

С. М. УШАКОВ, А. Ю. КАРУЦКИЙ, О. Н. ЩЕРБАКОВ, С. А. ЖУКОВ

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЕПРОЕКТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО СОЗДАНИЮ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ВЫХЛОПНОГО ТРАКТА ГАЗОТУРБИННОГО КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА ТИПА ГПА-Ц-16С

В работе проведен анализ различных методов снижения выбросов загрязняющих веществ с выхлопными газами газотурбинных установок и основные ограничения по их применению. Выполнен анализ особенностей течения выхлопных газов в существующем выхлопном тракте для агрегата типа ГПА-Ц-16С с газотурбинным двигателем ДГ90Л2.1, в том числе с учетом закрутки потока на выходе из двигателя. Разработаны технические решения, обеспечивающие основные требования производителей систем каталитической очистки по неравномерности потока и требования производителя двигателя по величине потерь полного давления. Предложены технические решения, позволяющие заполнять утилизатор теплоты водой без останова газоперекачивающего агрегата.

Ключевые слова: монооксид углерода, система каталитической очистки выхлопных газов, выхлопной тракт, улитка, неравномерность потока, отклонение скорости, потери полного давления, выпрямитель, утилизатор теплоты.

С. М. УШАКОВ, А. Ю. КАРУЦКИЙ, О. М. ЩЕРБАКОВ, С. А. ЖУКОВ

РЕЗУЛЬТАТИ ПЕРЕПРОЕКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПО СТВОРЕННЮ НОВОЇ КОНСТРУКЦІЇ ВИХЛОПНОГО ТРАКТУ ГАЗОТУРБИННОГО КОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТУ ТИПУ ГПА-Ц-16С

В роботі наведено аналіз різних методів зниження викидів забруднюючих речовин з вихлопними газами газотурбінних установок і основні обмеження по їх використанню. Виконано аналіз особливостей течії вихлопних газів в існуючому вихлопному тракті для агрегату типу ГПА-Ц-16С з газотурбінним двигуном ДГ90Л2.1, в тому числі з урахуванням закрутки потоку вихлопних газів на виході з двигуна. Розроблено технічні рішення, що забезпечують основні вимоги виробників систем каталітичної очистки по нерівномірності потоку і вимоги виробника двигуна по величині втрат повного тиску. Запропоновано технічні рішення, що дозволяють заповнювати утилізатор теплоти водою без зупину газоперекачувального агрегату.

Ключові слова: монооксид вуглецю, система каталітичного очищення вихлопних газів, вихлопний тракт, завиток, нерівномірність потоку, відхилення швидкості, втрати повного тиску, випрямляч, утилізатор теплоти.

S. USHAKOV, A. KARUTSKY, O. SHCHERBAKOV, S. ZHUKOV

RESULTS OF PRE-DESIGN STUDIES ON THE DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN OF THE EXHAUST DUCT OF THE GAS TURBINE COMPRESSOR PACKAGE GPA-C-16S TYPE

This article summarizes the results of pre-design studies to reduce pollutant emissions of gas turbine compressor packages. The amount of pollutant emissions of compressor packages used at the Ukrainian gas transmission system as well as gas turbines manufactured by Ukrainian companies is presented. The main methods for reduction in pollutant emissions of gas turbines were analyzed. It was shown that one of the promising methods is to use special catalyst systems in the exhaust ducts. To select the catalyst location, a series of numerical simulations have been performed in the exhaust system of gas turbine compressor package GPA-C-16S type. It was shown that flow in the exhaust system has a complex structure mostly caused by features of the flow at the exhaust collector outlet. It was also found that swirling of the flow at the turbine outlet causes significant change of the flow at the exhaust system (18 % of the mass flow of exhaust gas moves along one of the wall and 82 % along another one). To prevent the degradation of the flow because of swirling at the turbine outlet the especially designed tongue was used at the exhaust collector. To reduce the overall non-uniformity of the flow the exhaust duct design with tubular straightener has been developed. To produce utility heat compressor packages of GPA-C-16S type can be equipped with heat recovery units, of between 3.5 to 9 MW. Their application allows achievement of thermal efficiencies of 0.36 to 0.46. The heat recovery units can contain several separate heat exchangers. Heat power control of the heat recovery units is carried out by heat exchangers on-off and by controlling the flow rate of exhaust gases through them. The design of the heat recovery units allows filling heat exchangers with water without shut-down of the gas turbine. To avoid high thermal stresses heat exchangers are cooled with atmospheric air supplied by fan of the heat recovery unit cooling system.

Key words: carbon monoxide, catalyst purification, exhaust system, exhaust scroll, flow uniformity, flow straightener, heat recovery unit.

Введение

В настоящее время на компрессорных станциях магистральных газопроводов преимущественное применение получили газоперекачивающие агрегаты (ГПА) с газотурбинным приводом (ГТП). Существуют следующие исполнения ГПА с ГТП: в капитальном здании цеха КС, ангарного и блочно-контейнерного исполнения. Для умеренных климатических условий широкое распространение получили ГПА в блочно-контейнерном ис-

полнении. Основными преимуществами ГПА данного типа являются уменьшенные массогабаритные характеристики и удельная металлоемкость при одинаковой мощности, высокая транспортабельность. Благодаря полной заводской готовности блоков ГПА удается сократить в 2–3 раза сроки ввода в эксплуатацию КС, так как нет необходимости в строительстве капитальных зданий для размещения оборудования, что позволяет сократить время и средства на строительство КС. Особенности компоновки агрегатов данного типа поз-

воляет проектировать выхлопные шахты с уменьшенными потерями полного давления по сравнению с другими типами ГПА, что снижает расход топливного газа и эксплуатационные затраты.

Газотурбинные ГПА имеют сравнительно низкий КПД и являются крупными источниками тепловых выбросов в окружающую среду. Располагаемая тепловая мощность в выхлопном тракте для агрегата типа ГПА-Ц-16С составляет около 30 МВт. При этом значительная доля тепловых потерь может быть уменьшена при использовании различных способов утилизации теплоты выхлопных газов.

Наиболее распространенным способом утилизации теплоты выхлопных газов ГПА в настоящее время является теплофикационный цикл для теплоснабжения КС, пристанционных поселков, тепличных хозяйств и пр. Недостатком такого способа является невозможность использования всех тепловых ресурсов ГТД из-за отсутствия в условиях КС постоянных потребителей вырабатываемого тепла.

Для реализации теплофикационного цикла газоперекачивающие агрегаты типа ГПА-Ц-16С оснащаются утилизаторами теплоты тепловой мощностью 0,5...9 МВт. Их применение позволяет достичь коэффициента использования топлива 0,36...0,46.

Основным требованием, предъявляемым к установкам утилизации теплоты, является регулирование тепловой мощности утилизатора теплоты в диапазоне 10–100 % [1, 2], а также возможность заполнения установки утилизатора холодным теплоносителем без останова ГПА [1, 2], что исключает потери по транспортировке газа.

Помимо вышеизложенного, одной из важнейших целей при проектировании новых и модернизации существующих КС является снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Прежде всего это относится к оксидам азота (NOx) и монооксиду углерода (СО).

В связи с имплементацией в Украине «Директивы Европейского парламента и Совета Европейского Союза 2010/75/ЕС от 24 ноября 2010 г. о промышленных выбросах», в соответствии с которым установлены ограничения по концентрации загрязняющих веществ (при нагрузках свыше 70 % от номинальной мощности ГТД): NOx – не более 75 мг/нм³, СО – не более 100 мг/нм³.

В табл. 1 представлены экологические характеристики наиболее распространенных на КС Украины газотурбинных ГПА [3], а также выпускаемых в Украине ГТД. Значения приведенных концентраций представлены для номинального режима работы двигателя.

Как видно из таблицы, экологические характеристики преимущественного большинства эксплуатируемых ГПА, а также отечественных ГТД

не соответствуют современным экологическим требованиям.

Основными методами снижения выбросов загрязняющих веществ с продуктами сгорания топлива в ГТД являются [4–7]:

- 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 [4, 5]. Ведущие мировые производители в области газотурбостроения активно ведут работы по созданию специальных систем смесеобразования и сжигания топливно-воздушной 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 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.

Таблица 1 – Экологические характеристики газотурбинных ГПА, применяемых на КС Украины и ГТД, выпускаемых в Украине

Тип ГПА (ГТД)	N, кВт	η, %	Приведенная концентрация (С) оксидов азота NOx, мг/нм ³	Приведенная концентрация (С) оксида углерода СО, мг/нм ³
ГТК-10И	10300	25,9	230	60
ГТК-10	10000	29	180	60
ГПА-Ц-6,3	6300	24	140	300
ГПУ-10	10000	27,6	145	60
ГТН-6	6300	24	150	245
ГТ-750-6	6000	27	180	110
ГТК-25И	23900	27,7	175	50
ДТ-71ПЗ	6300	30,5	150	300
ДТ-70П	8000	32,45	75	300
ДГ90Л2.1 ¹	16000	33,5	50	100
ДУ80Л1	25000	34,8	80	150
Д-336-2Т	6300	30,0	150	300
АИ-336-2-8	8000	30,8	150	300

¹ Характеристики ГТД ДГ90Л2.1 с новой малоэмиссионной камерой сгорания были подтверждены в процессе заводских испытаний.

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 [5]. 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 [5]. 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.

Цель работы

1. Проанализировать течение выхлопных газов в существующем выхлопном тракте для агрегата типа ГПА-Ц-16С с ГТД ДГ90Л2.1, в том числе с учетом закрутки потока на выходе из ГТД, определить место установки системы каталитической очистки выхлопных газов (СКОВ).

2. Предложить технические решения, обеспечивающие среднеквадратическое отклонение скорости от средней $\pm 15\%$, потери полного давления в выхлопном тракте не должны превышать 4905 Па на номинальном режиме.

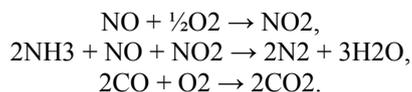
3. Предложить технические решения, позволяющие заполнять утилизатор водой без останова ГПА.

Исходные положения

В настоящем разделе приведена краткая характеристика СКОВ и основные ограничения по их применению.

Существует сравнительно небольшое количество производителей СКОВ для ГТД, среди которых следует отметить BASF (Германия), Haldor Topsoe (Дания), ЭКАТ (РФ) и другие.

Принцип действия СКОВ основан на реакциях восстановления NOx и CO под воздействием каталитического слоя при определенных температурах:



Традиционно СКОВ состоят из блоков, установленных в плоскости перпендикулярной направлению потока выхлопных газов. Блоки выполнены на основе высокопористых ячеистых материалов и структур с нанесенным на основание каталитическим слоем.

На рис. 1 представлена принципиальная схема выхлопного тракта с системой каталитической очистки выхлопных газов от CO и NOx.

Следует отметить, что для каталитической очистки выхлопных газов от NOx требуется большое количество реагента (раствора карбамида или аммиака), впрыскиваемого на входе в СКОВ. Для обеспечения надежной работы СКОВ необходимо точно контролировать количество подаваемого реагента, что приводит к необходимости использовать достаточно сложные системы регулирования. При этом возникает проблема с возможным «проскоком» аммиака, что представляет собой новую экологическую проблему. Данные факторы ограничивают возможность применения СКОВ от NOx на КС [5].

В тоже время системы каталитической очистки выхлопных газов от CO лишены указанных недостатков.

Применение СКОВ в выхлопных трактах ГПА сопряжено с рядом трудностей. С целью обеспечения эффективного протекания химической реакции окисления монооксида углерода необходимо соблюдение следующих условий:

- температура выхлопных газов должна находиться в определенных пределах (в зависимости от типа применяемого катализатора, но не ниже $250\text{ }^\circ\text{C}$);

- течение потока выхлопных газов на входе в СКОВ должно быть равномерным, среднеквадратическое отклонение скорости от среднего значения $\pm 15\%$. При этом сопротивление выхлопного тракта не должно превышать допустимые значения по ТУ на ГТД.

Для анализа характеристик течения в выхлопном тракте использовались средства вычислительной гидроаэромеханики, с использованием методик, изложенных в работах [8, 9], а также общепринятые зависимости:

– для среднерасходной скорости:

$$C_{\text{cp}} = \frac{G_m}{\rho F}, \quad (1)$$

где G_m – массовый расход выхлопных газов, кг/с;

ρ – плотность выхлопных газов, кг/м³;

F – площадь поперечного сечения, м².

– для максимального отклонения скорости от среднерасходной:

$$\delta C_{\text{max}} = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{cp}}}{C_{\text{cp}}}, \quad (2)$$

где C_{max} – максимальная скорость в сечении, м/с;

– для среднеквадратического отклонения скорости от среднерасходной:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{\sum (C_i - C_{\text{cp}})^2}{n-1}}}{C_{\text{cp}}}, \quad (3)$$

где C_i – скорость в измеряемой точке, м/с;

n – количество измеряемых точек.

Основные результаты исследования

Для обеспечения требуемых режимов транспорта газа двигатели в составе агрегатов эксплуатируются в диапазоне нагрузок 50...100 % от номинальной мощности для линейных КС и 30...100 % для дожимных КС и станций подземных хранилищ газа. Обеспечение приемлемых экологических характеристик ГТД в таком широком диапазоне мощностей представляет собой сложную научно-техническую проблему [3–6].

В рассматриваемой работе представлены результаты предпроектных исследований по созданию агрегата типа ГПА-Ц-16С для поставки в рамках реконструкции КС Ананьев. В качестве привода ГПА предполагалось использование ГТД ДГ90Л2.1 с существующей конструкцией камеры сгорания, обеспечивающей концентрацию СО в выхлопных газах на номинальном режиме работы двигателя 300 мг/нм³. Диапазон эксплуатационной мощности ГТД ДГ90Л2.1 на КС Ананьев – 7,1-13,3 МВт. По данным ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» при уменьшении мощности ГТД до 7,1 МВт наблюдается существенное увеличение уровня выбросов загрязняющих веществ.

В соответствии с договоренностью с ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» уменьшение выбросов NO_x должно обеспечиваться путем совершенствования камер сгорания ГТД, а СО – путем установки СКОВ в выхлопном тракте производства ПАО «Сумское НПО».

Поскольку в выхлопном тракте агрегатов предусматривается установка утилизатора теплоты для обеспечения требуемого уровня температуры выхлопных газов на входе в СКОВ, катализатор должен быть установлен перед утилизатором. На рис. 2 представлена конструктивная схема выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С существующей конструкции. Высота выхлопного тракта выбрана из условия требуемого рассеивания загрязняющих веществ, содержащихся в выхлопных газах, до уровня допустимых концентраций в рабочей зоне и близлежащих населенных пунктах. Для выбора места установки СКОВ в выхлопном тракте существующей конструкции была выполнена серия численных экспериментов. Целью экспериментов было выявление картины течения.

На рис. 3 представлена картина течения 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 2138 Па. Максимальное отклонение величины скорости от среднерасходной в предполагаемом сечении установки СКОВ (между диффузорами первой и второй ступени) составляет 400 %, среднеквадратичное – 128 %.

пени) составляет 400 %, среднеквадратичное – 128 %.

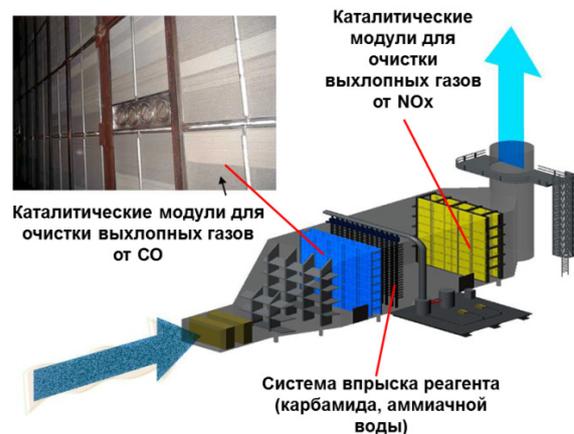


Рис. 1 – Принципиальная схема выхлопного тракта с системой каталитической очистки выхлопных газов от СО и NO_x (на примере использования СКОВ производства BASF)

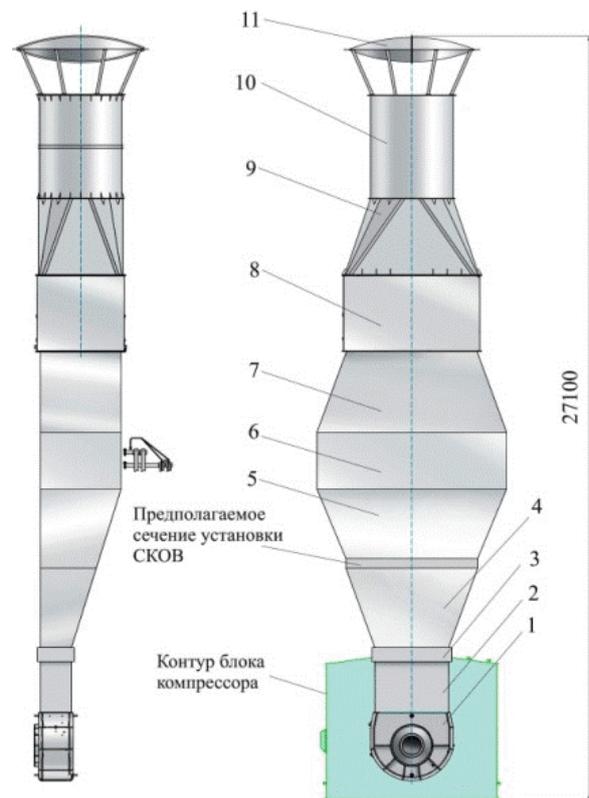


Рис. 2 – Конструктивная схема существующей конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С:

- 1 – улитка; 2 – переходник улитки; 3 – компенсатор; 4 – диффузор 1-й ступени; 5 – диффузор 2-й ступени; 6 – утилизатор теплоты выхлопных газов; 7 – переходник; 8 – шумоглушитель; 9 – конфузор; 10 – выхлопная труба; 11 – зонт

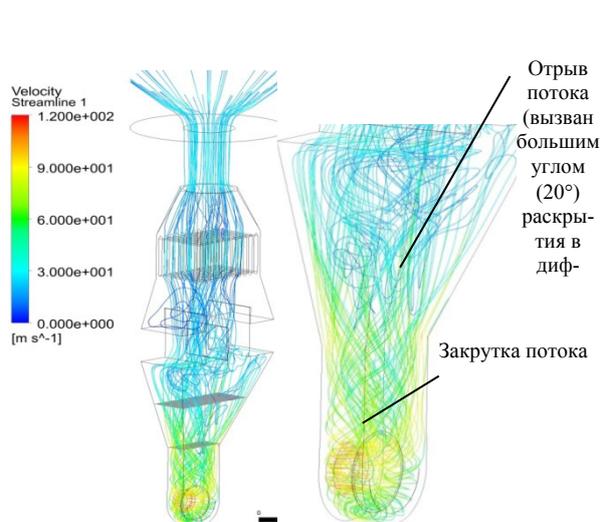


Рис. 3 – Картина течения в существующей конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С без учета закрутки потока на выходе из ГТД

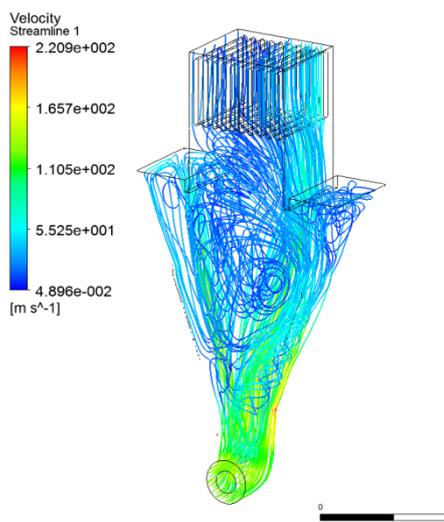


Рис. 4 – Картина течения в существующей конструкции выхлопного тракта с газоотводным коленом агрегата типа ГПА-Ц-16С без учета закрутки потока на выходе из ГТД

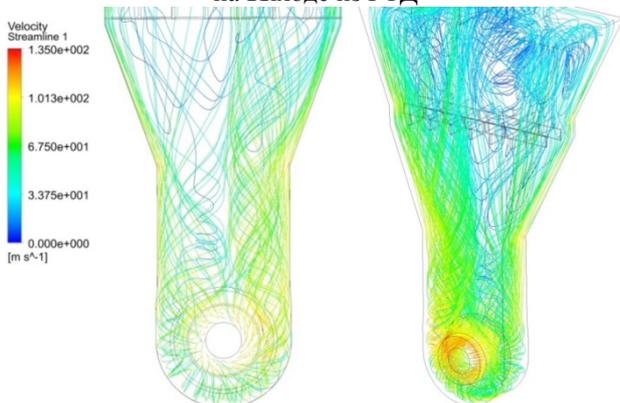


Рис. 5 – Картина течения в существующей конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С с учетом закрутки потока на выходе из ГТД

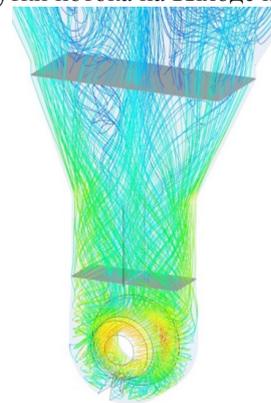


Рис. 6 – Картина течения с применением разделителя потока в улитке и последующих элементах выхлопного тракта

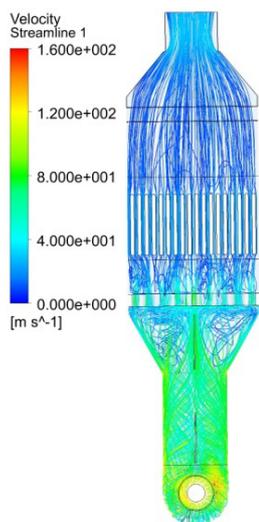


Рис. 7 – Картина течения в новом выхлопном тракте

Такая неравномерность течения в выхлопном тракте связана прежде всего с особенностями структуры потока выхлопных газов на выходе из улитки. Течение на выходе из улитки обладает симметричной закруткой, которая возникает в результате поворота потока, натекающего на обечайку улитки после выхода из осердиального диффузора. Эта закрутка сохраняется до выходного сечения улитки и распространяется по выхлопному тракту до шумоглушителя.

Для исключения особенностей течения выхлопных газов, связанных с улиткой, было решено заменить улитку на газоотводное устройство коленного типа. В результате численного эксперимента получены неудовлетворительные результаты: величина гидравлического сопротивления выхлопного тракта составила 5600 Па, что выше допустимого значения. Дальнейшие исследования с газоотводным устройством коленного типа не

проводились. Картина течения в выхлопном тракте с газоотводным устройством представлена на рис. 4.

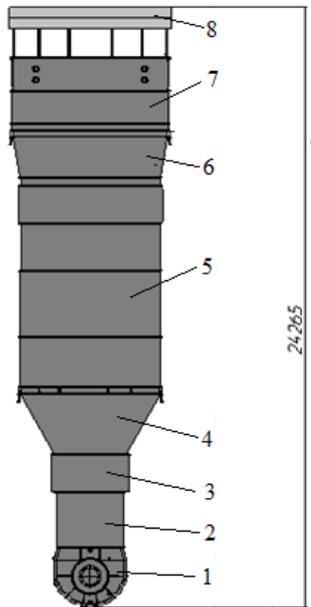


Рис. 8 – Конструктивная схема новой конструкции выхлопного тракта агрегата типа ГПА-Ц-16С с выравнивателем потока:
1 – улитка; 2 – переходник улитки;
3 – компенсатор; 4 – диффузор 1-й ступени;
5 – система СКОВ; 6 – диффузор 2-й ступени;
7 – утилизатор теплоты; 8 – зонт

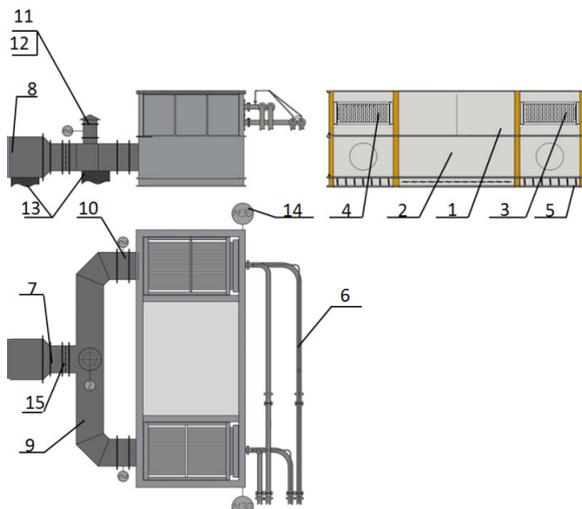


Рис. 9 – Утилизатор теплоты с системой охлаждения теплообменных секций:
1 – камера утилизатора теплоты; 2 – проставка;
3 – секция теплообменная ТО1; 4 – секция теплообменная ТО2; 5 – секция заслонки; 6 – трубопроводная обвязка; 7 – вентилятор; 8 – шумоглушитель подвода воздуха; 9 – коллектор; 10 – электроприводная заслонка поворотная; 11 – электроприводная заслонка; 12 – воздуховод; 13 – опора;
14 – МЭО; 15 – инерционные жалюзи

По данным ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект» величина угла выхода выхлопных газов из опорного венца силовой турбины в диапазоне режимов 50–100 % составляет 9° – 12° , а на холостом ходу – 20° от оси двигателя в сторону вращения ротора силовой турбины.

Картина течения в выхлопном тракте по результатам численного эксперимента с учетом угла выхода выхлопных газов из опорного венца (12°) в улитку представлены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, неравномерность течения в выхлопном тракте увеличилась. В предполагаемом сечении установки СКОВ максимальное отклонение скорости от среднерасходной составило 515 %, среднеквадратическое – 167 %. При этом, с учетом закрутки потока, сопротивление выхлопного тракта увеличилось на 13 % и составило 2410 Па.

Анализируя неравномерность распределения расходов в предполагаемом месте установки СКОВ с учетом закрутки выявлено, что соотношение расходов через левую и правую (со стороны газового компрессора) половину выхлопного тракта составляет 11,5 и 52,5 кг/с или 18 и 82 % соответственно.

Вышеперечисленные особенности течения газов в выхлопном тракте не соответствуют требованиям производителей СКОВ и не позволяют установить катализатор в выбранном сечении. При этом неравномерность распределения расходов по сечению выхлопного тракта крайне негативно влияет на теплопроизводительность и сопротивление утилизатора теплоты.

Последующая работа, связанная со СКОВ, была разделена на два этапа, первый – устранение влияния закрутки потока выхлопных газов на выходе из двигателя на неравномерность потока и неравномерное распределение расхода по сечению выхлопного тракта. Второй этап был посвящен приведению неравномерности потока выхлопных газов к требованиям производителей СКОВ в месте установки катализатора.

Для исключения негативных явлений, возникающих в следствии закрутки потока на выходе из ГТД, проведен ряд численных экспериментов с установкой дефлекторов, направляющих, рассекающих и разделителей потока в проточной части осердиального диффузора, сборной камере и переходнике улитки. В результате проведения более 50 численных экспериментов с различными вариантами установки вышеперечисленных элементов определен и выбран наиболее эффективный вариант с применением разделителя потока в улитке и последующих элементах выхлопного тракта. Вследствие выполненных доработок распределение расхода по сечению выхлопного тракта в месте установки СКОВ составило 48 и 52 %, среднеквадратическое отклонение скорости от среднерасходной – 128,3 %, максимальное отклонение

скорости от среднерасходной 399 %. При этом сопротивление выхлопного тракта увеличилось на 60 Па и составило 2470 Па. Картина течения с учетом выбранных решений представлена на рис. 6.

Для исключения осесимметричной закрутки, возникающей вследствие особенностей течения в улитке и достижения требований по установке СКОВ было проведено более 100 численных экспериментов с различными вариантами установки выравнивающих элементов. В качестве выравнивающих элементов использовались: установка ребер, образующих каналы, в т. ч. диффузионные в проточной части выхлопного тракта, шумоглушитель, выравниватель потока трубчатого типа в комбинации с прямыми участками.

В результате расчетов было определено, что наиболее эффективным способом минимизации неравномерности течения в выхлопном тракте для установки СКОВ является комбинация элементов проточной части с применением: выравнивателя потока трубчатого типа, прямых участков и шумоглушителя. Среднеквадратическое отклонение скорости от среднерасходной составило 16 %, суммарные потери полного давления составили 4630 Па. Картина течения представлена на рис. 7. По результатам расчетов была разработана новая конструкция выхлопного тракта, которая представлена на рис. 8.

В рамках работ по созданию выхлопного тракта выполнялся также поиск технических решений, позволяющих эксплуатировать утилизатор теплоты без останова ГПА, при этом регулировка тепловой мощности должна производиться в пределах 10–100 %.

Тепловая мощность утилизатора теплоты регулируется за счет включения-выключения теплообменных секций, а также за счет регулирования расхода выхлопных газов, омывающих трубы секции, за счет поворота заслонок. При заполнении утилизатора теплоты холодной водой на работающем ГПА происходит процесс кипения воды. Вследствие возникновения паровых пробок происходят гидроудары, что может привести к разрушению элементов утилизатора, трубопроводов подачи и отвода теплоносителя. Для запуска утилизатора при работающем ГТД теплообменные секции перед заполнением водой охлаждаются окружающим воздухом. ГТД в процессе охлаждения должен переводиться на режим холостого хода, вследствие чего уменьшается расход и температура выхлопных газов (расход – 18,3 кг/с, температура на выходе из ГТД – 305 °С по данным ГП НПКГ «Зоря»-«Машпроект»). В результате была разработана система охлаждения утилизатора теплоты, которая приведена на рис. 9. Для определения необходимого расхода охлаждающего воздуха, распределение температур на наружных поверхностях теплообменной секции и времени охлаждения были проведены расчетные исследо-

вания. В результате расчетов определено, что для достижения средней температуры не более 80 °С на поверхности теплообменных секций расход охлаждающего воздуха должен составлять 5,5 кг/с, время охлаждения – 20 минут. Расчет проводился при температуре окружающего воздуха 8 °С, исходя из конструкции жалюзи расход выхлопных газов через конструктивные зазоры составил не более 0,77 кг/с.

Выводы

Выхлопной тракт газотурбинного ГПА оказывает существенное влияние на конструктивные характеристики агрегата, а также на его экологические и энергетические показатели.

Расчетно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, выполняемые на предпроектной стадии работ по созданию новой конструкции агрегата ГПА-Ц-16С/76-1,44М1 позволяют сделать следующие выводы:

1. Для минимизации массогабаритных характеристик выхлопной системы и обеспечения ее эффективного функционирования требуется тщательная отработка проточной части, а также систем, обеспечивающих экологические характеристики агрегата и работу системы утилизации теплоты выхлопных газов.

2. Проблема уменьшения вредных выбросов как никогда актуальна для ГТС Украины и отечественных производителей ГТД и требует неотложной разработки новых технических решений для ее реализации, в т. ч. за счет применения системы СКОВ в составе выхлопного тракта ГПА.

3. Работоспособность и долговечность СКОВ определяется характером течения выхлопных газов на входе. С целью обеспечения требуемого уровня неравномерности потока на входе в СКОВ, по результатам численного моделирования предложена конструкция выхлопного тракта с применением разделителей и выравнивателя потока трубчатого типа. Как показали результаты расчетов, предложенная конструкция также обеспечивает требуемую величину гидравлического сопротивления потока в выхлопном тракте.

4. Одним из направлений утилизации теплоты выхлопных газов на КС является использование теплофикационного цикла. С целью обеспечения заполнения водой теплообменников утилизатора теплоты без останова агрегата, разработана специальная система охлаждения теплофикационного котла-утилизатора. Выполнены расчеты и определено время охлаждения, средняя температура поверхностей теплообменной секции и необходимый расход охлаждающего воздуха.

5. Для подтверждения значения потерь полного давления в выхлопном тракте необходимо выполнить его модельные и натурные испытания.

6. Целесообразно провести более глубокое исследование потерь полного давления выхлопного тракта с газоотводным устройством коленного типа и разработать технические решения по уменьшению гидравлических потерь.

Список литературы

1. *Типові технічні вимоги до газотурбінних газоперекачувальних агрегатів та їх систем* : затв. ПАТ «Укртрансгаз». Київ: ПАТ «Укртрансгаз», 2014. 87 с.
2. *Типовые технические требования к газотурбинным ГПА и их системам. СТО Газпром 2-3.5-138-2007* : утв. ОАО «Газпром». Москва: ООО ВНИИГАЗ, 2007. 64 с.
3. ОАО «Газпром». *Каталог удельных выбросов вредных веществ газотурбинных газоперекачивающих агрегатов СТО Газпром 2-3.5-039-2005* : каталог. Москва: ООО ВНИИГАЗ, 2005. 77 с.
4. Lecomte, Y., Ferrería, J. F., Fuente, Neuwahl, F., Canova, M., Pinasseau, A., Jankov, I., Brinkmann, T., Roudier, S., Sancho, L. D. (2017), *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*, EUR.
5. Галиуллин З. Т., Сальников С. Ю., Щуровский В. А. *Современные газотранспортные системы и технологии*. Под ред. В. А. Щуровского. Москва: Газпром ВНИИГАЗ, 2014. 346 с.
6. Щуровский В. А., Сеницын Ю. Н., Черемин А. В.; ВТИ-ЦИАМ. *Снижение выбросов вредных веществ ГТУ на компрессорных станциях ОАО «ГАЗПРОМ»* : научн.-техн. отчет. Москва, 2004.
7. Говдяк Р. М., Семчук Я. М., Чабанович Л. Б., Шелковський Б. І., Кривенко Г. М. *Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів*. Івано-Франківськ: Лілея, 2007. 556 с.
8. Смирнов А.В., Левашов В. А., Сидоренко Д. А., Гадяка В. Г., Маркушин А. Н. Расчетно-экспериментальные исследования всасывающего и выхлопного тракта ГТД энергоблока ГТЭС с двигателем НК-16 СТ. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. С. 32–36.
9. Смирнов А. В., Щедренков А. Н., Щербаков, О. Н., Каруцкий А. Ю., Парафейник В. П. Численное исследование течения газа в выхлопных трактах газоперекачивающих агрегатов с газотурбинным приводом на базе двигателя ДУ80Л1. *Вісник двигунобудування*. 2015. №2. С. 199–206.

References (transliterated)

1. PJSC "Ukrtransgaz" (2014), *Tipovi tehnlchni vimogi do gazoturblnih gazoperekachuvalnih agregativ ta yih system* [Typical Technical Requirments for Gas Turbine Compressor Packages and their Systems], Kyiv.
2. PJSC "Gazprom" (2007), *STO Gazprom 2-3.5-138-2007 Tipovye tehlicheskie trebovaniya k gazoturbinnym GPA I ih sistemam* [Typical Technical Requirments for Gas Turbine Compressor Packages and their Systems], Russia
3. PJSC "Gasprom" (2005), *STO Gazprom 2-3.5-039-2005. Katalog udelnyih vyibrosov vrednyih veschestv gazoturbinnyih gazoperekachivayuschih agregatov* [Catalogue of pollutant emissions of gas turbine compressor packages], Russia.
4. Lecomte, Y., Ferrería, J. F., Fuente, Neuwahl, F., Canova, M., Pinasseau, A., Jankov, I., Brinkmann, T., Roudier, S., Sancho, L. D. (2017), *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Large Combustion Plants*, EUR.
5. Galiullin, Z., Salnikov, S. and Shchurovsky, V. (2014) *Sovremennye gazotransportnye tehnologii i sistemy* [Modern Gas Transmission Systems and Technologies], Shchurovsky V. (Ed.), Gazprom VNIIGAZ, Moscow, Russia.
6. Shchurovsky, V., Sinityn, Yu. and Cheremin, A. (2004) *Snizhenie vyibrosov vrednyh veshchestv GTU na Kompessornih Stanciyah PJSC "Gazprom"* [Reduction in Pollutant Emissions of Gas Turbines at GAZPROM Compressor Stations], Moscow.
7. Govdyak, R., Semenchuk, Ya., Chabanovych, L., Selkovsiy, B., Kryvenko, G., (2007) *Energoekologichna bezpeka naftogazovyh obektiv* [Energy Ecological Safe of Gas-oil Sites], Ivani-Frankivs'k.
8. Smirnov, A., Levashiv, V., Sidirenko, D., Gadyaka, V., Markushin, A. (2010), "Raschetno-eksperimentvlnyie issledovaniya vsasyivayuschego i vyihlopного тракта GTD energobloka GTES s dvigatelem NK-16 ST [Theoretical and Experimental Study of Inlet and Exhaust Systems of Gas Turbine Power Unit with NK-16ST]", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 3(45), pp. 32–36.
9. Smirnov, A., Shchedrenkov, A., Shcherbakov, O., Karutskiy, A., Parafiynek, V. (2015) "Chislennoe issledovanie techeniya gaza v vyihlopnnyh traktah gazoperekachivayushih agregatov s gazoturbinnym privodom na baze dvigatelja DU80L1 [Numerical investigation of gas flow in exhaust ducts of turbocompressor packages with gas turbine engine based on engine DU80L1]", *Vestnik dvigatelestroeniya* [Bulletin of engine-building], no. 2, pp. 199–206.

Поступила (received) 16.03.2018

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ушаков Сергій Михайлович (Ушаков Сергей Михайлович, Ushakov Sergiy) – головний конструктор компресорного устаткування, СКБ, ПАТ Сумське НВО, м. Суми, Україна, e-mail: tkm@snpo.ua.

Каруцький Андрій Юрійович (Каруцкий Андрей Юрьевич, Karutsky Andriy) – заступник начальника відділу загальної збірки ГПА – начальник бюро, СКБ, ПАТ С сумське НВО, м. Суми, Україна, e-mail: tkm@snpo.ua.

Щербаков Олег Миколайович (Щербаков Олег Николаевич, Shcherbakov Oleg) – кандидат технічних наук, заступник начальника відділу спеціальних систем – начальник бюро, СКБ, ПАТ Сумське НВО, м. Суми, Україна, e-mail: tkm@snpo.ua.

Жуков Сергій Анатолійович (Жуков Сергей Анатольевич, Shukov Sergiy) – старший науковий співробітник, СКБ, ПАТ Сумське НВО, м. Суми, Україна, e-mail: tkm@snpo.ua.