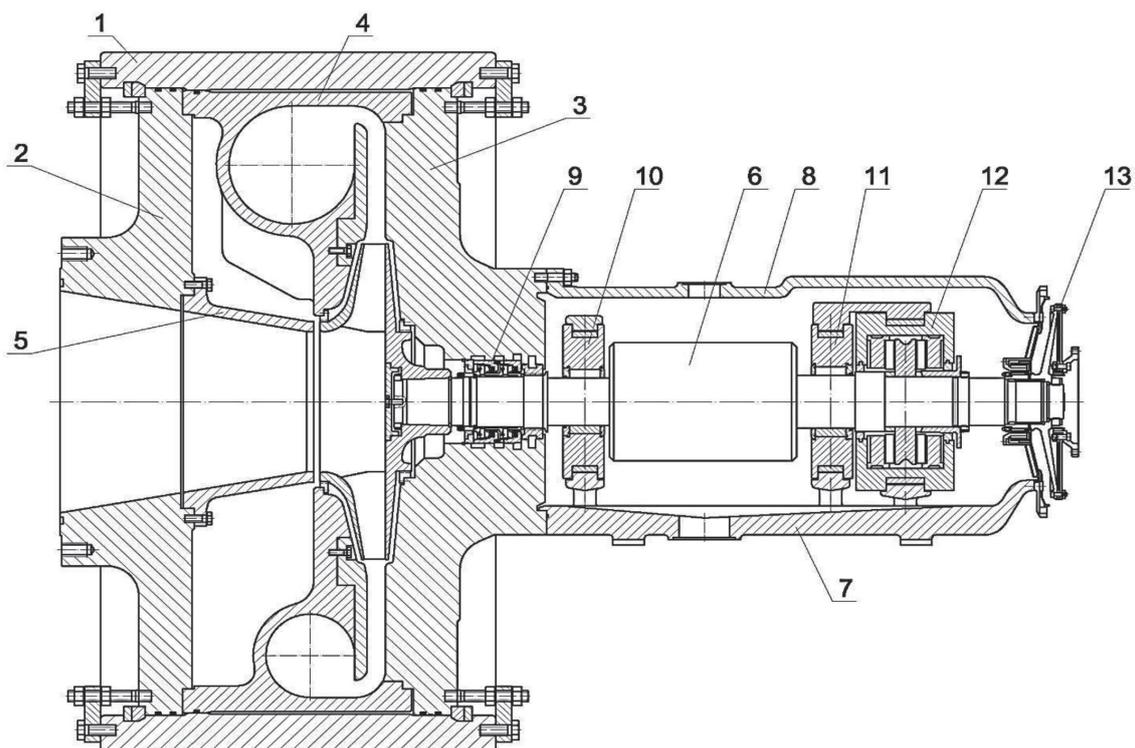


Рис. 1. Продольный разрез корпуса сжатия одноступенчатого компрессора конструкции ПАО: 1 – корпус; 2 – крышка передняя; 3 – крышка задняя; 4 – улитка; 5 – проставка; 6 – ротор; 7 – корпус подшипников; 8 – крышка; 9 – ТГДУ; 10 – подшипник опорный передний; 11 – подшипник опорный задний; 12 – подшипник упорный; 13 – полумуфта.

На основе данных табл. 1 видно, что применение новой конструкции ЦК мощностью 32 МВт с более эффективным приводным ГТД позволит экономить до 15% топливного газа на сжатие технологического газа, что позволяет говорить о достаточно высокой привлекательности такого ГПА для заказчика при реконструкции действующих и строительстве новых КС.

Следует отметить, что для конструкции двухступенчатых ЦК с корпусом типа «баррель», в которых источником значительных потерь служат всасывающая и кольцевая сборные камеры, а также обратно-направляющий аппарат между ступенями, ηп составляет, как правило, не более 86...87% на проектном режиме. Поэтому применение в составе нового агрегата компрессора с поллитропным КПД ПЧ до 90% позволяет, наряду с повышением КПД двигателя (табл. 1), существенно повысить эффективность ГПА и снизить СЖЦ.

Новая конструкция ЦК мощностью 32 МВт разработана в ПАО с использова-

нием оригинальной ПЧ, газодинамический проект которой выполнен кафедрой КВХТ С.-ПбГПУ [2-4]. Конструкция одноступенчатого ЦК с консольной схемой расположения рабочего колеса (РК) для агрегатов ЛКС, представленная на рис. 1, обладает следующими преимуществами по сравнению с традиционной схемой компрессора: высокий поллитропный КПД ПЧ; широкая зона эффективной работы при удовлетворительном запасе по помпажу; повышенная виброустойчивость ротора; единичный комплект торцевых газодинамических уплотнений (ТГДУ) вала ротора; незначительный расход буферного газа и разделительного воздуха для работы ТГДУ; пониженные выбросы технологического газа в атмосферу.

Основным недостатком консольной схемы компрессора является неуравновешенная осевая сила, действующая на ротор при заполнении газового контура, а также при остановках агрегата без стравливания газа. В связи с этим в СКБ ПАО

проведены экспериментальные исследования на специальном стенде масляных упорных подшипников, результаты которых позволяют обеспечить надежную работу упорного узла ротора вновь создаваемых ЦК.

Экспериментальное исследование и доводка модельного ЦК с целью получения ПЧ базовой модификации компрессора выполнено в СКБ ПАО на специально разработанном для этих целей аэродинамическом стенде открытого контура АДС-1250 [2]. Газодинамические характеристики, полученные расчетным и экспериментальным путем, представлены на рис. 2. Следует отметить, что проектная характеристика ПЧ была получена в С-ПбГПУ методом универсального моделирования. В связи с этим на стадии проектирования модельного ЦК в СКБ ПАО был выполнен расчет газодинамической характеристики с применением вычислительного комплекса ANSYS CFX. Как видно из рис. 2, в обоих случаях было достигнуто удовлетворительное совпадение расчетных характеристик, как по коэффициенту напора, так и по КПД. Результаты численного моделирования двумя методами хорошо согласуются с экспериментальными данными. Максимальное

расхождение по величине коэффициента политропного напора не превышает 2 %, а по величине КПД – 5 % абсолютных [3].

Следует подчеркнуть, что в точке характеристики, соответствующей проектному режиму работы ЦК, значение $\eta_{\text{п}}$ компрессора достигает 90% и соответствует уровню лучших мировых образцов компрессорной техники для ЦК такого назначения, а запас по помпажу составляет $\approx 40\%$.

При разработке компрессора, представленного на рис. 1, учтен обширный опыт, накопленный в СКБ ПАО при создании традиционных конструкций компрессоров высокого давления в корпусах типа «баррель», а также новые результаты, полученные при выполнении НИР и ОКР [3], а также результаты экспериментальных работ [4, 5]. В процессе анализа результатов работ по созданию нового высокоэффективного ГПА, а также изменившихся режимов работы МГ Украины и России был рассмотрен вопрос о целесообразности применения новой ПЧ в качестве базовой для создания параметрического ряда ЦК мощностью 6,3...32,0 МВт на различные давления при $P_{\text{к}}=4,02...5,49$ и 7,45 МПа и $\pi_{\text{к}} \leq 1,35$ (таблица 2). Анализ полученных данных

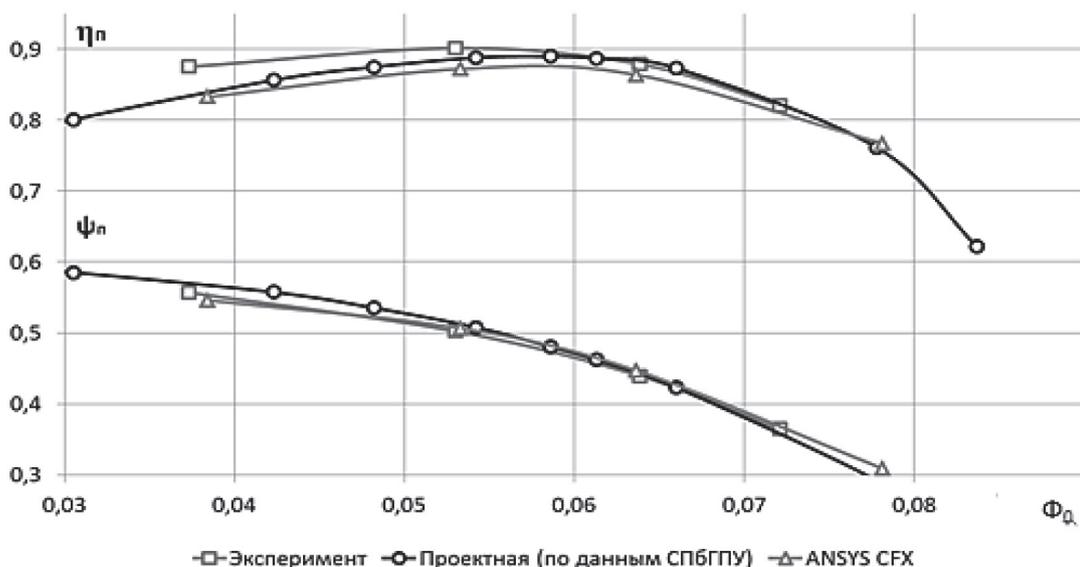


Рис. 2. Безразмерные газодинамические характеристики модельной проточной части одноступенчатого ЦК

Параметрический ряд ЦК для ЛКС на основе одноступенчатой высокоэффективной ПЧ

Мощность привода, МВт	Наличие мультипликатора	P _к =4,02 МПа				P _к =5,49 МПа				P _к =7,45 МПа			
		n, об/мин	D ₂ , мм	η _к , %	ΔΦ _к , %	n, об/мин	D ₂ , мм	η _к , %	ΔΦ _к , %	n, об/мин	D ₂ , мм	η _к , %	ΔΦ _к , %
6,3	+	9200	640	89,6	4,8	11000	535	89,7	2,7	13500	445	89,7	-1,3
	-	8200	695	88,5	-14	8200	675	85,7	-30	-	-	-	-
8	+	-	-	-	-	9500	620	89,6	3,4	10500	545	89,5	5,5
	-	8200	720	89,6	-2	8200	685	88,1	-17	-	-	-	-
10	+	8000	750	89,7	0,3	-	-	-	-	10000	575	89,5	4,9
	-	9000	715	88	+13	9000	655	89,7	-1	9000	655	89	-10
12	+	-	-	-	-	8000	740	89,7	2,5	9000	645	89,7	3,3
	-	6500	900	89,5	-5	6500	855	87,7	-19	-	-	-	-
16	+	6000	1000	89,7	0,3	7000	855	89,7	0,1	7500	756	89,6	-4,2
	-	5200	1100	88,6	-14	5200	1055	86	-28	-	-	-	-
25	+	-	-	-	-	6000	1010	89,6	4,6	6500	910	89,7	2,5
	-	5000	1170	89,7	1,6	5000	1145	89	-9	5000	1090	87,1	-23
32	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	5340	1110	89,7	-1,5	5340	1065	89,7	0,1

показывает, что параметрический ряд ЦК мощностью $6,3 \div 32$ МВт на основе высокоэффективной одноступенчатой ПЧ покрывает практически весь диапазон конечного давления и мощности, характерных для ЛКС [5]. На его основе могут создаваться ГПА с приводом различной мощности для вновь сооружаемых и реконструируемых ЛКС, укомплектованных агрегатами устаревшей конструкции.

Таким образом, предлагаемая конструкция высокоэффективного ЦК, с использованием которого могут быть созданы ГПА для ЛКС различной мощности и производительности, отражает тенденцию возврата к машинам, применявшимся на первом этапе развития газовой промышленности в СССР (газотурбинные и электроприводные ГПА с нагнетателями НЗЛ типа 280). Однако известная конструктивная схема ЦК может быть реализована на более высоком техническом уровне: высокоэффективная ПЧ, ТГДУ, корпус типа «баррель», обеспечивающий технологичность изготовления компрессора и удобство эксплуатации.

2. Состояние развития ГТП и перспективы создания турбокомпрессорных агрегатов на основе конвертированных ГТД авиационного и судового типа

Под газотурбинным приводом (ГТП) для ГПА газовой и нефтяной промышленности подразумевается комплекс оборудования, создаваемого на основе ГТД, и обеспечивающего его эффективное функционирование в составе КС ГП или НП. Развитию и совершенствованию ГТП на основе конвертированных ГТД для блочно-комплектных ГПА (ТКА) способствовали следующие факторы [6, 7]:

- значительная потребность ГП и НП в газотурбинной компрессорной технике;
- обширная номенклатура современных авиационных и судовых ГТД в отечественном двигателестроении, позволившая реализовать производство промышленных ГТД в качестве механического и энергетического привода;

- высокий уровень технических показателей двигателей (экономичность, технологичность производства, уровень автоматизации, надежность и т. д.), обеспечивающих создание высокоэффективного ГТП для ТКА и электростанций;

- высокий уровень совершенства и доводки узлов и систем ГТД простого рабочего цикла, как изделий авиационной и судовой техники, имевших значительные резервы для создания современных изделий общепромышленного применения;

- возможность создания на основе существующих конструкций ГТД высокоэкономичных, транспортабельных, с высоким уровнем заводской готовности, высокоавтоматизированных ГПА (ТКА) в блочно-контейнерном и ангарном исполнении;

- широкое применение конвертированных ГТД в качестве механического и энергетического привода в различных отраслях промышленности передовых стран;

- возможность организации серийного производства ГТД и ГТП в составе ТКА на основе уже существовавших производственных мощностей в отечественном машиностроении в 60-х...70-х гг. прошлого столетия.

Имеющиеся конструкции ГТД позволили создать мощностной ряд ГТП в диапазоне $4,0 \dots 32,0$ МВт и более с эффективным КПД привода в составе агрегата $28,6 \dots 37,5\%$, соответственно, что существенно превышало экономические показатели ГТД промышленного типа, эксплуатируемых в 60-х...70-х годах XX века в составе компрессорных агрегатов.

В тоже время существующие конструкции ГТД с простым рабочим циклом авиационного и судового типа имели ряд недостатков, обусловленных спецификой их применения в авиации и кораблестроении. Основными из них являются: ограниченные показатели ресурса в условиях непрерывной наземной эксплуатации; неудовлетворительные экологические характеристики существующих конструкций ГТД по химическому, тепловому (см. табл. 3) и шумовому загрязнению (со сто-

Мощность тепловых выбросов различных конструкций ГПА

Тип агрегата	ГПА-Ц-6,3М	ГПА-Ц-4А	ГПА-Ц-6,3А	ГПА-Ц-10П	ГПА-Ц-16С	ГПА-Ц-16П	ГПА-Ц-16К	ГПА-Ц-25
ГТД (ГТУ)	НК-12СТ	Д-336-1-4	Д-336-1/2	ГТУ-10П	ДГ90Л2.1	ГТУ-16П	ГПУ-16К*	НК-36СТ
Мощность выбросов, МВт	22,1	10,8	13,4	17,6	28,0	30,0	21,6	43,7

роны всасывающего тракта 120...135 дБА, со стороны выхлопа – 115...120 дБА) окружающей среды. Первый из указанных недостатков может быть устранен при дальнейшем развитии принципов конвертирования авиационных и судовых ГТД. В связи с этим требуется внедрение в двигателестроении принципов конструирования промышленных ГТД при создании корпусов, камер сгорания, систем механизации проточной части осевых компрессоров и турбин, а также конструкции опор роторов.

Обеспечение экологических характеристик ГТП турбокомпрессорных агрегатов требует создания новых конструкций камер сгорания (в части снижения выбросов по NOx) и выхлопных систем с использованием систем каталитической очистки выхлопных газов от СО, улучшения новых компоновочных схем агрегатов и средств шумоглушения в составе воздухоприемного и выхлопного трактов, турбоблока агрегата (в части снижения уровня шумового загрязнения). Более сложными для решения являются вопросы, связанные со снижением теплового загрязнения, т. к. это требует усовершенствования рабочего процесса ГТП на основе ГТД со сложным рабочим циклом.

Как видно из представленных данных (табл. 3), мощность тепловых выбросов существенно зависит от экономичности ГТД (при мощности 6,3 МВт для ГТД НК-12СТ при $\eta_e=26\%$ $N_{т.в.}=22,1$ МВт; для ГТД Д-336-1/2 при $\eta_e=30\%$ $N_{т.в.}=13,4$ МВт). Особенно наглядно это наблюдается при сравнительном анализе агрегатов типа

ГПА-Ц-16, оснащенных ГТД простого цикла (ГПА-Ц-16С и ГПА-Ц-16П) и парогазовой приводной установкой ГПУ-16К со сложным рабочим циклом типа «Водолей» (табл. 3), эффективный КПД которой на проектном режиме составляет 42,5% в составе агрегата [8].

Следует отметить, что ГТД простого рабочего цикла для промышленного применения благодаря современному развитию газотермодинамики, материаловедения и уровню конструирования узлов и систем двигателей по экономичности достигли достаточно высокой степени совершенства, а на их основе с применением ЦК созданы высокоэффективные блочно-комплектные компрессорные агрегаты различного назначения. Эффективный КПД промышленных ГТД в составе агрегатов достигает 35...37%, а наработка на отказ 6000...9000 часов и более. Они имеют высокий уровень автоматизации, удовлетворительное значение коэффициента готовности и уровня ремонтнопригодности в условиях КС и заводов-изготовителей. Комплексные показатели надежности работы некоторых модификаций агрегатов типа ГПА-Ц мощностью 8...16 МВт представлены в таблице 4 [9].

Дальнейшее совершенствование показателей энергетического совершенства ГПА (ТКА) может быть направлено на использование системного подхода к анализу их параметров на стадии предпроектных НИР с целью оптимизации характеристик ГПА (ТКА), ЦК и ГТП, а также новых конструкций ЦК природного газа [10], применения ГТД сложных рабочих

Комплексные показатели надежности работы ГПА [9].

Типа агрегата	Тип ГТД	Коэффициент готовности (K_r)	Коэффициент технического использования ($K_{ти}$)	Наработка на отказ (T_o), час
ГПА-Ц-16С	ДЖ59 ДГ90	0,932	0,836	6755
ГПА-Ц-16АЛ	АЛ-31СТ	0,633	0,543	3012
ГПА-Ц-8	АИ-336-2 НК-14СТ	0,889	0,722	10818
ГПА-Ц-10	НК-14СТ	0,516	0,455	21146

циклов, дальнейшего совершенствования конструкций воздухоприемного тракта двигателя, турбоблока (блока силового), выхлопного тракта, а также других систем и узлов [7, 8, 10–12].

Одним из наиболее реальных и перспективных направлений повышения энергетической эффективности ГТП является освоение различных схем сложных рабочих циклов ГТД. На рис. 3 представлена схема ГТД с промежуточным охлаждением циклового воздуха в осевом компрессоре газогенератора (поз. 1, 2 рис. 3) с использованием вихревого испарителя-конденсатора (поз. 8), для работы которого используется водяной конденсат, получаемый в вихревом конденсаторе-сепараторе (поз. 10), который установлен в выхлопной шахте ТКА. Вихревой конденсатор-сепаратор обеспечивает улавливание и конденсацию паров воды, используемых при энергетическом и экологическом впрыске пара, вырабатываемого в котле-утилизаторе (поз. 11) и подаваемого в соответствующие рабочие зоны камеры сгорания ГТД (поз. 3).

Схемы вихревых аппаратов, предлагаемых для реализации сложного рабочего цикла ГТД, создание которых возможно на основе двигателей типа Д-336 и АИ-336-10 конструкции ГП «Ивченко-Прогресс» разработаны на кафедре аэрокосмической теплотехники Национального аэрокосмического университета – «ХАИ»

(г. Харьков) под руководством д. т. н., проф. Фролова С. Д. [13, 14].

Техническая документация на создание газотурбинного привода ГТУ-16Р мощностью 16 МВт для привода ЦК природного газа на основе ГТД сложного рабочего цикла (рис. 4) разработана ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев) [12]. В составе ГТУ предполагается применение теплообменника-регенератора с гладкотрубной теплообменной поверхностью, обеспечивающей коэффициент регенерации 0,84...0,85. Промежуточное охлаждение циклового воздуха в осевом компрессоре газогенератора при этом не предусматривается. Эффективный КПД такого ГТП достигает 40,3% [12].

Следует отметить, что создание высокоэффективного промышленного ГТП на основе ГТД последних поколений авиационного или судового типа с регенерацией тепла малоперспективно в связи с тем, что эти двигатели последних поколений имеют большую степень сжатия и высокую температуру циклового воздуха на выходе из осевого компрессора газогенератора. В связи с этим в качестве базового ГТД при создании ГТП с использованием регенеративного цикла целесообразно выбирать двигатели, имеющие высокий уровень надежности и умеренные параметры цикла (например, двигатель авиационного типа НК-16СТ или двигателя

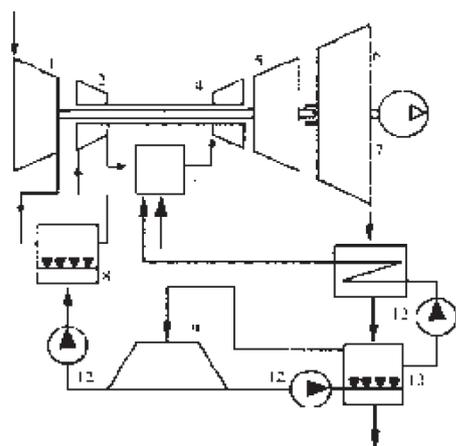


Рис. 3. Схема ГТП сложного цикла с системой ввода и регенерации воды:

1 – компрессор низкого давления; 2 – компрессор высокого давления; 3 – камера сгорания; 4 – турбина высокого давления; 5 – турбина низкого давления; 6 – свободная турбина; 7 – ЦК; 8 – вихревой испаритель-конденсатор; 9 – скруббер; 10 – вихревой конденсатор-сепаратор; 11 – котел-утилизатор; 12 – насос конденсата

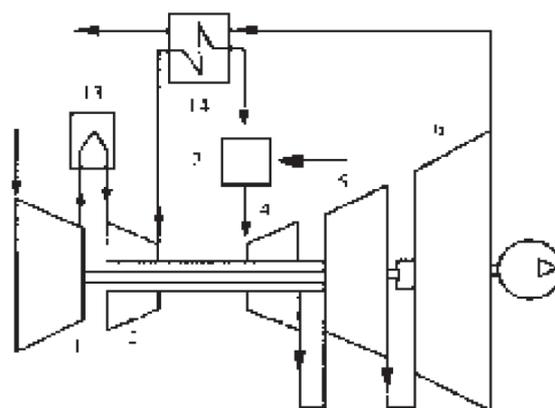


Рис. 4. Схема ГТП сложного рабочего цикла с теплообменником-регенератором и промежуточным охладителем циклового воздуха:

1 – компрессор низкого давления; 2 – компрессор высокого давления; 3 – камера сгорания; 4 – турбина высокого давления; 5 – турбина низкого давления; 6 – свободная турбина; 7 – ЦК; 13 – промежуточный охладитель; 14 – газоздушный регенератор

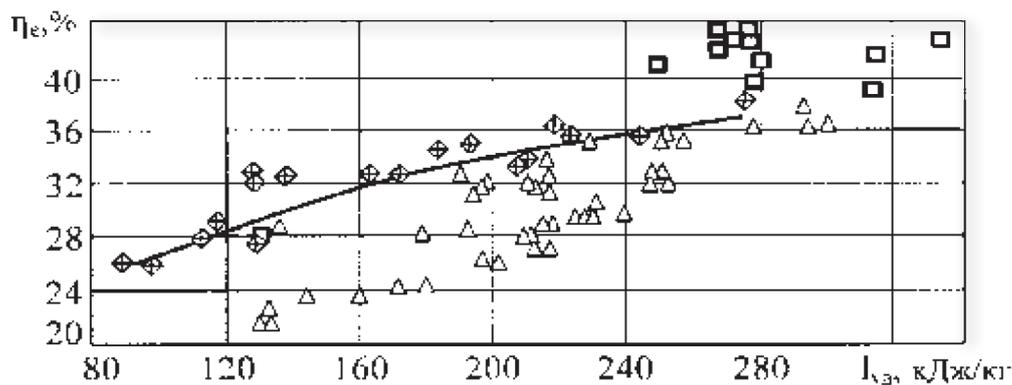


Рис. 5. Сопоставление обобщенных показателей эффективности ГТП простого и сложного цикла: Δ – ГТП простого цикла; \diamond – ГТП сложного цикла с регенерацией теплоты выхлопных газов; \square – ГТП сложного цикла с промежуточным охлаждением циклового воздуха и регенерацией теплоты выхлопных газов

судового типа ДЖ59 и ДГ90). При использовании двигателей последних поколений, имеющих двухкаскадный осевой компрессор целесообразно использование промежуточного охлаждения циклового воздуха между КНД и КВД. В целом имеющиеся данные показывают, что ГТД простого рабочего цикла с учетом требований по ресурсу и надежности в составе

ГПА (ТКА) практически достигли предельного уровня $\eta_e=0,37...0,39$ [15, 16].

Дальнейшее повышение КПД и ресурса возможно на основе углубленного развития принципов конвертирования и реализации различных схем сложного рабочего цикла. Как показано на рис. 5, где представлены данные работ [11, 12, 14-17], существенное повышение η_e до уровня

43...44% и выше может быть реализовано на основе схемы ГТП, приведенной на рис. 4, с регенеративным подогревом и межкаскадным охлаждением циклового воздуха.

3. Повышение эффективности вспомогательных систем ГПА

Задачи совершенствования вспомогательных систем ГПА весьма разнообразны и наукоемки. Основными из них являются:

- совершенствование воздухоприемных трактов ГТД, обеспечивающих очистку циклового воздуха, шумоглушение, защиту воздухоприемного тракта от обледенения, а также равномерность полей давления, скоростей и температур на входе в двигатель в условиях различных природно-климатических зон и широком диапазоне режимов эксплуатации ГПА;
- обеспечение требуемого температурного режима, пожаро- и взрывобезопасной работы ГТД, а также вспомогательного оборудования;
- отвод и утилизация теплоты выхлопных газов с минимальными потерями полезной мощности, вырабатываемой ГТД;

- создание наиболее рациональных схем подачи, охлаждения (подогрева) и очистки смазочного и уплотнительного масла в маслосистеме двигателя и ЦК;

- обеспечение требуемых экологических характеристик по химическому, тепловому и акустическому загрязнению окружающей среды;

- обеспечение автоматического управления, регулирования и защиты, а также технического диагностирования различных систем в процессе их функционирования в составе ГПА.

Основным системообразующим блоком-модулем в составе ГПА конструкции ПАО является турбоблок, в котором в отдельных отсеках установлены ЦК и ГТД с элементами вспомогательных систем (рис. 6).

Для снижения уровня шума, а также защиты персонала и оборудования КС от теплового излучения, возникающего при работе ГТД, двигатель совместно с газотводным устройством, элементами системы смазки, трубопроводами топливного газа, контрольно-измерительными приборами и средствами электромонтажа устанавливается в КШТ, входящем в со-

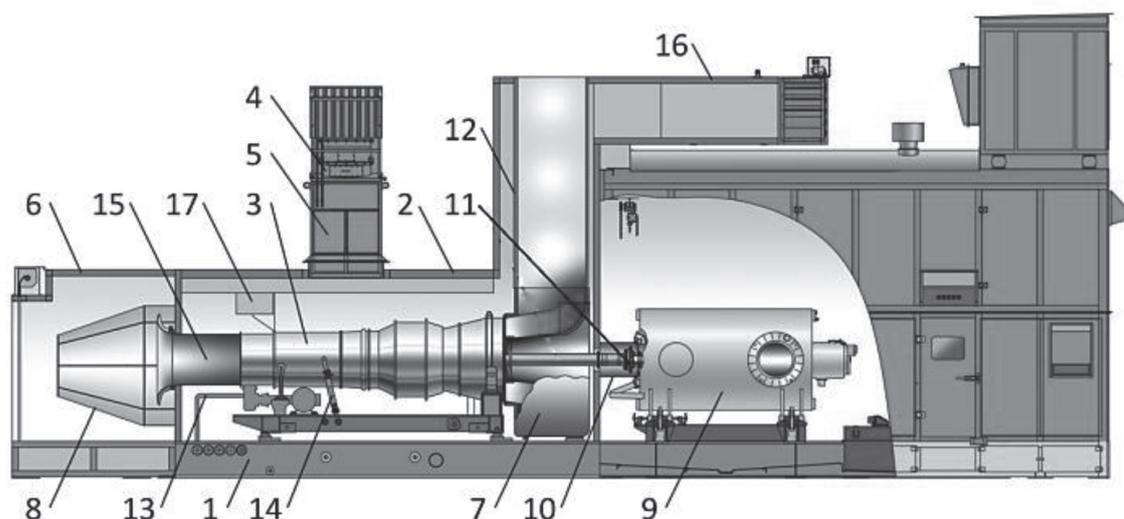


Рис. 6. Турбоблок агрегата типа ГПА-Ц-16С блочно-контейнерного исполнения: 1 – рама; 2 – кожух шумотеплоизолирующий (КШТ); 3 – ГТД; 4 – блок вентиляции; 5 – шумоглушитель всаса воздуха; 6 – воздуховод всасывания воздуха ГТД; 7 – улитка; 8 – защитная сетка; 9 – ЦК; 10 – кожух муфты; 11 – муфта; 12 – переходник улитки; 13 – элементы системы смазки ГТД; 14 – трубопровод топливного газа; 15 – уравнивательная труба; 16 – воздуховод сброса воздуха из КШТ; 17 – система распределения вентиляционного воздуха

став блока силового (БС). Для обеспечения приемлемых температурных условий работы двигателя и вспомогательного оборудования БС, используется система механической вентиляции. Конструктивной особенностью БС конструкции ПАО является наличие специальной системы для распределения вентиляционного воздуха внутри КШТ [18]. Проектирование системы вентиляции выполнено на основе результатов численного моделирования [18, 19], а также с использованием экспериментальных данных, полученных совместно со специалистами Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» при натурных исследованиях теплового состояния БС на КС [20].

Для очистки циклового воздуха ГТД от механических примесей, капельной влаги, снега во всасывающем тракте ГПА установлено воздухоочистительное устройство (ВОУ). В зависимости от природно-климатической зоны и условий запыленности агрегаты конструкции ПАО комплектуются 2-х ступенчатыми ВОУ накопительного или инерционно-накопительного типа собственной разработки. По желанию Заказчика агрегаты могут также комплектоваться ВОУ производ-

ства ведущих мировых компаний (AAF, Donaldson и др.).

На рис. 7 представлено ВОУ накопительного типа для агрегатов типа ГПА-Ц-16 с ГТД НК-16СТ. В качестве первой ступени очистки в ВОУ накопительного типа используются фильтры грубой очистки класса G4 согласно EN 779, в качестве второй – компактные фильтры накопительного типа класса F7...F9. Количество фильтров рассчитано исходя из условий запыленности и обеспечения заданного ресурса работы не менее 3000 часов (на номинальном режиме работы ГТД). Конструкция ВОУ унифицирована для применения с различными типами двигателей. Параметрический ряд ВОУ представлен пятью типоразмерами, конструктивно отличающихся количеством установленных фильтров и воздухозаборников в зависимости от расхода циклового воздуха.

С целью обеспечения приемлемого ресурса работы фильтров тонкой очистки для природно-климатических зон полупустыни и пустыни, а также для других регионов, в которых фактическая среднегодовая запыленность атмосферного воздуха выше 0,68 мг/м³, агрегаты конструкции ПАО комплектуются следующими типами ВОУ:

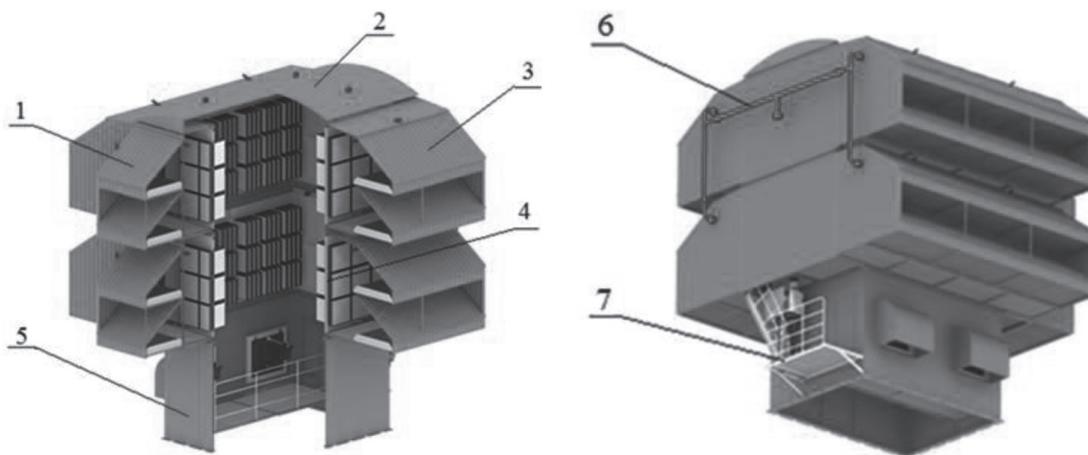


Рис. 7. ВОУ накопительного типа для агрегата ГПА-Ц-16:

- 1 – воздухозаборник; 2 – крыша; 3 – воздухозаборник; 4 – камера ВОУ;
5 – камера аварийного забора воздуха; 6 – противообледенительная система; 7 – площадки обслуживания

- инерционно-накопительного типа с жалюзийными сепараторами, принудительным отсосом пыли и воздушными фильтрами тонкой очистки;

- с самоочищающимися фильтрами (с импульсной очисткой воздуха) производства мировых компаний (AAF, Donaldson и др).

Одной из важнейших задач при строительстве новых и реконструкции существующих КС газовой и нефтяной промышленности, создаваемых на основе газотурбинных компрессорных агрегатов, является обеспечение современных экологических нормативов.

В соответствии с «Научно-технической политикой ОАО «Газпром» в области газоперекачивающей техники» концентрация оксидов азота NOx и монооксида углерода СО в выхлопных газах приводных ГТД не должна превышать 50 и 100 мг/нм³, соответственно. В Европейском союзе в настоящее время действует «Директива Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. о промышленных выбросах», в соответствии с которой установлены ограничения по концентрации загрязняющих веществ (при нагрузках больших 70% от номинальной мощности ГТД): NOx – не более 75мг/нм³, СО – не более 100 мг/нм³.

Основными методами снижения выбросов загрязняющих веществ с продуктами сгорания топлива в ГТД являются [21, 22]:

- совершенствование способов сжигания топлива (развитие т. н. сухих методов, в т. ч. с применением каталитических камер сгорания);

- впрыск воды (пара) в камеру сгорания ГТД для снижения выбросов NOx;

- применение в выхлопных трактах агрегатов специальных систем для очистки продуктов сгорания.

В настоящее время приоритетным направлением снижения выбросов загрязняющих веществ является развитие сухих методов сжигания топлива [21, 23].

Ведущие мировые производители в области газотурбостроения активно ведут работы по созданию специальных систем смесеобразования и сжигания топливозвоздушной смеси в камерах сгорания, которые характеризуются высокой сложностью. По данным ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» (г. Николаев) на сегодняшний день в ГП разработана и испытана в составе конструкции ГТД ДГ90Л2.1 малоэмиссионная камера сгорания, обеспечивающая соответствие требованиям Директивы 2010/75/ЕС. Однако для ее широкого применения требуется проверка эффективности и надежности ее работы в условиях эксплуатации на КС.

Впрыск пара в проточную часть ГТД долгое время являлся основным способом снижения выбросов NOx, и нашел преимущественное применение в энергетике. Главными его недостатками являются потребность в значительном количестве подготовленной воды и жесткие требования к ее качеству [21]. Указанные недостатки ограничивают применение данного метода на КС.

В последнее время каталитические технологии очистки продуктов сгорания получили широкое распространение, особенно на ТЭС, в парогазовых и газотурбинных установках, котельных ЖКХ. При этом на КС они не нашли широкого применения из-за значительных капитальных затрат [21]. В тоже время следует отметить, что каталитическая очистка выхлопных газов может быть эффективным решением при реконструкции существующих КС, когда необходимо обеспечить соответствие современным экологическим нормативам без замены или существенной доработки конструкции ГТД.

При очистке выхлопных газов от NOx требуется большое количество реагента (раствора карбамида или аммиака), впрыскиваемого на входе в систему каталитической очистки выхлопных газов (СКОВ). Кроме того, для обеспечения надежной работы СКОВ необходимо точно контролировать количество подаваемого

реагента, что приводит к необходимости использования достаточно сложных систем регулирования. При этом возникает проблема с возможным «проскоком» аммиака, что представляет собой новую экологическую проблему [21]. Данные факторы ограничивают возможность применения СКОВ от NOx на КС. В тоже время системы каталитической очистки выхлопных газов от СО лишены указанных недостатков.

С целью обеспечения эффективного протекания химической реакции окисления СО необходимо соблюдение следующих условий: температура выхлопных газов должна находиться в определенных пределах; течение потока выхлопных газов на входе в СКОВ должно быть достаточно равномерным.

На рисунке 8,а представлена схема существующей конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С с ГТД ДГ90Л2.1 конструкции ГП НПКГ «Зоря»-

«Машпроект» (г. Николаев). С целью выбора места установки СКОВ в выхлопном тракте была выполнена серия численных экспериментов. На рис. 8,б представлены линии тока в существующем варианте конструкции выхлопного тракта на номинальном режиме работы двигателя. Как видно из рисунка, характер течения в выхлопном тракте имеет сложную пространственную структуру, со множеством вихревых зон и зон обратного течения. Суммарное сопротивление выхлопного тракта без катализатора составляет 2550 Па. Максимальное отклонение скорости от среднерасходной в предполагаемом сечении установки СКОВ (между диффузорами первой и второй ступени) составляет 400%, среднеквадратическое – 128%. По данным разработчиков СКОВ при этом аэродинамическое сопротивление катализатора на номинальном режиме работы двигателя превысит 5000 Па, что недопустимо. С целью обеспечения тре-

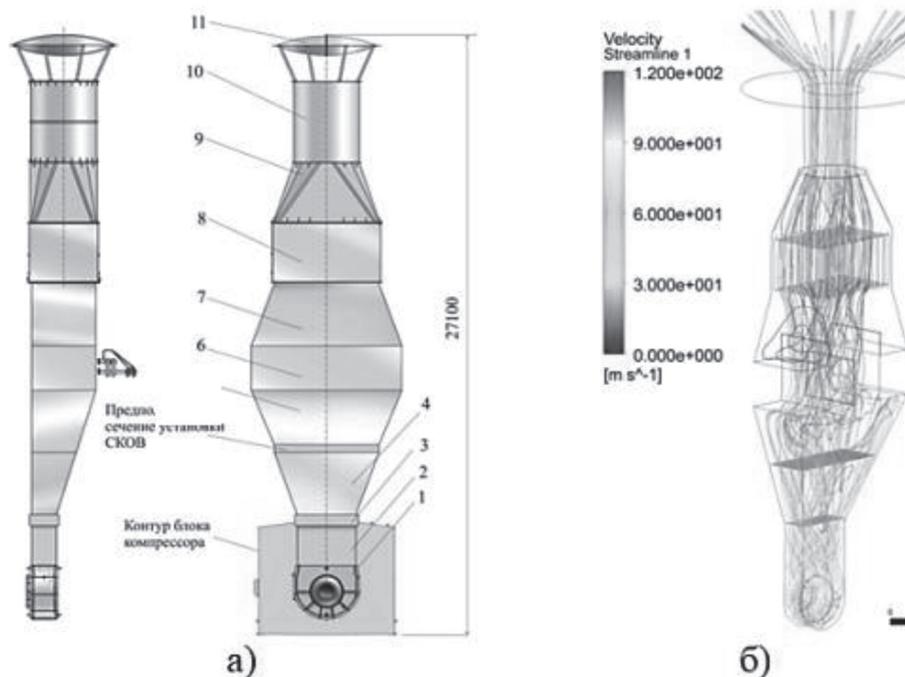


Рис. 8. Конструктивная схема (а) и линии тока (б) в существующей конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С: 1 – улитка; 2 – переходник улитки; 3 – компенсатор; 4 – диффузор 1-й ступени; 5 – диффузор 2-й ступени; 6 – утилизатор тепла выхлопных газов; 7 – переходник; 8 – шумоглушитель; 9 – конфузор; 10 – выхлопная труба; 11 – зонт

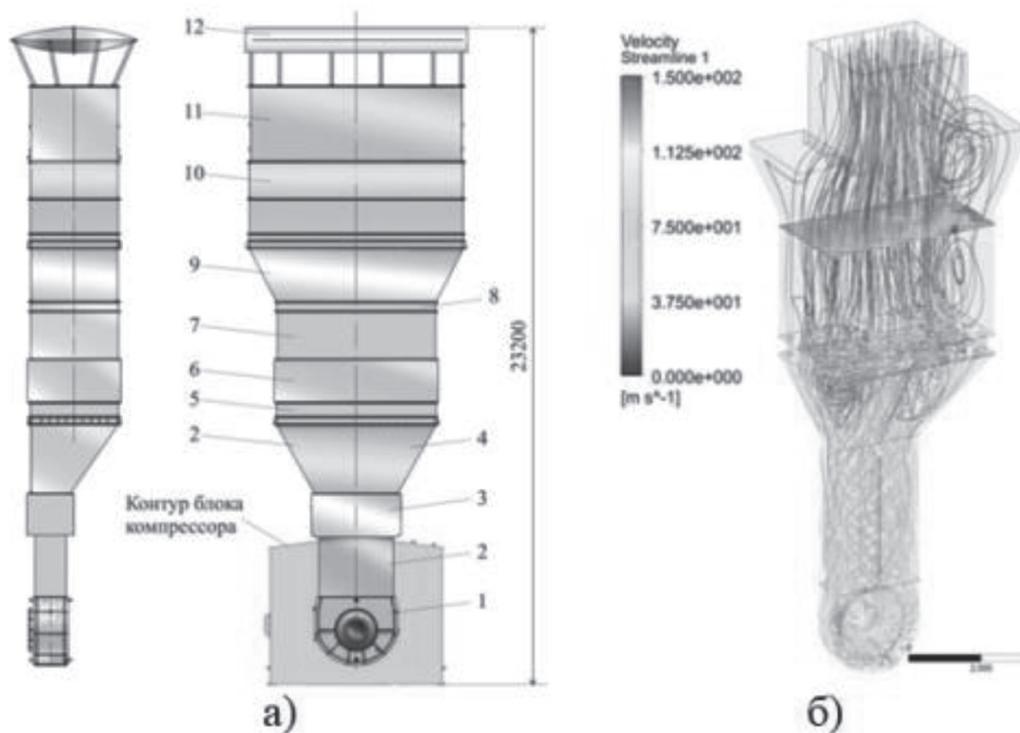


Рис. 9. Конструктивная схема а) и линии тока б) в проточной части новой конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С: 1 – улитка; 2 – переходник улитки; 3 – компенсатор; 4 – диффузор 1-й ступени; 5 – выравниватель потока; 6 – компенсатор; 7 – проставка; 8 – СКОВ; 9 – диффузор 2-й ступени; 10 – утилизатор теплоты; 11 – шумоглушитель; 12 – зонт

буемой величины гидравлического сопротивления выхлопного тракта, а также условий работы СКОВ была выполнена серия численных экспериментов, по результатам которых выбрана конструкция выхлопного тракта с выравнивателем потока трубчатого типа (рисунок 9). Согласно результатам численного моделирования суммарное гидравлическое сопротивление выхлопного тракта новой конструкции составляет 4630 Па, максимальное отклонение скорости от средне-расходной на входе в СКОВ составляет 65%, а среднеквадратическое – 18%, что соответствует требованиям в части гидравлического сопротивления и степени неравномерности потока выхлопных газов.

Полученные расчетные данные планируется проверить в процессе модельных, а также стендовых испытаний агрегата типа ГПА-Ц-16С, оснащенного выхлопным трактом новой конструкции.

Выводы

Современное состояние развития агрегатов типа ГПА-Ц (ТКА-Ц) конструкции ПАО «Сумское НПО», результаты НИР и ОКР с целью их совершенствования позволяют сделать следующие выводы:

1. Обобщение и использование многолетнего опыта создания, доводки и эксплуатации разнообразных модификаций газотурбинных компрессорных агрегатов на давления 1,26...50,0 МПа, $\pi_k=1,35...30,0$ и более позволяют обеспечить поставку блочно-комплектного энерготехнологического оборудования на основе ЦК для реализации любых технологических процессов газовой и нефтяной промышленности.

2. Агрегаты типа ГПА-Ц и ТКА-Ц достигли достаточно высоких показателей технического уровня: наработка на отказ 6000...9000 часов и более; коэффициент готовности – 0,516...0,932; ре-

сурсе до капитального ремонта для ГТД 25000...33000 часов, для ЦК – 50000 часов; эффективный КПД привода 28...37% при мощности 4,0...25,0 МВт, соответственно; политропный КПД компрессоров для линейных КС 87...90%.

3. Современный научно-технический задел ПАО «Сумское НПО» в области ЦК позволяет освоить производство широкой номенклатуры низконапорных компрессоров для линейных и дожимных КС мощностью 6,3...32 МВт с политропным КПД проточной части 89,6...89,7%.

4. Для дальнейшего повышения экономичности агрегатов на основе конвертированных ГТД авиационного и судового типа целесообразно развитие принципов их конвертирования с использованием известных подходов в конструировании узлов и систем промышленных ГТД, освоение сложных рабочих циклов с целью создания новых конструкций двигателей для промышленного применения мощностью 6,3...32 МВт с эффективным КПД

34,0...44,0 %, соответственно, при суммарном ресурсе эксплуатации ЦК и ГТП 200...250 тыс. часов.

5. Требуется дальнейшее совершенствование ЦК, ГТП и вспомогательных систем агрегатов с целью повышения их надежности, ресурса, уровня автоматизации, а также экологических характеристик по химическому и шумовому загрязнению окружающей среды в соответствии с отечественными и мировыми стандартами.

6. Современный уровень развития турбостроения и газотранспортного машиностроения для ГП и НП позволяет осуществить перспективные технические решения с целью дальнейшего совершенствования блочно-комплектных компрессорных агрегатов. Реализация этих решений в ближайшие годы будет определяться научно-технической политикой предприятий-потребителей в области добычи, транспорта и переработки углеводородов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зюзьков В.В., Щуровский В.А. Реконструкция компрессорных станций многониточных систем газопроводов с укрупнением единичных мощностей газоперекачивающих агрегатов // Компрессорная техника и пневматика, 2011. – №5. – С.2-6.

2. Галеркин Ю.Б., Рекстин А.Ф., Солдатов К.В., Дроздов А.А. Высокоэффективный одноступенчатый полнонапорный компрессор ГПА (газодинамический проект, результат модельных испытаний) // Компрессорная техника и пневматика, 2014. – № 8. – С.19-24.

3. Смирнов А.В., Паненко В.Г., Гадяка В.Г., Парафейник В.П., Бороденко А.М. Новая конструкция высокоэффективного центробежного компрессора для агрегата ГПА-Ц-32/76-1,35 линейных компрессорных станций магистральных газопроводов. Часть 1 // Компрессорная техника и пневматика, 2015. – №3. – С.12-17.

4. Смирнов А.В., Паненко В.Г., Гадяка В.Г., Парафейник В.П., Бороденко А.М. Новая конструкция высокоэффективного центробежного компрессора для агрегата

ГПА-Ц-32/76-1,35 линейных компрессорных станций магистральных газопроводов. Часть 2 // Компрессорная техника и пневматика, 2015. – №6. – С.26-29.

5. Параметрический ряд одноступенчатых центробежных компрессоров различной мощности для ГПА линейных компрессорных станций / Смирнов А.В., Парафейник В.П., Нефедов А.Н., Рогальский С.А., Скорик А.В., Обухова А.А., Зинченко И.Н. // Труды XVIII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике, 2017. – Казань: АО «НИИТурбокомпрессор им. В. Б. Шнеппа» (группа ГМС). – С. 195-202.

6. Перспективы развития газотурбинного привода для компрессорных агрегатов и установок углеводородных газов / А. В. Коваленко, О. Ф. Муравченко, В. П. Парафейник [и др.] // Газотурбинные технологии, 2003. – № 2 (23). – С. 2-6.

7. Развитие принципов конвертирования авиационных ГТД с целью создания на их основе промышленного газотурбинного привода / С. В. Епифанов, П. Д. Жеманюк, В. П.

Парафейник, И. И. Петухов // Вестник двигателестроения, 2007. – №3. – С. 70-76.

8. Романов В. И., Кривуца В. А. Комбинированная газотурбинная установка мощностью 16,0...25,0 МВт с утилизацией теплоты уходящих газов и регенерацией воды из парогазового потока // Промышленная теплотехника, 1995. – Т. 17, № 6 – С. 89-96.

9. Отчет «Расчет показателей надежности работы и обработка эксплуатационных показателей газоперекачивающих агрегатов ГПА Ц-16С, ГПА-Ц-16АЛ, ГПА-Ц-8, ГПА-Ц-10, ГПА-Ц-25СД, ГПА-Ц-25, а также компрессоров, оснащенных магнитным подвесом и торцевыми газодинамическими уплотнениями производства ПАО «Сумское НПО им М. В. Фрунзе», установленных на компрессорных станциях ОАО «Газпром» за 2013 год», 2014. – М.: ОАО «Оргэнергогаз». – 195 с.

10. Тertyшный И. Н., Парафейник В. П. Возможность совершенствования турбоком-

прессорных агрегатов газовой промышленности по результатам анализа эффективности их рабочего процесса // Промышленная теплотехника, 2018. – Т. 40, № 1. – С.36-43.

11. Газотурбинный агрегат «Надежда» / Г. И. Богорадовский, Л. Г. Корневский, Б. П. Шайдак [и др.] // Турбины и компрессоры. – С. Пб.: АО «НИКТИТ». – 1997. – № 3, 4 – 97. – С. 4-7.

12. Регенеративная газотурбинная установка для газоперекачивающего агрегата мощностью 16 МВт / В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, С. Н. Мовчан, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонюк // Турбины и дизели, 2010. – № 5. – С. 28-31.

13. Фролов С.Д., Синявин А.В., Сманцер В.В. Область достижимых параметров и критериев эффективности вихревого конденсатора-сепаратора (ВКС) // Авиационно-космическая техника и технология. Труды Харьковского авиационного