

**А. В. СМІРНОВ, В. П. ПАРАФЕЙНИК, О. Н. ЩЕРБАКОВ, С. В. ЕПИФАНОВ,
В. Е. КОСТЮК, В. Н. ЧОБЕНКО, В. В. ШЕВЧУК**

ИНТЕГРАЦИЯ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ В СОСТАВЕ ГАЗОТУРБИННЫХ КОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ ГАЗОВОЙ И НЕФТЯНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

АННОТАЦИЯ В работе рассмотрены основные задачи, решаемые в процессе интеграции энерготехнологических систем в составе газотурбинных компрессорных агрегатов газовой и нефтяной промышленности, а также представлены результаты решения некоторых из них. Изложены результаты обобщенного анализа состояния развития конвертированных газотурбинных двигателей для привода турбокомпрессорных агрегатов и рассмотрены основные направления их дальнейшего совершенствования с учетом опыта создания промышленного газотурбинного привода.

Ключевые слова: газоперекачивающий (турбокомпрессорный) агрегат, газотурбинный привод, конвертирование, центробежный компрессор, согласование характеристик, турбоблок, кожух шумотеплоизолирующий, выхлопной тракт.

**A. SMIRNOV, V. PARAFIYNYK, O. SHCHERBAKOV, S. EPIFANOV, V. KOSTIUK,
V. CHOBENKO, V. SHEVCHUK**

INTEGRATION OF ENERGY SYSTEMS IN GAS TURBINE-DRIVEN COMPRESSOR PACKAGES FOR GAS AND OIL INDUSTRY

ABSTRACT The paper highlights the recent trends in development of gas turbine driven turbo-compressor packages for gas and oil industries and the main issues to be solved during the integration of their energy systems. The key features of aero-derivative and marine gas turbines as well as ways of their further improvement are described in the beginning of the paper. It is noted that modern aero-derivative and marine gas turbines for mechanical drive should combine the design features of industrial gas turbines and high efficient airfoil configurations of gas turbines for airborne applications. One of the most important problems being considered during the development of a high efficient turbocompressor unit is the performance match between the gas turbine and turbocompressor. The special method of matching their characteristics is briefly presented in this paper. This method is based on the evaluation of the integral turbocompressor unit efficiency and the criterion fuel efficiency. Finally some of the aspects of the development of acoustic enclosures, ventilation and exhaust systems of the turbocompressor packages as well as perspectives of the development of combo units for electric generation, cogeneration and refrigeration are presented.

Key words: turbocompressor package, gas turbine, aero-derivative, centrifugal gas compressor, performance match, turbounit, acoustic enclosure, exhaust system.

Введение

Турбокомпрессорные (газоперекачивающие) агрегаты типа ГПА-Ц мощностью 4,0...25,0 МВт конструкции ПАО «Сумское НПО» (далее ПАО), применяемые в газовой и нефтяной промышленности Украины, России, Ирана, Узбекистана и других стран, обеспечивают добычу, транспорт и переработку углеводородных газов. Суммарная установленная мощность этого оборудования производства ПАО составляет более десяти миллионов кВт, а расход топливного газа для работы газотурбинных приводов (ГТП) составляют заметный объем в топливном балансе потребителей.

В связи с этим возрастает актуальность задачи дальнейшего совершенствования всех систем агрегатов типа ГПА-Ц на основе накопленного опыта, как в энергомашиностроении, так и в других отраслях производства, а также в процессе научных исследований. Кроме того, имеется техническая возможность и социально-экономическая необходимость создания нового

технологического оборудования на основе реализации энергоутилизационных технологий.

Турбокомпрессорные агрегаты типа ГПА-Ц с ГТП являются сложными техническими системами, дальнейшее совершенствование которых целесообразно осуществлять на основе методов системно-структурного анализа, получившего распространение при создании сложных изделий различного назначения, в частности, изделий авиационной техники [1, 2], судостроения [3], термотрансформаторов различного типа [4] и т. д.

Интеграция систем газоперекачивающих агрегатов (ГПА) и газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного или судового типа осуществляется на основе известных принципов конвертирования двигателей и требований, предъявляемых к ГПА [5]. Это реализовано многими фирмами-производителями в практике использования ГТД в наземных условиях в составе ГПА компрессорных станций (КС) газовой и нефтяной промышленности при мощности агрегатов 1,0...50 МВт, блочно-модульных электростанций мощностью 2,5...25 МВт и более, а так-

же в составе другого энерготехнологического оборудования. Задачи, решаемые в процессе интеграции систем ГПА и ГТД, в значительной степени зависят от типа применяемого компрессора (поршневой или центробежный) в составе агрегата, конструктивной схемы ГТП, создаваемого на основе ГТД, а также от того для какой КС предназначены агрегаты – вновь сооружаемой или реконструируемой. В настоящей работе рассматриваются ГПА для вновь сооружаемых линейных КС магистральных газопроводов, оснащенные центробежными компрессорами (ЦК) и ГТД, все вспомогательные системы которых являются элементами агрегата.

Цель работы

Целью работы является обзор задач, решаемых в процессе интеграции энерготехнологических систем в составе ГПА, а также анализ решений некоторых из них.

1 Актуальность решения задач интеграции систем ГПА и газотурбинного привода

Характер и круг научно-технических задач, решаемых в процессе интеграции ГПА и газотурбинного привода, определяется его конструктивной схемой. Газотурбинным машиностроением освоено производство ГПА на основе двух подходов, отличающихся созданием приводной части агрегата:

- с автономным ГТП, в составе которого имеются все вспомогательные системы, обеспечивающие реализацию его рабочего процесса;
- на основе ГТД или газотурбинной установки (ГТУ), состоящей из ГТД, рамы подмоторной, газоотводящего устройства, пускового мотор-генератора с коробкой приводов и дозатора топливного газа с соответствующей обвязкой.

Первый подход характерен для фирм, освоивших производство не только двигателей на основе конвертированных ГТД авиационного типа, но и систем, обеспечивающих их работу: воздухоприемной и выхлопной системы; системы смазки, пожаротушения, вентиляции и обогрева, автоматического управления и регулирования (САУ и Р); укрытия с грузоподъемными средствами и т.д. (например, фирмы ПАО «НПО Искра», Россия, «Сименс», Германия). При втором подходе к созданию агрегатов только ГТД (или ГТУ) поставляется специализированными предприятиями двигателестроения. Все остальное оборудование проектируется и производится как элементы конструкции ГПА, обеспечивающие работу ГТД и ЦК (например, фирмы «Солар», США; НПО «Сатурн-Газовые турбины», Россия; ПАО «Сумское НПО», Украина и другие). Наиболее характерной конструктивной особенностью ГПА, создаваемых при

таком подходе, является наличие турбоблока, размещенного на единой фундаментной раме. В то время как в первом случае автономный ГТП и отсек модуля ЦК имеет отдельные фундаментные рамы.

Таким образом, в процессе интеграции систем ГПА конструкции ПАО и ГТД поставки различных двигательных предприятий решаются следующие задачи:

- формирование конструктивного облика турбоблока и разработка компоновочной схемы ГПА, в т. ч. на основе применения ГТД с регенеративным рабочим циклом;
- согласование характеристик ГТД и ЦК с целью обеспечения минимального расхода топливного газа при реализации рабочих режимов ГПА;
- формирование геометрических и газодинамических параметров, а также конструктивных решений и режимов работы воздухоприемного тракта (ВПТ) двигателя в широком диапазоне температур окружающего воздуха (от минус 40 °С до плюс 45 °С) с целью очистки циклового воздуха (класс F5...F9 согласно EN 779-93 или ГОСТ Р 51251-99), обеспечения шумоглушения, защиты ВПТ от обледенения, а также равномерных полей давления, скоростей и температур на входе ГТД;
- обеспечение требуемого температурного режима, пожаро- и взрывобезопасной работы ГТД, а также вспомогательного оборудования и масло-системы агрегата в широком диапазоне режимов эксплуатации ГПА;
- отвод выхлопных газов с минимальными потерями полезной мощности, вырабатываемой ГТД;
- создание наиболее рациональных схем подачи, охлаждения (подогрева), очистки и дегазации смазочного и уплотнительного масла в маслосистеме двигателя и ЦК;
- обеспечение требуемых экологических характеристик по химическому (50 мг/нм³ по NO_x и 100 мг/нм³ по СО), тепловому и акустическому загрязнению окружающей среды;
- достижение требуемой ремонтпригодности (с учетом транспортабельности, возможности безвахтенного обслуживания, ремонта в условиях КС), обеспечивающей эффективную эксплуатацию при минимальной стоимости жизненного цикла ГТД и ГПА на протяжении всего периода эксплуатации;
- обеспечение автоматического управления, регулирования и защиты, а также технического диагностирования различных систем в процессе их функционирования в составе ГТД и ГПА;
- формирование перспективных требований к облику ГПА на основе современных принципов конвертирования двигателей;
- оценка технического совершенства и ры-

ночной привлекательности блочно-комплектных ГПА, создаваемых на основе ЦК и конвертированных ГТД.

Последовательность, научно-технический уровень и подходы к решению указанных задач интеграции существенно зависят от принятых принципов конвертирования ГТД, а также конструктивных схем блочно-комплектных или блочно-модульных ГПА, объем поставки оборудования которых предусматривает на сегодняшний день, как правило, 100 % уровень заводской готовности всех блоков-модулей ГПА.

Важность системного решения указанных задач интеграции обусловлена следующим:

- необходимостью проведения НИР и ОКР с целью повышения экономичности и надежности агрегатов;
- решением вопросов унификации узлов и систем ГПА с целью повышения технологичности их изготовления, снижения металлоемкости и себестоимости, а также повышения качества изготовления агрегатов и в конечном итоге снижения стоимости жизненного цикла ГПА.

Ограниченные рамки настоящей публикации не позволяют раскрыть особенности подходов к решению всех вышеуказанных задач интеграции ГПА и ГТД, а тем более изложить результаты, полученные в многолетней практике создания оборудования в ПАО, ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект», АО «Мотор-Сич», ГП «Ивченко-Прогресс» и других предприятий. В связи с этим в настоящей работе представлены некоторые результаты анализа состояния развития конвертированных ГТД в вышеуказанных организациях, а также результаты решения первоочередных задач в Специальном конструкторском бюро ПАО.

2 Необходимость дальнейшего развития принципов конвертирования авиационных и судовых ГТД

Первые ГПА с ГТП появились в 1949 г. в США [6–8]. Меньшие массогабаритные показатели, а также более высокая эффективность и рыночная доступность конвертированных ГТД авиационного и судового типов по сравнению с промышленными ГТУ способствовали их широкому распространению в качестве привода турбокомпрессорных агрегатов.

Опыт применения авиационных и судовых ГТД в газовой промышленности и энергетике, начиная с 70-х годов прошлого века, свидетельствует о том, что основные принципы их конвертирования в отечественной практике сводятся к максимальному сохранению основных конструктивных и технологических решений, достигнутых в двигателестроении, несмотря на принципиальные отличия наземных условий эксплуатации ГТД по сравнению с условиями авиации и морского

флота.

В процессе конвертирования изменениям подвергается конструкция систем топливопитания, управления и регулирования, а также проточная часть турбин ГТД в связи с необходимостью оснащения наземного приводного двигателя свободной силовой турбиной. Изменения могут вноситься в конструкцию камеры сгорания в связи с тем, что к ГТП энергетических и газоперекачивающих агрегатов предъявляются различные нормативные требования по химическому загрязнению окружающей среды. Совершенствуются также другие системы на основе предыдущего опыта эксплуатации двигателей.

В целом конструкция узлов и деталей наземных ГТД на 70...75 % остаётся неизменной по сравнению с базовыми авиационными или судовыми образцами двигателей. При этом объем конструктивных и технологических изменений зависит от типа и назначения базового образца двигателя. В случае авиационного ГТД эти изменения могут быть более существенными по сравнению с судовыми двигателями, которые по назначению являются механическим приводом в составе силовой установки судна, как и в составе агрегата. В то же время турбовинтовой и турбореактивный двигатели, двигатели для истребительной или транспортной авиации имеют весьма существенные отличия от наземной техники по основным конструктивным решениям и принципам ее эксплуатации.

Указанный подход к конвертированию авиационных и судовых ГТД в наземный ГТП в 70-х...80-х г.г. XX столетия позволил СССР в кратчайшие сроки нарастить производство газотурбинной техники для развития газовой и нефтяной промышленности наряду с решением основных задач авиационного и судового двигателестроения. Однако такой подход на долгие годы предопределил отставание отечественного машиностроения в решении задачи создания конкурентоспособных конструкций ГТД общепромышленного назначения от лучших зарубежных образцов в части ресурса, наработки на отказ и экологических характеристик.

В то же время ведущие фирмы имеют опыт серийного производства высокоэффективных промышленных ГТД малой и средней мощности на основе передовых достижений в области термодинамики и технологии производства авиационных и судовых двигателей в сочетании с принципами конструирования промышленных газовых турбин.

Для таких двигателей характерны следующие конструктивные и эксплуатационные особенности:

- одновальная схема газогенератора;
- механизация проточной части двигателя, предусматривающая применение регулируемых входных направляющих аппаратов, ступеней осе-

вого компрессора и силовой турбины;

- применение подшипников скольжения в конструкции опор;
- использование специального лопаточного аппарата, материалов и технологии изготовления основных узлов и деталей, обеспечивающих достаточно высокие показатели эффективности работы и значительный ресурс при минимально возможной стоимости жизненного цикла ГТД в наземных условиях эксплуатации;
- наличие корпусов с горизонтальным разъемом в конструкции основных модулей, что обеспечивает ремонтпригодность ГТД в условиях КС;
- наличие камер сгорания с индивидуальными жаровыми трубами, обеспечивающими высокие экологические характеристики и ремонтпригодность;
- низкие безвозвратные потери смазочного масла в системах ГТД;
- удовлетворительные экологические характеристики по различным видам загрязнений;
- удовлетворительные показатели экономичности ($\eta_e = 34...37\%$) при высоких ресурсных показателях (ресурс до капитального ремонта не менее 50 тыс. часов) и надёжности.

Создание таких ГТД промышленного назначения стало возможным благодаря осуществлению наукоемких и весьма затратных НИР и ОКР по конвертированию авиационных двигателей в наземный привод.

Например, фирма «ЭшерВисс» (Швейцария) в течение около 10 лет осуществляла работы по созданию на основе авиационного ГТД наземного привода мощностью 25,0 МВт с реализацией вышеуказанных конструктивных особенностей, т.е. создавала конструкцию промышленного ГТД на основе углубленных принципов конвертирования. В результате был создан ГТД, который сейчас известен как GT10 и стал одним из базовых двигателей при создании параметрического ряда серии приводов типа SGT мощностью 4,9...46,4 МВт (SGT-100...SGT-800, фирма «Siemens», Германия) [9].

Среди украинских разработок, осуществляемых с учетом некоторых из упомянутых принципов конвертирования, следует отметить двигатель АИ-312, разрабатываемый в ГП «Ивченко-Прогресс» (г. Запорожье) (рис. 1) и установку ГТУ-16Р [10] (рис. 2) конструкции ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект» (г. Николаев).

Как следует из вышеизложенного, задачи дальнейшего развития газотурбостроения с целью создания высокоэкономичных, надежных и высоко-ресурсных ГТД малой и средней мощности, по-видимому, требуют значительных материальных затрат и времени.

3 Решение задач по согласованию характеристик и режимов работы ЦК и ГТД в составе газоперекачивающих агрегатов

Одним из важнейших вопросов на стадии предпроектных исследований при создании высокоэффективного ГПА является выбор и согласование характеристик компрессора технологического газа (ЦК) и ГТП на основе формирования интегральной (системной) характеристики агрегата. При его решении выявляется соответствие проектного (оптимального) режима ЦК и оптимального режима работы ГПА. При этом под оптимальным режимом агрегата подразумевается такой режим работы двигателя по мощности, при котором достигается максимальное значение интегрального КПД агрегата, а, следовательно, и его экономичность.

Компрессор является основной функциональной системой ГПА, предопределяющей соответствие его эксплуатационных параметров требованиям заказчика в составе КС магистрального газопровода. В связи с этим согласование характеристик и режимов работы ГТД и ЦК сводится к системному анализу рабочего процесса ГПА с реализацией следующей последовательности расчётных задач [11–13]:

- выбор проточной части (ПЧ), газодинамических и мощностных характеристик ЦК, исходя из технических требований заказчика (рис. 3, $\eta_{\text{п}} = f(N_{\text{ст}})$);

- анализ характеристик ГТД в требуемых диапазонах мощности и частоты вращения [11], а также определение эффективности газотурбинного привода с учетом внешних потерь (рис. 3, $\eta_e = f(N_e)$);

- определение интегральной ($h_{\text{с}}^{\text{ГПА}} = f(N_{\text{ст}})$) или системной ($h_{\text{ex}}^{\text{ГПА}} = f(N_{\text{ст}})$) характеристик ГПА, исходя из того, что ЦК и ГТП, создаваемый на основе конкретного ГТД, являются сложными энерготехнологическими системами; при этом системная характеристика ГПА определяется на основе зависимостей $h_{\text{ex}}^{\text{ЦК}} = f(N_{\text{ЦК,ст}})$ и $h_{\text{ex}}^{\text{ГТП}} = f(N_{\text{ст}})$, учитывающих различные эксергетические потоки, производимые и потребляемые при функционировании ГПА;

- выбор оптимальных режимов работы ЦК и ГТП, т. е. совмещение режимов работы компрессора при $(h_{\text{ex}}^{\text{ЦК}})_{\text{max}}$ и ГПА с целью обеспечения $(h_{\text{ex}}^{\text{ГПА}})_{\text{max}}$;

- выявление степени согласованности ГТД и ЦК, показателем которой является характер изменения безразмерного интегрального критерия топливной эффективности агрегата в виде зависимости $K_{\text{т.г.}}^{\text{ГПА}} = f(N_{\text{ст}})$ [12]. Совпадение режимов работы агрегата по $(h_{\text{ex}}^{\text{ГПА}})_{\text{max}}$ и $(K_{\text{т.г.}}^{\text{ГПА}})_{\text{min}}$ при номиналь-

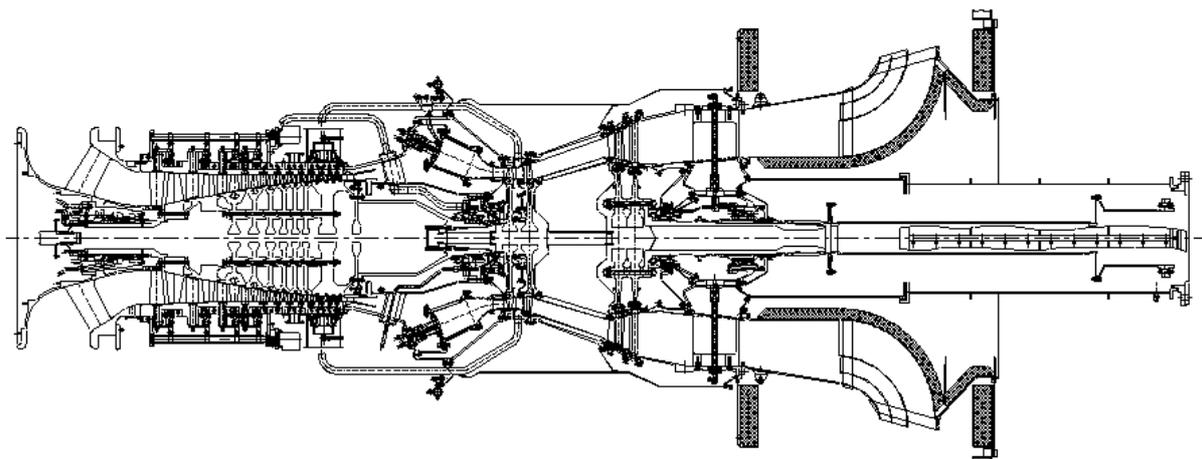


Рис. 1 – Продольный разрез двигателя АИ-312 с простым рабочим циклом: $N_{см} = 10...12$ МВт; $n_{см} = 6950$ об/мин; $\eta_e = 36\%$; $\pi_k = 18,0$; $T_{тк} = 1450$ К; $T_{см} = 1030$ К; $G_z = 41,7$ кг/с; $T_{вых} = 759$ К; $NO_x = 35...50$ мг/м³; $CO = 8...8,5$ мг/м³; $G \leq 10,0$ т; $\Delta G_{ц.в} \approx 1\%$

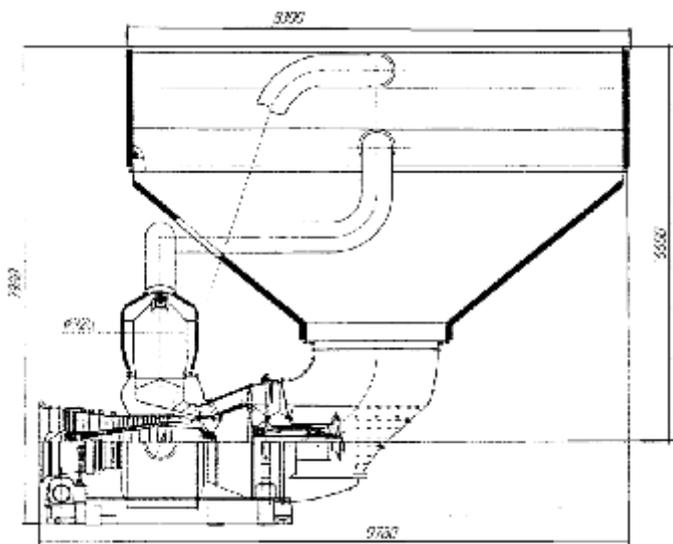


Рис. 2 – Компонентная схема одного из вариантов ГТД с регенеративным рабочим циклом для установки ГТУ-16Р: $N_{см} = 16$ МВт; $n_{см} = 5200$ об/мин; $\eta_e = 40,3\%$; $G_{ц.в} = 75,7$ кг/с; $\pi_k = 5,75$; $\mu = 0,85$; $T_{вых.р} = 306^\circ\text{C}$ (индекс «р» относится к регенератору)

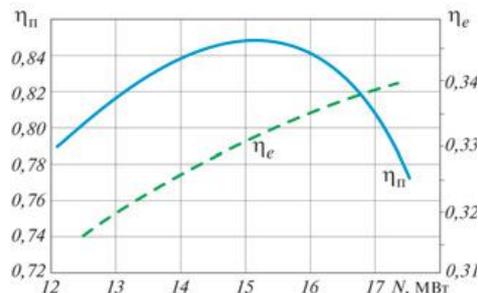


Рис. 3 – Зависимость политропного КПД компрессора НЦ-16/76-1,44 (η_n) и эффективного КПД привода, создаваемого на основе ГТД ДГ90Л2 (η_e) от мощности при частоте вращения 5100 об/мин

ной мощности ГТД является подтверждением наиболее целесообразного выбора геометрии ПЧ компрессора, а достижение минимального значения коэффициента $K_{т.г.}^{ГПА}$ является подтверждением того, что ГТД будет работать в составе турбоблока ГПА в наиболее экономичном режиме.

Решение вышеуказанных задач в процессе создания ГПА предполагает совместную работу разработчиков ГТД и агрегата.

В качестве критерия топливной эффективности агрегата используется коэффициент расхода топлива, определяемый на стадии предпроектных НИР. Коэффициент расхода топлива вычисляется исходя из основных параметров ЦК и всего ГПА [12]:

$$K_{т.г.}^{ГПА} = \frac{G_{т.г.}}{G_k \bar{y}_n}, \quad (1)$$

где $G_{т.г.}$ – расход топлива, кг/с; G_k – массовый расход технологического (компримируемого) газа в ЦК, кг/с; $\bar{y}_n = y_n / (y_n)_p$ – относительное значение коэффициента политропного напора компрессора, определяемое при текущем y_n и расчётном $(y_n)_p$ режимах его работы.

Следует отметить, что интегральная характеристика ГПА с использованием зависимости $h_s^{ГПА} = h_n h_e$ определяется на предварительных этапах работ по созданию агрегата. По мере уточнения облика и энергетических характеристик всех систем проектируемого ГПА появляется возмож-

ность определения системной характеристики агрегата в виде зависимости $h_{ex}^{ГПА} = h_{ex}^{ЦК} h_{ex}^{ГТД}$. При этом характер изменения как интегральной, так и системной характеристик определяется в первую очередь характером изменения зависимостей h_e , $h_n^{ЦК} = f(N_{ст})$, а различия в максимальных значениях $(h_S^{ГПА})_{max}$ и $(h_{ex}^{ГПА})_{max}$ при анализе интегральной и системной характеристик агрегата могут достигать величины от 2 до 11 % (относительных) в зависимости от мощности агрегата и особенностей конструкции его систем [11].

НИР с целью согласования характеристик ЦК и ГТД для оптимизации интегральной характеристики ГПА проводились на примере агрегата типа ГПА-Ц-16 для линейных КС (при $\pi_k = 1,44 \dots 1,45$) для случая оснащения их двигателями НК-16СТ, ДГ-90Л2, ГТУ-16Р, а также ЦК, проточная часть которых имела рабочие колеса (РК) с углом выхода лопаток $22,5^\circ$, 32° и $52,1^\circ$ [11, 12]. Основные геометрические параметры анализируемых проточных частей в составе ЦК представлены в табл. 1, а характеристики эффективности ЦК и агрегатов, оснащённых компрессорами модификаций ЦК-1...ЦК-5 – на рис. 4. Зависимости $K_{Т.Г.}^{ГПА} = f(N_{ст})$ для различной геометрии исследуемых ступеней представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 4, для ЦК, оснащенных низконапорными ступенями с РК, имеющими $\beta_{л2} = 22,5^\circ$, при $N_{ст} = 15,2$ МВт обеспечивается совпадение проектного режима работы ЦК ($\eta_{пол} = 0,85$) и оптимального режима работы ГПА ($h_S^{ГПА} = 0,28$), что соответствует наиболее эффективному режиму работы ГТД. Это подтверждается соответствующим значением коэффициента $K_{Т.Г.}^{ГПА} = f(N_{ст})$ при работе ГПА с модификацией ЦК-1 (рис. 4а). Данные об эффективности режимов работы других модификаций ГПА с анализируемыми проточными частями ЦК показывают, что требуется определенная подстройка режимов

работы ЦК и ГТД, т.е. реализация специальных алгоритмов управления при работе САУ и Р.

Таблица 1 – Основные геометрические параметры ЦК агрегатов типа ГПА-Ц-16С

Модификации ЦК	ЦК-1	ЦК-2	ЦК-3	ЦК-4	ЦК-5
Тип диффузоров (ЛД – лопаточный, БЛД – безлопаточный)	ЛД	БЛД	ЛД	БЛД	ЛД
Число ступеней	2	2	2	1	1
Наружный диаметр РК D_2 , мм	880	835	843	912	870
Угол выхода лопатки РК $\beta_{л2}$, °	22,5	32,0	32,0	52,1	52,1

Таким образом, при использовании низко- и средненапорных РК ($\beta_{л2} \leq 32^\circ$) в составе ПЧ компрессора обеспечивается оптимизация режимов работы ЦК и ГТД (номинальные значения $h_n^{ЦК} = 0,84$ и $h_e^{ГТД} = 0,335$). При этом достигается экономия топливного газа для ГТД судового типа ДГ90Л2 до 5,4...7,6 %, что соответствует величине расхода топливного газа 3...3,5 млн. $nm^3/год$ [12].

4 Вопросы совершенствования конструкции турбоблока ГПА

Основным системообразующим блоком модулем в составе ГПА конструкции ПАО является турбоблок, включающий ГТД и ЦК (рис. 6).

Для снижения шума, а также защиты персонала и оборудования КС от теплового излучения, возникающего при работе ГТД, двигатели совместно с газоотводным устройством, элементами системы маслообеспечения, трубопроводами топливного газа, контрольно-измерительными приборами и средствами электромонтажа устанавливают в специальных шумотеплоизолирующих кожухах (КШТ), входящих в состав блока силового (БС).

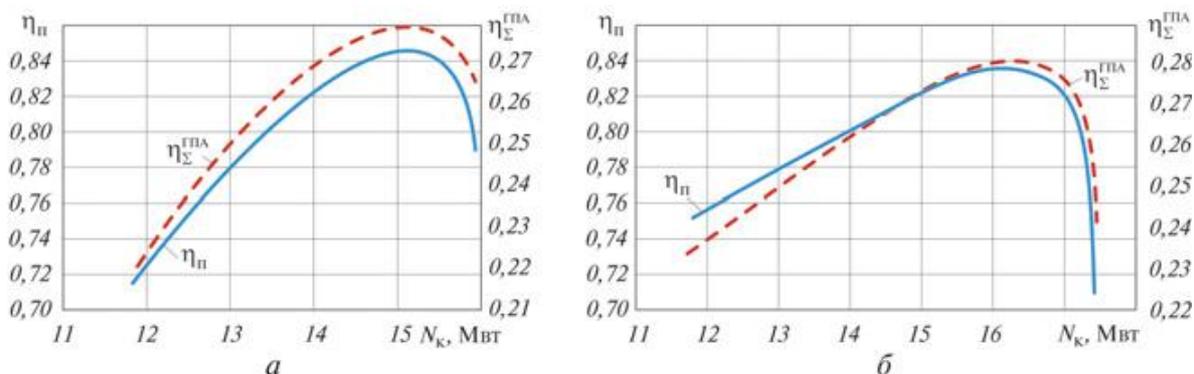


Рис. 4 – Показатели эффективности компрессоров и агрегатов типа ГПА-Ц-16С (— политропный КПД ЦК, - - - интегральный КПД ГПА): а – ЦК-1, $n_p = 5100$ об/мин, $\pi_k = 1,44$; б – ЦК-2, $n_p = 5300$ об/мин, $\pi_k = 1,44$

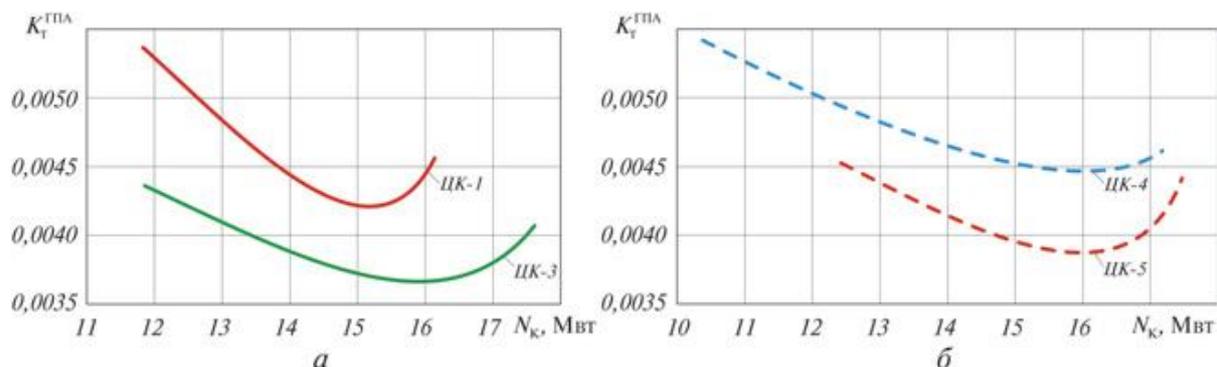


Рис. 5 – Сравнительный анализ эффективности ГПА, оснащенных ЦК различного типа, по величине коэффициента расхода топлива: а – ЦК-1, ЦК-3, $\pi_k = 1,44$; б – ЦК-4, ЦК-5, $\pi_k = 1,25$

Для обеспечения требуемых температурных условий работы ГТД и вспомогательного оборудования, установленного в БС, их оборудуют системой механической вентиляции. Кроме того, поскольку максимальная температура корпуса двигателя при его работе может превышать температуру самовоспламенения природного газа, используемого в качестве топлива, для предотвращения взрывоопасных концентраций газозвушной смеси система вентиляции БС должна обеспечивать разбавление возможных утечек топливного газа до безопасных концентраций.

Ввиду особенностей компоновки ГПА, а также сложности происходящих термогазодинамических процессов в БС, проектирование кожуха и системы его вентиляции, обеспечивающей взрывозащиту и приемлемый температурный режим работы в широком диапазоне температур окружающего воздуха, представляет собой достаточно сложную расчетную и конструкторскую задачу. В результате этого доводка системы вентиляции зачастую осуществляется при эксплуатации агрегатов в условиях КС и требует времени и материальных затрат.

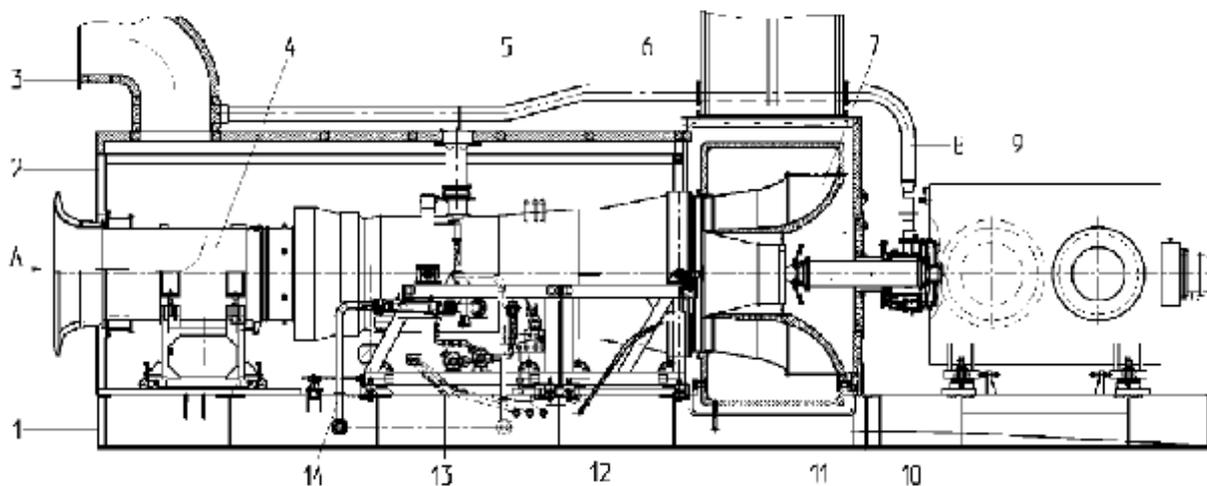


Рис. 6 – Турбоблок ГПА ангарного типа:

1 – рама; 2 – кожух шумотеплоизолирующий (КШТ); 3 – воздуховод; 4 – уравнительная труба; 5 – ГТД; 6 – шумоглушитель сбрасываемого воздуха; 7 – газоотводное устройство; 8 – система наддува кожуха муфты; 9 – ЦК; 10 – кожух муфты; 11 – муфта; 12 – подвод воздуха на охлаждение турбины; 13 – элементы системы смазки ГТД; 14 – трубопровод топливного газа

При эксплуатации ГПА производства ПАО были выявлены следующие недостатки существующих конструкций БС и систем их вентиляции:

- сложности регулирования ГТД из-за замерзания конденсата в трубопроводах системы управления поворотными направляющими аппаратами компрессора и в импульсных трубопроводах

САУ и Р двигателя при температуре окружающего воздуха ниже минус 30 °С;

- сложность запуска двигателя из-за замерзания трубопроводов системы смазки ГТД при низких температурах окружающего воздуха;
- перегрев вспомогательного оборудования и контрольно-измерительных приборов, установ-

ленных в БС из-за интенсивного теплового излучения наиболее нагретых участков корпусов ГТД;

- образование в КШТ застойных зон с высокой температурой воздуха и возможной взрывоопасной концентрацией газовой смеси в случае утечки газа.

Для устранения выявленных недостатков при разработке конструкции унифицированного БС для агрегатов типа ГПА-Ц-25 был выполнен комплекс научно-исследовательских работ с использованием методов вычислительной гидродинамики (CFD).

Численному моделированию теплообмена в укрытиях ГТУ посвящён ряд работ [14–22]. Однако, как показал анализ указанных публикаций, в них отсутствует обобщенный подход к моделированию теплового состояния КШТ. Для устранения этого недостатка специалистами Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» разработана обобщенная математическая модель (ММ) теплового состояния БС [23] и отработана методика расчета с использованием программного комплекса *ANSYS Fluent* [24]. Это позволило рассчитывать температуры воздуха в БС, внутренних и наружных поверхностей стенок кожуха в широком диапазоне расходов и температур вентиляционного воздуха по данным термометрирования корпуса ГТД.

Для получения экспериментальных данных, обеспечивающих верификацию ММ, специалистами ПАО совместно со специалистами Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского Харьковский авиационный институт» на компрессорной станции «Долина» были проведены натурные исследования теплового состояния БС в составе турбоблока блочно-контейнерного агрегата ГПА-Ц-16С/76-1,45 [25]. В ходе исследования измерялись температуры воздуха и поверхностей стенок в КШТ, расход подаваемого в кожух воздуха, а также режимные параметры агрегата.

Использование разработанной методики позволило специалистам Специального конструкторского бюро ПАО выполнить численные исследования влияния расхода охлаждающего воздуха, а также способов его подвода и распределения на тепловое состояние БС. С использованием результатов исследований была разработана конструкция унифицированного БС со специальным припотолочным экраном, который обеспечивает распределение охлаждающего воздуха, а также подобраны вентиляторы, обеспечивающие требуемый диапазон расходов воздуха. Определены места наиболее целесообразного размещения приборов и другого оборудования БС. Принятые технические решения должны обеспечить приемлемые температурные условия работы ГТД и оборудования, установленного в БС, в диапазоне температур наружного воздуха от минус 40 °С до плюс 45 °С.

5 Повышение эффективности выхлопного тракта агрегатов типа ГПА-Ц. Задачи создания энерготехнологических установок

Компоновка ГПА с ГТП, а также его энергетические и экологические характеристики существенно зависят от конструкции выхлопного тракта (ВТ) агрегата.

Как известно, гидравлические потери в ВТ оказывают существенное влияние на эффективность ГТП. По данным ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект» снижение сопротивления выхлопного тракта на 981 Па позволяет повысить КПД ГТД ДУ80Л1 примерно на 0,23 % (абс.). Для повышения эффективности агрегатов типа ГПА-Ц-25С с приводом на базе ГТД указанного типа с использованием программного комплекса *ANSYS CFX* была выполнена серия вычислительных экспериментов по выявлению влияния конструктивных параметров ВТ на его сопротивление [26].

По результатам выполненного исследования была разработана конструктивная схема ВТ с газоходами круглого сечения (рис. 7), позволяющая уменьшить неравномерность течения выхлопных газов вдоль ВТ, снизить гидравлические потери на 190 Па (что составляет 8,3 %), а также уменьшить габаритные размеры и сократить металлоемкость конструкции ВТ на 21 %. Указанное снижение сопротивления ВТ позволит уменьшить потребление топливного газа на номинальном режиме работы агрегата при годовом ресурсе примерно на 415000 $\text{нм}^3/\text{год}$.

Расчетные исследования, выполненные при проектировании ВТ агрегата типа ГПА-Ц-25С, позволили сформулировать ряд практических и перспективных задач с целью совершенствования и дальнейшего развития агрегатов типа ГПА-Ц:

- экспериментальные исследования элементов ВТ при модельных испытаниях на стенде статических продувок и натурных испытаниях в составе агрегатов;
- анализ акустических характеристик ВТ агрегатов в случае применения шумоглушителей различных конструкций;
- проведение расчётных и экспериментальных исследований с целью разработки унифицированных элементов ВТ при их создании на основе не только наиболее простых гидравлических схем (рис. 7), но и при создании сложных выхлопных систем, обеспечивающих реализацию теплофикационного, холодильного и энергетического циклов.

Последнее направление работ может быть реализовано на основе применения высокотемпературных или низкотемпературных рабочих циклов в бинарных установках различной мощности.

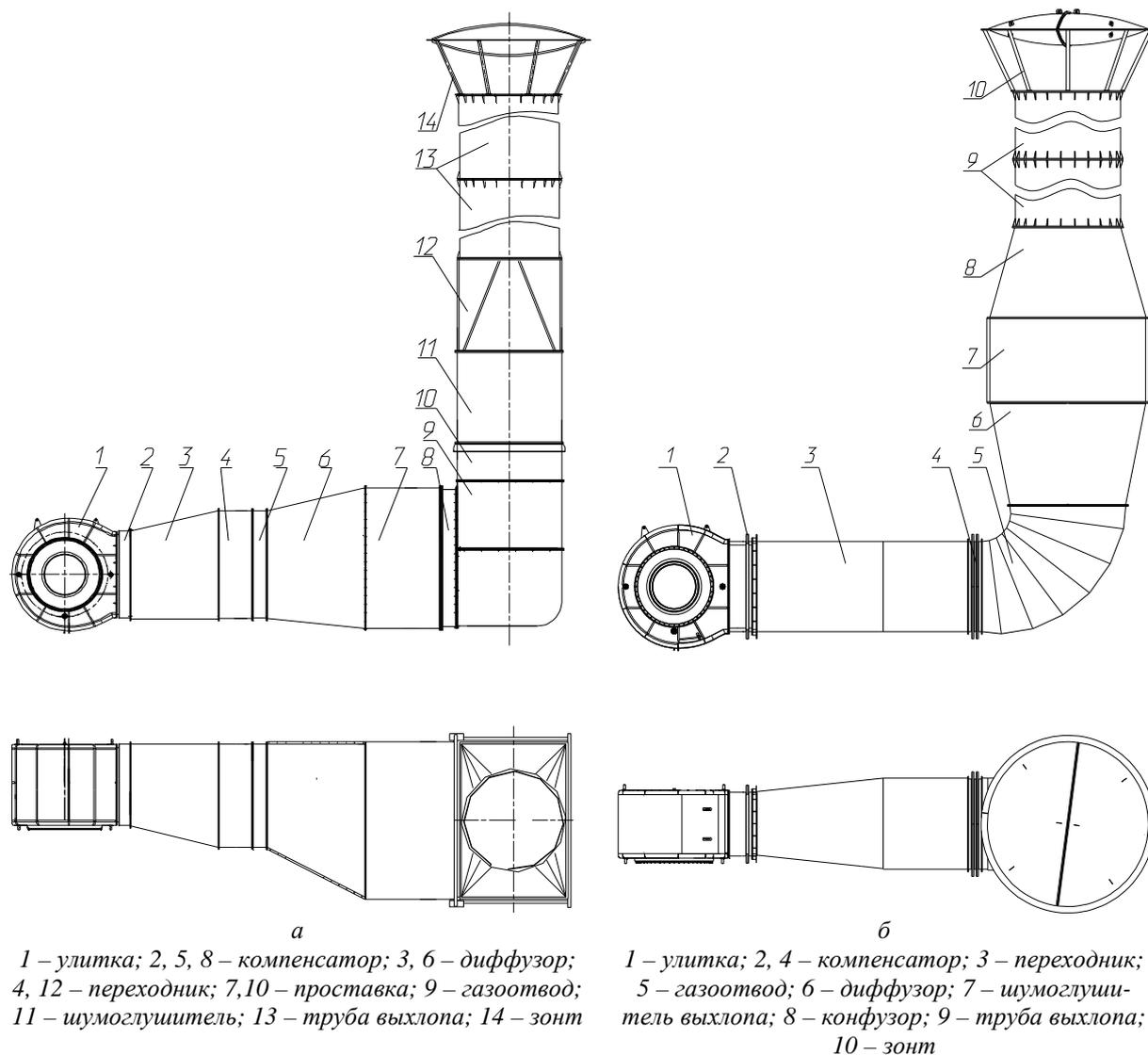


Рис. 7 – Конструктивная схема выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-25С:
а – существующего; б – вновь разработанного

Решение указанных задач требует создания комплексной ММ энерготехнологической установки (ЭТУ), проектируемой на основе агрегата типа ГПА-Ц. Такая ММ необходима для анализа влияния режимов работы элементов воздухоприемного и выхлопного трактов на характеристики ГТД при его работе с различными вариантами энерготехнологической надстройки в составе ЭТУ.

Такой подход к развитию конструкции агрегатов типа ГПА-Ц актуален для экономики Украины в связи с наличием развитой газотранспортной сети и значительного количества КС для транспорта газообразных углеводородов. Кроме того, необходимость снижения энергоёмкости транспорта газа, а также решения проблемы снижения энергоёмкости продукции в целом диктуют необходимость развития эффективной региональной энергетики, создания холодильных мощностей для хранения сельскохозяйственной продукции,

развития теплофикации для создания тепличных хозяйств на основе тепловых ресурсов КС.

Однако реализация указанных подходов к созданию ЭТУ на основе ГПА газотранспортных КС требует разработки соответствующей законодательной и нормативной базы для предприятий энергетики, газовой и нефтяной промышленности с целью их стимулирования к продаже электроэнергии, тепла и холода, вырабатываемых ЭТУ, функционирующих на базе КС газовой и нефтяной промышленности.

Заключение

Анализ состояния развития современных газотурбинных ГПА для газовой и нефтяной промышленности, созданных в ПАО «Сумское НПО», позволяет сделать следующие выводы:

1 ГПА, производимые на основе конверти-

рованных ГТД украинских и российских разработчиков и ЦК конструкции ПАО для реализации всех известных технологических процессов газовой и нефтяной промышленности обеспечивают выполнение текущих и перспективных задач по транспорту, обратной закачке и переработке углеводородных газов. Однако требуется дальнейшее совершенствование агрегатов, разрабатываемых на основе новых конструкций ГТД. Создание высокоэкономичных и высокоресурсных промышленных ГТД возможно лишь на основе реализации углубленных принципов конвертирования транспортных двигателей.

2) Задачи интеграции систем ГПА и ГТД весьма разнообразны и наукоемки. Основными из них являются:

- создание новых конструкций ГТД на основе принципов конструирования наземных промышленных двигателей и достижений в области термодинамики, материаловедения, теории лопаточных машин, динамики и прочности узлов и систем, реализованных в авиационном и судовом двигателестроении;

- совершенствование систем ГПА, обеспечивающих надежную и безопасную работу с минимальными энергетическими потерями. К ним относятся элементы проточной части двигателей и ЦК, воздухоприемные и выхлопные тракты ГПА, системы турбоблока, смазки ГТД и ЦК, концевых уплотнений компрессора;

- освоение производства новых конструкций ГТД на основе регенеративного цикла с применением регенераторов, имеющих теплообменные поверхности нового типа, обеспечивающих коэффициент регенерации 0,86...0,88 и существенное снижение массогабаритных характеристик.

3) Перспективные планы создания новых образцов ГПА для линейных КС предполагают освоение производства ЦК, имеющих политропный КПД 0,88...0,9, новых ГТД мощностью 10...32 МВт с эффективным КПД 0,37...0,39 и усовершенствованных конструкций вспомогательных систем, обеспечивающих надежную работу центробежного компрессора и газотурбинного привода.

Перспективными направлениями дальнейшего совершенствования ГПА и КС на их основе с точки зрения повышения их энергоэффективности при успешном решении задач интеграции систем ГПА и ГТД является превращение КС в энерготехнологические комплексы на основе применения ЭТУ. Это обеспечит не только снижение энергозатрат при транспортировке газа, но и создание дополнительных мощностей по выработке электроэнергии, теплоты и холода с целью развития региональной энергетики, а также энерготехнологической инфраструктуры новых сельскохозяйственных и промышленных предприятий.

Список литературы

- 1 Интеграція авіаційних силових установок і літальних апаратів [Текст] : підручник / **Ю. М. Терещенко, М. С. Кулик, В. В. Панін** та ін. ; за ред. **Ю. М. Терещенка**. – Київ : вид-во Нац. авіац. ун-ту «НАУ-друк», 2009. – 344 с. – ISBN 978-966-598-525-9.
- 2 **Анипко, О. Б.** Интеграция силовой установки и планера транспортного самолета [Текст] : моногр. / **О. Б. Анипко, В. Г. Бацинский, В. В. Логинов, В. Б. Семенов**. – Запорожье : Изд-во «Мотор-Сич», 2013. – 329 с. – ISBN 978-966-2906-35-6.
- 3 **Нарусбаев, А. А.** Введение в теорию обоснования проектных решений [Текст] / **А. А. Нарусбаев**. – Ленинград : Судостроение, 1976. – 223 с.
- 4 Системно-структурный анализ пароконпрессорных трансформаторов [Текст] / **Ю. М. Мацевитый, Э. Г. Братуга, Д. Х. Харлампиди, В. А. Тарасова**; под ред. Ю. М. Мацевитого. – Харьков : Изд-во Института проблем машиностроения НАН Украины, 2014. – 269 с. – ISBN 978-966-02-7218-7.
- 5 **Епифанов, С. В.** Развитие принципов конвертирования авиационных ГТД с целью создания на их основе промышленного газотурбинного привода [Текст] / **С. В. Епифанов, П. Д. Жеманюк, В. П. Парафейник, И. И. Петухов** // Вестник двигателестроения. – 2007. – № 3. – С. 70–76. – ISSN 1727-0219.
- 6 **Христич, В. А.** Газотурбинные установки: история и перспективы [Текст] : моногр. / **В. А. Христич, Г. Б. Варламов**. – Киев : НТУУ «КПИ», 2006. – 384 с. : ил. – Библиогр. : с. 358–383. – ISBN 978-966-622-237-7.
- 7 **Giampaolo, T.** The gas turbine handbook: principles and practices [Text] / **T. Giampaolo**. – Lilburn : The Fairmount Press, Inc., 2002. – 405 p. – ISBN 0-88173-515-9.
- 8 **Hunt, R.** The History of the Industrial Gas Turbine (Part 1 The First Fifty Years 1940 – 1990) [Text] / **R. Hunt**. – Bedford : IDGTE, 2011. – 50 p.
- 9 Каталог энергетического оборудования [Текст]. – Рыбинск : Издательский дом «Газотурбинные технологии», 2014. – 490 с.
- 10 **Спицын, В. Е.** Высокоэффективная газотурбинная установка для ГПА [Текст] / **В. Е. Спицын, А. Л. Боцула, В. Н. Чобенко, Д. Н. Соломонюк** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХПІ», 2008. – № 34. – С. 3–6. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2076-004x.
- 11 **Лютиков, А. Л.** Анализ возможности согласования характеристик приводного ГТД и ЦК [Текст] / **А. Л. Лютиков, В. П. Парафейник, В. Н. Чобенко** // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – №7 (74). – С. 30–40. – ISSN 1727-7337.
- 12 **Парафейник, В. П.** К вопросу оптимизации геометрии проточной части центробежных компрессоров природного газа [Текст] / **В. П. Парафейник, В. Е. Евдокимов, И. Н. Тертышный, А. Н. Нефедов** // Компрессорная техника и пневматика. – 2012. – № 2. – С. 10–17. – ISSN 0865-5865.
- 13 **Тертышный, И. Н.** Термодинамический анализ эффективности центробежного компрессора как сложной энерготехнологической системы в составе агрегата типа ГПА-Ц-32П [Текст] / **И. Н. Тертышный, В. П. Парафейник, А. Н.**

- Нефедов, С. А. Рогальский, Н. А. Котенко, Д. Н. Тимошадченко, С. А. Михайленко // Труды XVI Международной научно-технической конференции по компрессоростроению, Санкт-Петербург, 23–25 сентября 2014 г. – С.-Петербург : РЭП-Холдинг, 2014. – Т. 1. – С. 328–339.
- 14 **Santon, R. C.** Safety Developments in Gas Turbine Power Applications [Electronic resource] / **R. C. Santon, J. W. Kidger, C. J. Lea** // Proceedings of ASME Turbo-Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3 – 6, 2002. – ASME Paper GT-2002-30469. – pp. 959–966. – ISBN 0-7918-3606-1. – doi: 10.1115/GT2002-30469.
- 15 **Ponnuraj, B.** 3D CFD Analysis of an Industrial Gas Turbine Compartment Ventilation System [Electronic resource] / **B. Ponnuraj, B. Sultanian, A. Novori, P. Pecchi** // Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE'03), Washington, D.C., USA, November 15–21, 2003. – pp. 67–76. – ISBN 0-7918-3718-1. – doi: 10.1115/imece2003-41672.
- 16 **Клочков, А. В.** Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / **А. В. Клочков, Е. С. Корнилова, А. А. Снитко** // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20–22. – ISSN 2311-2646.
- 17 **D'Ercole, M.** Results and Experience from GeEnergy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Electronic resource] / **M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi** // Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA, June 6–9, 2005. – pp. 275–283. – ISBN 0-7918-4727-6. – doi: 10.1115/GT2005-68053.
- 18 **Graf, E.** Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures [Electronic resource] / **E. Graf, T. Luce, F. Willet** // Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA, June 6–9, 2005. – pp. 587–593. – ISBN 0-7918-4728-4. – doi: 10.1115/GT2005-68574.
- 19 **Vahidi, D.** Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Electronic resource] / **D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer** // Proceedings of ASME TurboExpo 2006, Barcelona, Spain, May 8–11, 2006. – pp. 607–616. – ISBN 0-7918-4240-1. – doi: 10.1115/GT2006-90960.
- 20 **Месропян, А. В.** Численное моделирование газодинамики и тепломассопереноса в системе охлаждения бокса ГТД [Текст] / **А. В. Месропян, И. И. Мухамедзянова** // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 25–31. – ISSN 2225-2789.
- 21 **Трусов, П. В.** Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки [Текст] / **П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев** // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2010. – № 4 (78). – С. 117–126. – ISSN 2411-6025.
- 22 **Чарнцев, Д. А.** Математическое моделирование теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок [Текст] : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / **Дмитрий Анатольевич Чарнцев**. – Пермь, 2012. – 16 с.
- 23 **Костюк, В. Е.** Обобщенная математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок [Текст] / **В. Е. Костюк, Е. И. Кириладш, А. Л. Кравчук** // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22–26. – ISSN 2078-5364.
- 24 **Смирнов, А. В.** Обеспечение теплового режима силового блока газоперекачивающего агрегата организованный подачей воздуха под шумотеплоизолирующей кожух газотурбинного двигателя [Текст] / **А. В. Смирнов, В. Е. Костюк, Д. А. Ткаченко, Е. И. Кириладш, Ю. Н. Слабко** // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 2. – С. 99–107. – ISSN 1727-0219.
- 25 **Щербаков, О. М.** Экспериментальне дослідження теплового стану кожуха для шумотеплоізоляції газотурбінного двигуна ДГ90Л2 у складі турбоблока агрегату типу ГПА-Ц-16С [Текст] / **О. М. Щербаков, Д. О. Ткаченко, В. П. Парафійник, В. М. Гуріненко, В. С. Костюк, О. І. Скрипка, О. І. Кириладш** // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – №6/7(78). – С. 35–42. – ISSN 1729-3774. – doi: 10.15587/1729-4061.2015.56244.
- 26 **Смирнов, А. В.** Численное исследование течения газа в выхлопных трактах газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом на базе двигателя ДУ80Л1 [Текст] / **А. В. Смирнов, А. Н. Щедренков, О. Н. Щербаков, А. Ю. Каруцкий, В. П. Парафейник** // Вестник двигателестроения. – 2015. – № 2. – С. 199–206. – ISSN 1727-0219.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Tereshchenko, Yu. M., Kulik, M. S., Panin, V. V.** et al. (2009), *Integracija aviacijnih silovih ustanovok i lital'nih aparativ [Integration of aircraft power plants and flight vehicles]*, Air University ²NAU² Press, Kiev, ISBN 978-966-598-525-9. Ukraine.
- 2 **Anipko, O. B., Bashinskiy, V. G., Loginov, V. V. and Semenov, V. B.** (2013), *Integracija silovoj ustanovki i planera transportnogo samoleta [Integration of power plant and airframe of heavy aircraft]*, ²Motor Sich² Press, Zaporozhye, ISBN 978-966-2906-35-6. Ukraine.
- 3 **Nurusbayev, A. A.** (1976), *Vvedenie v teoriju obosnovanija proektnyh reshenij [Introduction to theory of grounds for design solutions]*, Shipbuilding, Leningrad, SSSR.
- 4 **Matsevityi, Yu. M., Bratuta, E. G., Kharlampidi, D. Kh. and Tarasova, V. A.** (2014), *Sistemno-strukturnyj analiz parokompessornyh transformatorov [System structured analysis of steam and compressor transformers]*, Institute for Problems in Machine-Building Press of NAS of Ukraine, Kharkov, ISBN 978-966-02-7218-7. Ukraine.
- 5 **Yepifanov, S. V., Zhemanyuk, P. D., Parafejnik, V. P. and Petukhov, I. I.** (2007), *Razvitie principov konvertirovanija aviacionnyh GTD s cel'ju sozdaniya na ih osnove promyshlennogo gazoturbinnogo privoda [Development of principles for aircraft GTE converting to design industrial Gas Turbines]²*, *Bulletin of Engine Building*, vol. 3, pp. 70–76, ISSN 1727-0219.
- 6 **Khristich, V. A. and Varlamov, G. B.** (2006), *Gazoturbinnye ustanovki: istorija i perspektivy [Gas turbine units: history and potentials]*, NTUU ²KPI², Kyiv, ISBN 978-966-622-237-7. Ukraine.
- 7 **Giampaolo, T.** (2002), *The gas turbine handbook: principles and practices*, The Fairmount Press, Inc., Lilburn, ISBN 0-88173-515-9.
- 8 **Hunt, R.** (2011), *The History of the Industrial Gas Turbine (Part 1 The First Fifty Years 1940–1990)*, IDGTE, Bedford.

- 9 (2014), Katalog jenergeticheskogo oborudovanija [Catalog of power generating equipment], ²Gas turbine technologies² publishing house, Rybinsk.
- 10 **Spitsyn, V. E., Botsula, A. L., Chobenko, V. N. and Solomonyuk, D. N.** (2008), ²Vysokoeffektivnaja gazoturbinnaja ustanovka dlja GPA [Highly efficient gas turbine for gas compressor package]², *Bulletin of NTU "KhPI"*, vol. 35, pp. 8–11, ISSN 2076-004x.
- 11 **Lyutikov, A. L., Parafejnik, V. P. and Chobenko, V. N.** (2010), ²Analiz vozmozhnosti soglasovanija harakteristik privodnogo GTD i CK [Analysis of possibility to match characteristics of gas turbine and centrifugal compressor]², *Aerospace Technic and Technology*, vol. 7(74), pp. 30–40, ISSN 1727-7337.
- 12 **Parafejnik, V. P., Yevdokimov, V. E., Tertyshnyi, I. N. and Nefedov, A. N.** (2012), ²K voprosu optimizacii geometrii protochnoj chasti centrobezhnyh kompressorov prirodno gaza [Revisiting the optimization of natural gas centrifugal compressors rotor bundle]², *Compressor equipment and pneumatics*, vol. 2, pp. 10–17, ISSN 0865-5865.
- 13 **Tertyshnyi, I. N., Parafejnik, V. P., Nefedov, A. N., Rogalskiy, S. A., Kotenko, N. A., Timoshadchenko, D. N., Mikhailenko, S. A.** (2014), Termodinamicheskij analiz jeffektivnosti centrobezhnogo kompressora kak slozhnoj jenergotehnologicheskoy sistemy v sostave agregata tipa GPA-C-32P [Thermodynamic analysis of the efficiency of a centrifugal compressor as a complex energy system composed of units GPA-C-32P]², *Proceedings of XVI International Science and Technical Conference on Compressor Engineering, September 23–25*, vol. 1, pp. 328–339, REP-Holding Press, St. Petersburg, Russian.
- 14 **Santon, R. C., Kidger, J. W. and Lea, C. J.** (2002), ²Safety Developments in Gas Turbine Power Applications², *Proceedings of ASME Turbo-Expo 2002, Amsterdam, The Netherlands, June 3–6, 2002*, ASME Paper GT-2002-30469, pp. 959–966, ISBN 0-7918-3606-1, doi: 10.1115/GT2002-30469.
- 15 **Ponnuraj, B., Sultanian, B., Novori, A. and Pecchi, P.** (2003), ²3D CFD Analysis of an Industrial Gas Turbine Compartment Ventilation System², *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE'03), Washington, D.C., USA, November 15–21, 2003*, pp. 67–76, ISBN 0-7918-3718-1, doi: 10.1115/imece2003-41672.
- 16 **Klochkov, A. V., Kornilova, E. S. and Snitko, A. A.** (2005), ²Obespechenie vzryvozashchity gazoturbinnogo oborudovanija [Providing explosion protection of gas turbine equipment]², *Gazotrubinnye tehnologii [Gas turbo technology Magazine]*, vol. 8, pp. 20–22, ISSN 2311-2646.
- 17 **D'Ercole, M., Biffaroni, G., Grifoni, F., Zanobini, F. and Pecchi, P.** (2005), ²Results and Experience from GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation², *Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA, June 6-9, 2005*, pp. 275–283, ISBN 0-7918-4727-6, doi: 10.1115/GT2005-68053.
- 18 **Graf, E., Luce, T. and Willet, F.** ²Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures², *Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA, June 6–9, 2005*, pp. 587–593, ISBN 0-7918-4728-4, doi: 10.1115/GT2005-68574.
- 19 **Vahidi, D., Bagheri, H. and Glezer, B.** (2006), ²Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure², *Proceedings of ASME Turbo-Expo 2006, Barcelona, Spain, May 8–11, 2006*, pp. 607–616, ISBN: 0-7918-4240-1, doi: 10.1115/GT2006-90960.
- 20 **Mesropyan, A. V. and Mukhamedzyanova I. I.** (2010) ²Chislennoe modelirovanie gazodinamiki i teplo-massoperenosa v sisteme ohlazhdenija boksa GTD [Numerical simulation of gas dynamics and heat and mass transfer in gas turbine enclosure cooling system]², *Vestnik UGATU*, vol. 14, no. 1, pp. 25–31, ISSN 2225-2789.
- 21 **Trusov, P. V. and Charntsev, D. A.** (2010), ²Chislennoe modelirovanie teplovogo sostojanija shumoteplozashhitno gkozhuha gazoturbinnnoj ustanovki [Numerical simulation of thermal condition of gas turbine acoustic and thermal enclosure]², *Vestnik of Samara State University. Natural Science Series*, no. 4(78), pp. 117–126, ISSN 2411-6025.
- 22 **Charntsev, D. A.** (2012), *Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostojanija shumoteplozashhitnyh kozhuhov gazoturbinnnyh ustanovo* [Mathematic simulation of thermal condition of gas turbine acoustic and thermalproof enclosures] : synopsis for PhD thesis in Engineering Science : 05.13.18, Perm State University, Perm.
- 23 **Kostyuk, V. E., Kirilash, E. I. and Kravchuk, A. L.** (2013), ²Obobshhjonnaja matematicheskaja model' teplovogo sostojanija ukrytij gazoturbinnnyh ustanovok [Generalized mathematical model of thermal condition of gas turbine enclosures]², *Integrirrovannye tehnologii i jenergosberezenie [Technologies and Energy Conservation]*, no. 1, pp. 22–26, ISSN 2078-5364.
- 24 **Smirnov, A. V., Kostyuk, V. E., Tkachenko, D. A., Kirilash, E. I. and Slabko, Yu. N.** (2013), ²Obespechenie teplovogo rezhima silovogo bloka gazoperekachivajushhego agregata organizovanoj podachej vozduha pod shumoteploizolirujushhij kozhuh gazoturbinnogo dvigatelja [Providing thermal condition of turbo-compressor package power unit by air ventilation of acoustic and thermal enclosure]², *Vestnik dvigatelestroenija [Bulletin of engine-building]*, no. 2, pp. 99–107, ISSN 1727-0219.
- 25 **Shcherbakov, O. M., Tkachenko, D. O., Parafejnik, V. P., Gurinenko, V. M., Kostyuk, V. E., Skripka, O. I. and Kirilash, O. I.** (2015), ²Ekspiermental'ne doslidzhennja teplovogo stanu kozhuha dlja shumoteploizoljacii gazoturbinnogo dviguna DG90L2 u skladi turbobloka agregatu tipu GPA-C-16S [Experimental research on the thermal state of a shell for noise and heat insulation of the gte9012 gas turbine engine used for the mechanical drive of the gcu-c-16s turbo-compressor package]², *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, no. 6/7(78), pp. 35–42, ISSN 1729-3774, doi: 10.15587/1729-4061.2015.56244.
- 26 **Smirnov, A. V., Shchedrenkov, A. N., Shcherbakov, O. N., Karutskiy, A. Yu. and Parafejnik, V. P.** (2015), ²Chislennoe issledovanie techenija gaza v vyhlopnnyh traktah gazoperekachivajushhijh agregatov s gazoturbinnym privodom na baze dvigatelja DU80L1 [Numerical investigation of gas flow in exhaust ducts of turbo-compressor packages with gas turbine engine based on engine DU80L1]², *Vestnik dvigatelestroenija [Bulletin of engine-building]*, no. 2, pp. 199–206, ISSN 1727-0219.

Сведения об авторах (About authors)

Смирнов Андрей Витальевич – кандидат технических наук, Генеральный конструктор – начальник СКБ, ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина; e-mail: tkm@frunze.com.ua.

Smirnov Andriy – Ph. D., General designer – Head of Special Design Bureau, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine.

Парафейник Владимир Петрович – доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, отдел газодинамики, динамики и прочности машин, ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина; e-mail: spazha-2008@mail.ru, ORCID 0000-0001-7061-6992

Parafiiunyk Volodymyr – Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Leading researcher, Department of gas dynamics, dynamics and strength of machines, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine.

Щербаков Олег Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер-конструктор, отдел турбоблоков, ПАО «Сумское НПО», г. Сумы, Украина; e-mail: scherbakov_o@frunze.com.ua, ORCID 0000-0002-8431-6314

Shcherbakov Oleg – Ph. D., Leading design engineer, Department of turbounits, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine.

Епифанов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина; e-mail: aedlab@gmail.com.

Epifanov Sergiy – Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department, Department of aircraft engines design, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine.

Костюк Владимир Евгеньевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, кафедра конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», г. Харьков, Украина; e-mail: kostyuk.v@mail.ru, ORCID 0000-0003-0142-8060.

Kostiuk Volodymyr – Ph. D., Senior Researcher, Leading Researcher, Department of aircraft engine design, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Kharkiv, Ukraine.

Чобенко Владимир Николаевич – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора, ГП НПКГ «Зоря» - «Машпроект», г. Николаев, Украина; e-mail: vchobenko@mail.ru

Chobenko Volodymyr – Ph. D., Deputy General Designer, SE GTSPC «Zorya»-«Mashproekt», Mykolaiv, Ukraine.

Шевчук Владимир Васильевич – кандидат технических наук, ведущий конструктор, ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье, Украина; e-mail: 035011@ivchenko-progress.com

Shevchuk Volodymyr – Ph. D., Leading designer, Ivchenko-Progress SE, Zaporizhia, Ukraine.

Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:

Смирнов А. В. Интеграция энерготехнологических систем в составе газотурбинных компрессорных агрегатов газовой и нефтяной промышленности [Текст] / **А. В. Смирнов, В. П. Парафейник, О. Н. Щербаков, С. В. Епифанов, В. Е. Костюк, В. Н. Чобенко, В. В. Шевчук** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 13–25. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.02.

Please cite this article as:

Smirnov, A., Parafiiunyk, V., Shcherbakov, O., Epifanov, S., Kostiuk, V., Chobenko, V. and Shevchuk, V. (2016), ²Integration of energy systems in gas turbine-driven compressor packages for gas and oil industry², *Bulletin of NTU "KhPI"*. Series: *Power and heat engineering processes and equipment*, no. 9(1181), pp. 13–25, ISSN 2078-774X, doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.02.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Смірнов А. В. Інтеграція енерготехнологічних систем у складі газотурбінних компресорних агрегатів газової та нафтової промисловості [Текст] / **А. В. Смірнов, В. П. Парафійник, О. М. Щербаков, С. В. Єпифанов, В. Є. Костюк, В. М. Чобенко, В. В. Шевчук** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Харків : НТУ «ХПІ», 2016. – № 9(1181). – С. 13–25. – Бібліогр.: 26 назв. – ISSN 2078-774X. – doi: 10.20998/2078-774X.2016.09.02.

АНОТАЦІЯ У роботі окреслено основні задачі, які вирішуються в процесі інтеграції енерготехнологічних систем у складі газотурбінних компресорних агрегатів газової і нафтової промисловості, а також представлені результати вирішення деяких з них. Викладено результати узагальненого аналізу стану розвитку конвертованих газотурбінних двигунів для приводу турбокомпресорних агрегатів і розглянуті пріоритетні напрями їх подальшого вдосконалення з урахуванням досвіду створення промислового газотурбінного приводу.

Ключові слова: газоперекачувальний (турбокомпресорний) агрегат, газотурбінний привід, конвертація, відцентровий компресор, узгодження характеристик, турбоблок, кожух шумотеплоізолюючий, вихлопний тракт.

Получена (received) 18.01.2016