

УДК 621.438

А. В. СМИРНОВ, О. Н. ЩЕРБАКОВ, Д. А. ТКАЧЕНКО,
В. П. ПАРАФЕЙНИК, Ю. Н. СЛАБКО

ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ СИСТЕМЫ ВЕНТИЛЯЦИИ УНИФИЦИРОВАННОГО СИЛОВОГО БЛОКА ТУРБОКОМПРЕССОРНЫХ АГРЕГАТОВ С ГТД ДУ80Л1, НК-36СТ И НК-16СТ

В статье рассмотрены некоторые особенности системы вентиляции унифицированного силового блока газотурбинных компрессорных агрегатов с приводом на базе двигателей ДУ80Л1 (конструкции ГП НПКГ «Зоря»-«Машипроект», г. Николаев, Украина), НК-36СТ и НК-16СТ (ПАО «Кузнецов», г. Самара, РФ). Представлены результаты численного моделирования теплового состояния силовых блоков с различными вариантами подвода и организации течения вентиляционного воздуха внутри шумотеплоизолирующего кожуха. Рассмотрены особенности схемы и алгоритма работы системы вентиляции, а также представлены результаты расчетно-экспериментального исследования влияния неподвижных элементов вентилятора и способа их установки в блоке вентиляции на его аэродинамические характеристики. Представленные в работе технические решения повышают надежность работы агрегата за счет обеспечения требуемых температурных условий работы двигателя и вспомогательного оборудования силового блока (в диапазоне температур наружного воздуха от минус 40 °С до плюс 45 °С), а также позволят снизить энергопотребление системы вентиляции, примерно, на 18 %.

Ключевые слова: турбокомпрессорный агрегат, газотурбинный привод, блок силовой, тепловое состояние, система вентиляции, численное исследование.

Введение

В настоящее время в газовой и нефтяной промышленности преимущественное применение нашли турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с газотурбинным приводом.

Основным системообразующим блоком-модулем агрегатов конструкции ПАО «Сумское НПО» (далее

ПАО), создаваемых на основе центробежных компрессоров (ЦК) и конвертированных газотурбинных двигателей (ГТД) авиационного и судового типов, является турбоблок (рис. 1).

Турбоблок традиционно создается на единой фундаментной раме, которая используется для размещения приводного ГТД, ЦК, газоотводного устройства, а также элементов вспомогательных систем.

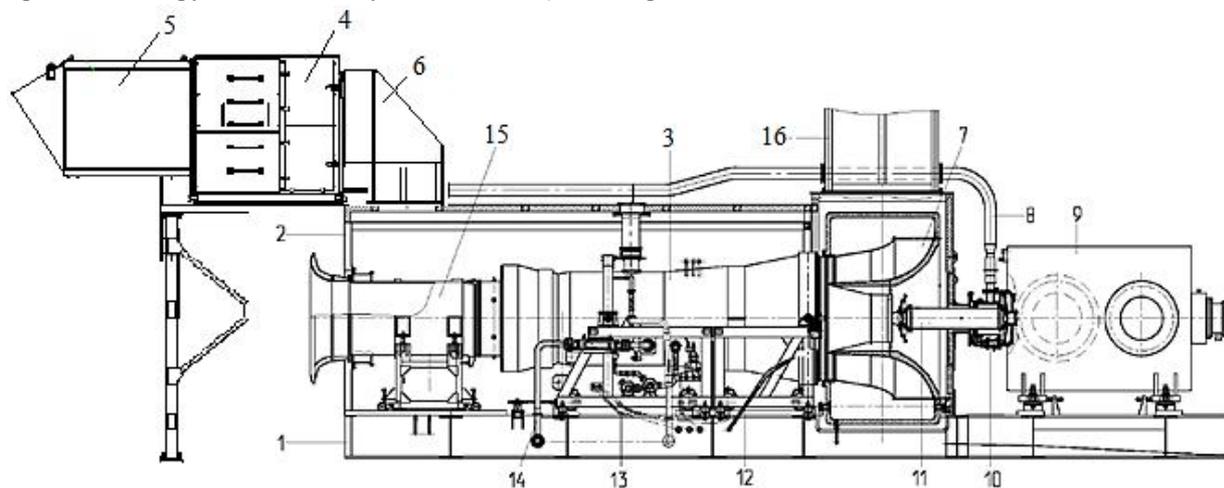


Рис. 1. Турбоблок агрегата типа ГПА-Ц-25 ангарного исполнения:
1 – рама; 2 – кожух шумотеплоизолирующий (КШТ); 3 – ГТД; 4 – блок вентиляции; 5 – шумоглушитель всаса воздуха; 6 – воздуховод подвода воздуха в КШТ; 7 – газоотводное устройство; 8 – трубопровод системы наддува кожуха муфты; 9 – ЦК; 10 – кожух муфты; 11 – муфта; 12 – трубопровод подвода воздуха на охлаждение турбины; 13 – элементы системы смазки ГТД; 14 – трубопровод топливного газа; 15 – уравнивательная труба; 16 – шумоглушитель сброса воздуха из КШТ

Для снижения уровня шума, а также защиты персонала и оборудования компрессорной станции от теплового излучения, возникающего при работе ГТД, двигатели совместно с газоотводным устройством, элементами системы смазки, трубопроводами топливного газа, контрольно-измерительными приборами и средствами электромонтажа устанавливаются в специальных шумотеплоизолирующих кожухах (КШТ), входящих в состав блока силового (БС). ГТД и оборудование БС сохраняют работоспособность в определенном диапазоне температур. Для обеспечения приемлемых температурных условий работы двигателя и вспомогательного оборудования БС оборудуют системой механической вентиляции.

Ввиду особенностей компоновки ТКА, а также сложности происходящих в БС термогазодинамических процессов проектирование кожуха и системы его вентиляции, обеспечивающей приемлемый температурный режим работы БС в широком диапазоне температур окружающего воздуха, представляет собой достаточно сложную расчетную и конструктивную задачу.

При эксплуатации ТКА производства ПАО были выявлены следующие недостатки, вызванные несовершенством системы вентиляции БС:

- сложность запуска двигателя из-за перемерзания трубопроводов системы смазки ГТД при низких температурах окружающего воздуха;
- перегрев вспомогательного оборудования и контрольно-измерительных приборов, установленных в БС, из-за интенсивного теплового излучения наиболее нагретых участков корпусов ГТД при высоких температурах окружающей среды;
- образование в КШТ застойных зон с высокой температурой воздуха и возможной взрывоопасной концентрацией газозвдушной смеси в случае утечки топливного газа.

В настоящей работе представлены результаты расчетно-исследовательских и конструкторских работ, посвященных разработке более эффективной и надежной системы вентиляции унифицированного БС ТКА с приводом на базе двигателей ДУ80Л1, НК-36СТ и НК-16СТ.

1. Выбор способа подвода и организации течения вентиляционного воздуха внутри КШТ

В настоящее время появилась возможность численного моделирования физических процессов, происходящих при вентиляции БС [1-9]. Однако, как показал анализ указанных публикаций, выполненный авторами работы [10], в них отсутствует обобщенный подход к моделированию теплового состояния БС. Для устранения этого недостатка

специалистами Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт» была разработана обобщенная математическая модель теплового состояния БС [10] и отработана методика его расчета с использованием программного комплекса ANSYS Fluent [11]. Разработанная методика позволяет рассчитывать температуры воздуха в БС, внутренних и наружных поверхностей стенок кожуха в широком диапазоне расходов и температур вентиляционного воздуха по данным термометрирования корпуса ГТД. Результаты численного моделирования теплового состояния унифицированного БС, представленные в данной работе, были получены с использованием указанной математической модели и методики расчета.

Согласно ТУ на рассматриваемые типы ГТД температура воздуха в БС должна находиться в пределах $+5...+60^{\circ}\text{C}$. Поскольку ГТД ДУ80Л1 имеет более высокие температуры наружных поверхностей корпусов расчеты теплового состояния, представленные в настоящей работе, были выполнены для БС с этим типом двигателя.

В существующих конструкциях БС производства ПАО вентиляционный воздух поступает в пространство КШТ через проем в крыше (рис. 2).

На рисунке 3,а представлены результаты численного моделирования теплового состояния БС с подводом вентиляционного воздуха в районе КНД ГТД при температуре окружающей среды минус 40°C и расходе вентиляционного воздуха равном $3,85\text{ кг/с}$. Как видно из рисунка, при этом в районе уравнивающей трубы и КНД ГТД образуются зоны с температурой воздуха ниже $+5^{\circ}\text{C}$, что не соответствует требованиям ТУ на двигатель. Следует отметить, что снижение расхода воздуха позволяет повысить температуру воздуха в БС до требуемого уровня, однако ввиду интенсивного инфракрасного излучения от поверхностей корпусов ГТД в районе камеры сгорания и силовой турбины возникают участки с высокой (до 200°C) температурой внутренних поверхностей стенок КШТ. Это может привести к выходу из строя вспомогательного оборудования БС (газоанализаторов, светильников, тепловых пожарных извещателей и пр.)

Указанного недостатка лишены схемы с подводом воздуха в районе компрессора высокого давления или камеры сгорания. Однако, как показали результаты численного моделирования (рис. 3, б), в данном случае при температуре окружающей среды выше плюс 30°C в КШТ могут образовываться обширные участки с температурой воздуха выше плюс 60° , что больше допустимых. Следует отметить, что при увеличении расхода вентиляционного воздуха с 15 кг/с до 25 кг/с распределение температур воздуха в КШТ изменяется незначительно. Полученный ре-

зультат качественно согласуется с результатами, представленными в работе [12] и свидетельствует о неэффективности последующего снижения температуры воздуха в КШТ за счет увеличения расхода воздуха и, соответственно, мощности вентиляторов.

Исходя из вышесказанного, следует сделать

вывод о том, что для обеспечения приемлемого температурного режима работы ГТД и вспомогательного оборудования БС в широком диапазоне температур окружающего воздуха необходимо осуществлять распределение вентиляционного воздуха внутри КШТ.

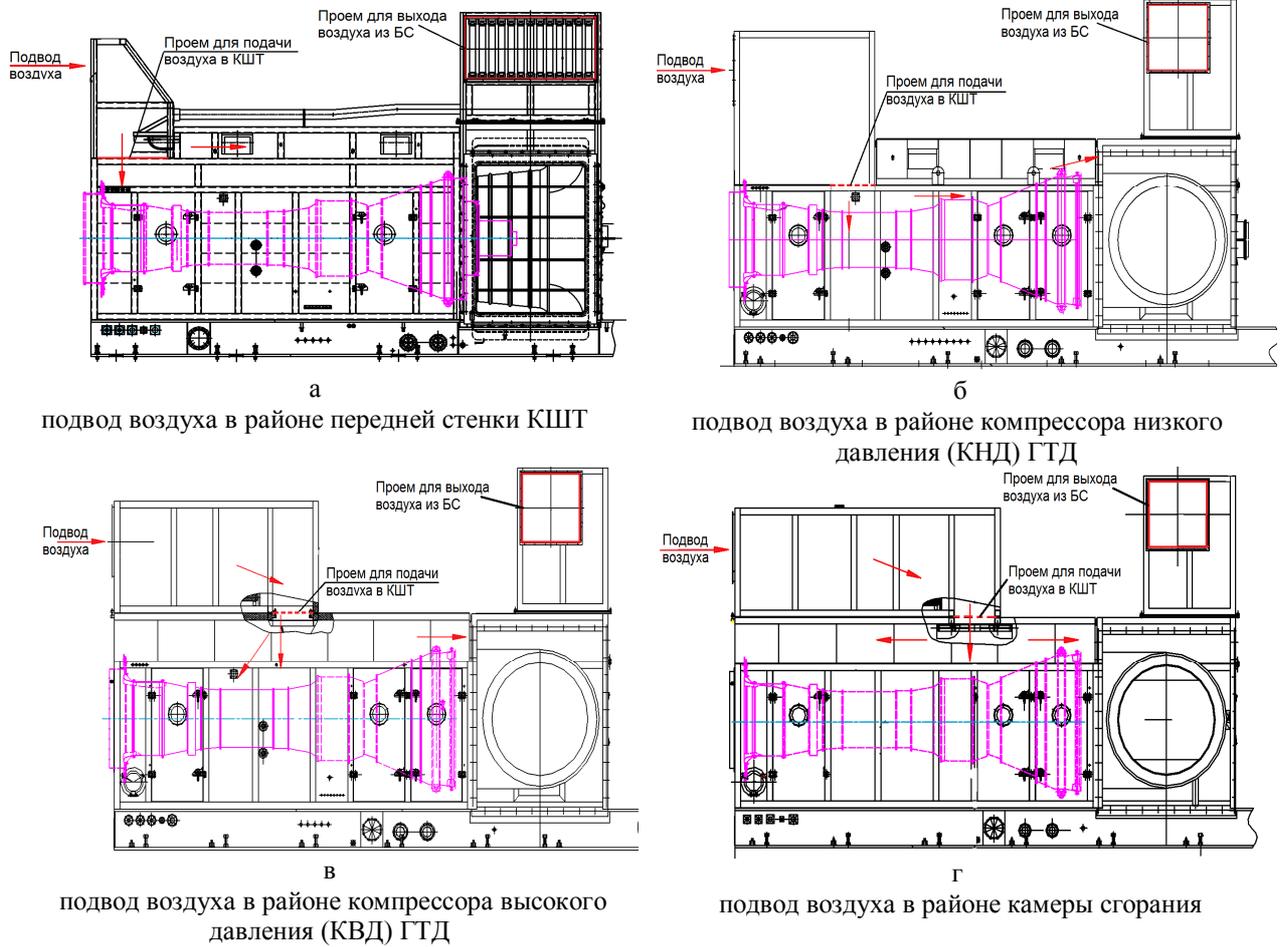


Рис. 2. Конструктивные схемы БС существующих конструкций с различными вариантами подвода вентиляционного воздуха

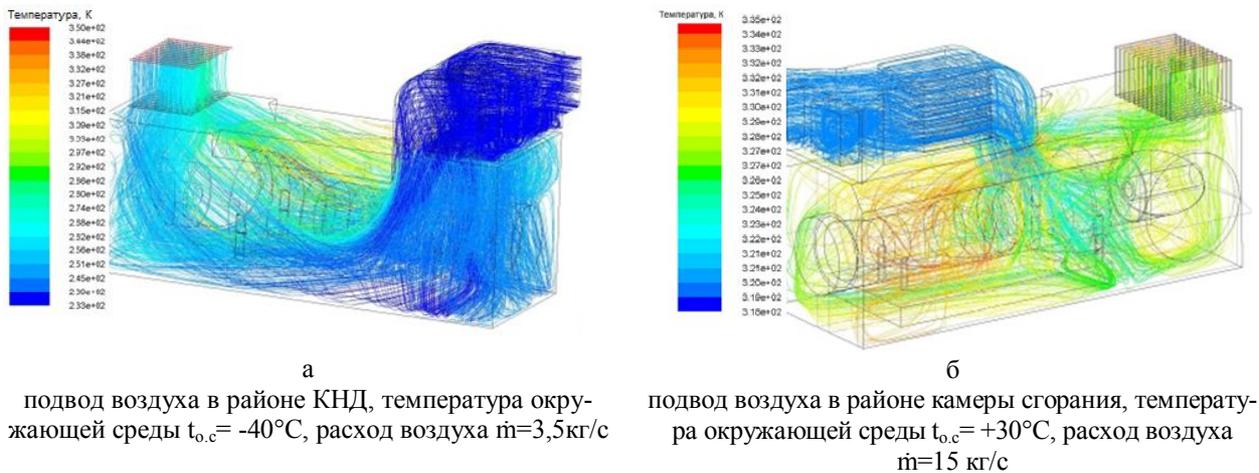


Рис. 3. Линии тока вентиляционного воздуха в БС, окрашенные в соответствии с устанавливающейся температурой воздуха

Организация течения вентиляционного воздуха может осуществляться с помощью специальных устройств: дефлекторов [11], рассекателей, сопел [13-15] и т.п. В настоящей работе на основании выполненных численных исследований предложена конструкция БС со специальным припотолочным экраном, в котором выполнены проемы, позволяющие распределять вентиляционный воздух внутри КШТ и обеспечивающая достаточно равномерное обтекание ГТД. На рисунке 4 представлены результаты расчета теплового состояния БС с припотолочным экраном при температуре окружающей среды

минус 40°C и плюс 45°C. Как видно из рисунка, в случае применения припотолочного экрана распределение температур воздуха в БС в целом соответствует требованиям ТУ на ГТД в диапазоне температур атмосферного воздуха от минус 40 °C до плюс 45 °C. Полученные результаты численного исследования позволили определить требуемый диапазон расходов вентиляционного воздуха, а также выбрать места установки вспомогательного оборудования БС с целью обеспечения приемлемого для него температурного режима.

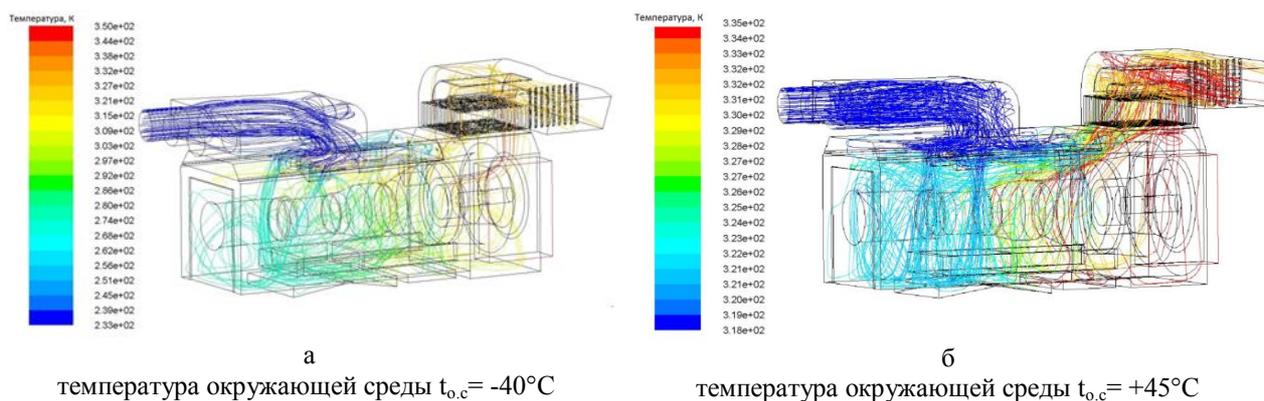


Рис. 4. Линии тока вентиляционного воздуха в БС с припотолочным экраном, окрашенные в соответствии с температурой воздуха

2. Выбор схемы и алгоритма работы системы вентиляции. Конструктивные особенности вентилятора и результаты испытаний опытного образца

В настоящее время в БС с ГТД ДУ80Л1, НК-16СТ или НК-36СТ применяются блоки вентиляции с двумя установленными параллельно осевыми вентиляторами мощностью 30 кВт и 11 кВт, соответственно. Анализ характеристик применяемых вентиляторов продемонстрировал невозможность обеспечения с их использованием минимального расхода воздуха, необходимого для обеспечения приемлемого температурного режима БС при низких температурах окружающей среды.

По результатам проработки различных схем системы вентиляции была выбрана схема с 3-мя параллельно установленными вентиляторами меньшей мощности. В данной схеме 2 основных вентилятора с регулированием частоты вращения работают одновременно, а третий находится в резерве на случай выхода из строя одного из основных вентиляторов. Как показал анализ совместных характеристик вентиляторов и сети, энергопотребление при параллельной работе двух вентиляторов с частотным регулированием на 40% ниже, чем при работе одного вентилятора (при условии равенства расходов вен-

тиляционного воздуха).

Параллельная работа двух вентиляторов также более предпочтительна по следующим причинам:

- обеспечивается более равномерное обтекание ГТД [17];
- снижаются перетоки через негерметичные заслонки, установленные в блоке вентиляции за неработающим вентилятором;
- повышается уровень взрывозащиты БС за счет отсутствия периода полного исчезновения избыточного давления и расхода воздуха при отказе одного из вентиляторов [17].

Согласно [18, 19] существует ряд исполнений одноступенчатых осевых вентиляторов отличающихся компоновочными схемами (рис. 5).

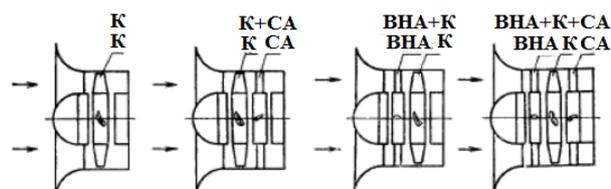


Рис. 5. Схемы исполнения одноступенчатых осевых вентиляторов: К – рабочее колесо (крыльчатка); СА – спрямляющий аппарат; ВНА – входной направляющий аппарат

С целью выбора наиболее целесообразного исполнения вентилятора была выполнена серия численных исследований с использованием программного комплекса ANSYS CFX. В процессе исследования определялось влияние установки обтекателя, спрямляющего аппарата, а также способа установки входного коллектора на аэродинамическую характеристику вентилятора.

Проектирование обтекателя было выполнено с учетом рекомендаций [18], решетки профилей спрямляющего аппарата по методике, изложенной в [19].

Расчеты выполнены с использованием тетраэдрических сеток, созданных с помощью сеточного генератора ANSYS Meshing. Количество элементов расчетной сетки составляло ~10 миллионов ячеек.

Моделирование производилось в стационарной постановке в 6-7 точках. Минимальная производительность вентилятора принималась равной производительности в точке перегиба заявленной производителем крыльчатки характеристики. Согласно [20] точка перегиба характеристики соответствует возникновению неустойчивых режимов работы.

Течение на входе в вентилятор принималось равномерным, направленным по нормали ко входному сечению. В качестве граничных условий на входе задавалось статическое давление и температура, на выходе – массовый расход. Течение принималось адиабатическим, на внутренних поверхностях стенок задавалось граничное условие «прилипания». Расчеты были выполнены с использованием SST модели турбулентности. Течение в радиальных зазорах между крыльчаткой и корпусом вентилятора не учитывалось. Связь между расчетными доменами осуществлялась с помощью модели интерфейса “Stage”.

Расчетные и экспериментальные характеристики вентилятора представлены на рисунке 6.

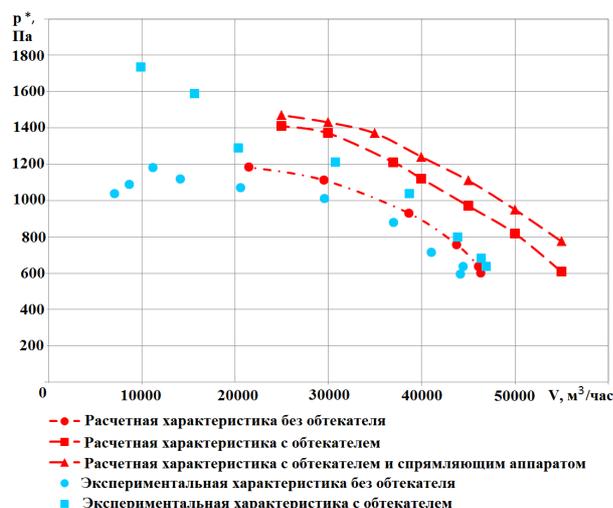


Рис. 6. Расчетные и экспериментальные характеристики вентилятора

Как показали результаты численного моделирования, применение обтекателя на входе в вентилятор позволяет повысить полное давление в рабочей точке на 19%, а применение спрямляющего аппарата еще на 8%. Кроме того, применение спрямляющего аппарата позволяет уменьшить закрутку потока на выходе из вентилятора. В результате этого статическое давление увеличивается на 15%.

Для подтверждения расчетных характеристик вентилятора был изготовлен и испытан его опытный образец. Экспериментальные характеристики вентилятора представлены на рис. 6. Как видно из рисунка, результаты численного моделирования качественно хорошо согласуются с результатами испытаний. Расхождение между экспериментальными и расчетными характеристиками составляет 7-16%. Полученное расхождение, по-видимому, вызвано не учетом в расчетной модели особенностей течения в радиальных зазорах, а также неучетом в расчетной модели клеммной коробки электродвигателя, находящейся в потоке рабочей среды.

Согласно [20-22] конструктивные особенности входных устройств осевых вентиляторов оказывают существенное влияние на их характеристику. Вентиляторы в зависимости от особенностей их установки могут изготавливаться со входным коллектором или без него. Как показали результаты численного моделирования, применение коллектора позволяет снизить гидравлические потери на участке до входа в рабочее колесо вентилятора со 140 Па до 80 Па (примерно, на 43%). Примерно такой же результат достигается в случае применения входного коллектора, установленного на входе в блок вентиляции. Исходя из конструктивных особенностей блока вентиляции данный вариант установки входного коллектора был признан наиболее целесообразным.

В целом следует отметить, что рассмотренные технические решения (параллельная работа двух вентиляторов с частотным регулированием, установка входного коллектора и применение в конструкции вентилятора спрямляющего аппарата) позволяют снизить энергопотребление системы вентиляции, примерно, на 18% по сравнению с конструкциями, применявшимися ранее.

Заключение

По результатам численного исследования была предложена конструкция унифицированного БС ТКА с приводом на базе двигателей ДУ80Л1, НК-36СТ и НК-16СТ со специальным припотолочным экраном, который обеспечивает распределение вентиляционного воздуха. Определены места наиболее целесообразного размещения вспомогательного оборудования БС, а также разработана система

его вентиляции. Представленные 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, а также снизить энергопотребление системы вентиляции, примерно, на 18%.

Результаты настоящего исследования позволили также разработать рекомендации по усовершенствованию конструкции вентиляторов при их проектировании в ПАО.

Литература

1. Santon, R. C. *Safety Developments in Gas Turbine Power Applications* [Электронный ресурс] / 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. DOI :10.1115/GT2002-30469. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
2. *3D CFD Analysis of an Industrial Gas Turbine Compartment Ventilation System* [Электронный ресурс] / B. Ponnuraj, B. Sultanian, A. Novori [at all] // *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE'03), Washington, D.C., USA, November 15-21, 2003.* – P. 67–76. DOI : 10.1115/imece2003-41672. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
3. Клочков, А. В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / А. В. Клочков, Е. С. Корнилова, А. А. Снитко // *Газотурбинные технологии.* – 2005. – № 8. – С. 20–22.
4. *Results and Experience from GeEnergy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation* [Электронный ресурс] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Griffoni [at all] // *Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005.* – P. 275-283. DOI : 10.1115/GT2005-68053. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
5. Graf, E. *Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures* [Электронный ресурс] / E. Graf, T. Luce, F. Willet // *Proceedings of ASME TurboExpo 2005, Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005.* – P. 587-593. DOI : 10.1115/GT2005-68574. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
6. Vahidi, D. *Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure* / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer [Электронный ресурс] // *Proceedings of ASME TurboExpo 2006, Barcelona, Spain. May 8-11, 2006.* – P. 607-616. DOI : 10.1115/GT2006-90960. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
7. 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.
8. Трусов, П. В. Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки [Текст] / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев // *Вестник СамГУ : сб. науч. тр. Сер. : Естественнонаучная серия.* – 2010. – № 4 (78). – С. 117–126.
9. 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.
10. Костюк, В. Е. *Обобщённая математическая модель теплового состояния крытых газотурбинных установок* [Текст] / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, А. Л. Кравчук // *Интегрированные технологии и энергосбережение.* – 2013. – № 1. – С. 22–26.
11. Обеспечение теплового режима силового блока газоперекачивающего агрегата организованной подачей воздуха под шумотеплоизолирующий кожух газотурбинного двигателя [Текст] / А. В. Смирнов, В. Е. Костюк, Д. А. Ткаченко [и др.] // *Вестник двигателестроения.* – 2013. – № 2. – С. 99-107.
12. Мерзляков, Е. В. Анализ факторов, влияющих на температурный режим в кожухе газоперекачивающего агрегата [Текст] / Е. В. Мерзляков // *Вестник Ижевского государственного технического университета.* – 2013. – № 1. – С. 150-151.
13. Пат. 2161715 Российская Федерация, МПК F02C7/18. Устройство для охлаждения газотурбинной установки [Текст] / Карандашов Б. М., Кислицын Г. Ф., Митин Е. М., Соколовский М. И. ; заявитель и патентообладатель ОАО НПО «Искра». – № 99102745/06 ; заявл. 08.02.99 ; опубл. 10.01.2001.
14. Пат. 2406845 Российская Федерация, МПК F02C7/18. Устройство для охлаждения газотурбинной установки [Текст] / Бурдюгов С. И., Бояришинов В. И., Кожевников В. Ф., Мельничук В. Г. ; заявитель и патентообладатель ОАО НПО «Искра». – № 2009111973/06 ; заявл. 31.03.09 ; опубл. 20.12.10, Бюл. № 35. – 5 с.
15. Пат. 2460893 Российская Федерация. МПК F02C7/18. Устройство для охлаждения газотурбинной установки [Текст] / Зарицкий В. И., Кустов Ю. И., Макаревич Ю. Л. ; заявитель и патентообладатель ОАО НПО «Искра». – № 2010152269/06 ; заявл. 20.12.10 ; опубл. 10.09.12, Бюл. № 25. – 6 с.
16. Кирилаш, Е. И. Численное исследование по токораспределения в крытии газотурбинной установки, вентилируемом одним и двумя вентиляторами [Электронный ресурс] / Е. И. Кирилаш // *Интегрированные технологии и энергосбережение.* – 2013. – № 2. – С. 57-61. – Режим доступа : http://library.kpi.kharkov.ua/JUR/ITE_2013_2_Kirilash.pdf. – 1.04.2016.
17. Опыт НПО «Искра» в области создания газоперекачивающих агрегатов [Текст] / С. И. Бурдюгов, М. И. Соколовский, С. В. Злобин [и др.] // *Труды XVI Международной научно-технической конференции по компрессоростроению, Санкт-Петербург.*

бург, 23-25 сентября 2014 г. – СПб, 2014. – Т. 1. – С. 26-43.

18. ГОСТ 11442-90 Вентиляторы осевые общего назначения [Текст]. – Взамен ГОСТ 11442-74 ; введ. 1990–16–08. – Москва : Гос. комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам ; М. : Изд-во стандартов, 1990. – 19 с.

19. Брусиловский, И. В. Аэродинамика осевых вентиляторов [Текст] / И. В. Брусиловский. – М. : Машиностроение, 1984. – 240 с.

20. Вахвахов, Г. Г. Работа вентиляторов в сети [Текст] / Г. Г. Вахвахов. – М. : Стройиздат, 1975. – 101 с.

21. Соломахова, Т. С. Особенности установки и выбора осевых вентиляторов [Электронный ресурс] / Т. С. Соломахова // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). – 2011. – № 6. – С. 38-50. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=5030. – 1.04.2016.

22. Соломахова, Т. С. Об эффективной работе вентиляторов в системах вентиляции [Электронный ресурс] / Т. С. Соломахова // Вентиляция, отопление, кондиционирование воздуха, теплоснабжение и строительная теплофизика (АВОК). – 2007. – № 1. – С. 8-13. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3481. – 1.04.2016.

References

1. Santon, R. C., Kidger, J. W., Lea, C. J. Safety Developments in Gas Turbine Power Applications. *Proceedings of ASME Turbo-Expo 2002*, Amsterdam, 2002, ASME Paper GT-2002-30469, pp. 959-966. DOI : 10.1115/GT2002-30469.

2. Ponnuraj, B., Sultanian, B., Novori, A., Pecchi, P. 3D CFD Analysis of an Industrial Gas Turbine Compartment Ventilation System. *Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress (IMECE'03)*, Washington, 2003, pp. 67–76. DOI : 10.1115/imece2003-41672.

3. Klochkov, A. V., Kornilova, E. S., Snitko, A. A. Obespechenie vzyvozashhity gazoturbinnogo oborudovaniya [Providing explosion protection of gas turbine equipment]. *Gas turbo technology Magazine*, 2005, no. 8, pp. 20–22.

4. D'Ercole, M., Biffaroni, G., Grifoni, F., Zanolini, F., Pecchi, P. Results and Experience from GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation. *Proceedings of ASME TurboExpo 2005*. Reno, 2005, pp. 275-283. DOI : 10.1115/GT2005-68053.

5. Graf, E., Luce, T., Willet, F. Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures. *Proceedings of ASME TurboExpo 2005*. Reno, 2005, pp. 587-593. DOI : 10.1115/GT2005-68574.

6. Vahidi, D., Bagheri, H., Glezer, B. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure. *Proceedings of ASME TurboExpo*

2006. Barcelona, 2006, pp. 607-616. DOI : 10.1115/GT2006-90960.

7. Mesropjan, A. V. Chislennoe modelirovanie gazodinamiki i teplomassoperenosa v sisteme ohlazhdeniya boksa GTD [Numerical simulation of gas dynamics and heat and mass transfer in gas turbine enclosure cooling system]. *Vestnik UGATU – USATU Bulletin*, 2010, vol. 14, no. 1, pp. 25–31.

8. Trusov, P. V., Charncev, D. A. Chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya shumoteplozashchitnogo kozhukha gazoturbinnoi ustanovki [Numerical simulation of thermal state of gas turbine acoustic and thermal enclosure]. *Vestnik SamGU – SamSU Bulletin*, 2010, no. 4 (78), pp. 117–126.

9. Charntsev, D. A. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya shumoteplozashchitnykh ko-zhukhov gazoturbinnyykh ustanovok. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Mathematical modelling of gas turbine acoustic and thermal enclosures. Synopsis for PhD thesis in Engineering Science]. Perm, 2012. 16 p.

10. Kostyuk, V. E., Kirilash, E. I., Kravchuk, A. L. Obobshchennaya matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya ukrytii gazoturbinnyykh ustanovok [Generalized mathematical model of thermal condition of gas turbine enclosures]. *Integrirovannyye tekhnologii i energoberezenie – Technologies and Energy Conservation*, 2013, no. 1, pp. 22–26.

11. Smirnov, A. V., Kostyuk, V. E., Tkachenko, D. A., Kirilash, E. I., Slabko, Yu. N. Obespechenie teplovogo rezhima silovogo bloka gazoperekachivayushchego agregata organizovannoi podachei vozdukh pod shumoteploizoliruyushchii kozhukh gazoturbinnogo dvigatelya [Providing thermal condition of turbo-compressor package power unit by air ventilation of acoustic and thermal enclosure]. *Vestnik dvigatelestroeniya – Bulletin of engine-building*, 2013, no. 2, pp. 99 – 107.

12. Merzlyakov, E. V. Analiz faktorov, vliyayushchikh na temperaturny rezhim v kozhukhe gazoperekachivayushchego agregata [Analysis of factors affecting the temperature in enclosure of turbo-compressor package]. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta - Bulletin of Izhevsk State Technical University*, 2013, no 1, pp. 150-151.

13. Karandashov, B. M., Kislitsyn, G. F., Mitin, E. M. *Ustroistvo dlya okhlazhdeniya gazoturbinnoi ustanovki* [Device for cooling a gas turbine facility]. Patent RF, №2161715, 2001.

14. Burdyugov, S. I., Boyarshinov, V. I., Kozhevnikov, V. F., Mel'nichuk, V. G. *Ustroistvo dlya okhlazhdeniya gazoturbinnoi ustanovki* [Device for cooling a gas turbine facility] Patent RF, №2406845, 2010.

15. Zaritskii, V. I., Kustov, Yu. I., Makarevich, Yu. L. *Ustroistvo dlya okhlazhdeniya gazoturbinnoi ustanovki* [Device for cooling a gas turbine facility] Patent RF, №2460893, 2012.

16. Kirilash, E. I. Chislennoe issledovanie potokoraspredeleniya v ukrytii gazoturbinnoi ustanovki,

ventiliruemom odnim i dvumya ventilyatorami [Numerical investigation of flux-distribution in as-turbine enclosure ventilated by one and two fans]. *Integririvannye tekhnologii i energosberezhenie – Technologies and Energy Conservation*, 2013, no. 2, pp. 57-61.

17. Burdyugov, S. I., Sokolovskii, M. I., Zlobin, S. V., Konin, E. V. Opyt NPO «Iskra» v oblasti sozdaniya gazoperekachivayushchikh agregatov [The experience of the SPA "Iskra" in the field of turbocompressor units]. *Trudy XVI Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii po kompres-sorostroeniyu* [Proceedings of the XVI International scientific-technical conference on the compressor engineering], St. Petersburg, 2014, pp. 26-43.

18. GOST 11442-90. Ventilyatory oseye obshchego naznacheniya [State Standard 11442-90. Axial fans general purpose]. Moskva, Publishing Standards, 1990. 19 p.

19. Brusilovskij, I. V. *Ajerodinamika osevyh ventiljatorov* [Aerodynamics of axial fans]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 240 p.

20. Vahvahov, G. G. *Rabota ventiljatorov v seti* [Fan Networking]. Moscow, Strojizdat Publ, 1975. 101 p.

21. Solomahova, T. S. Osobennosti ustanovki i vybora osevyh ventiljatorov [Installation and selection of axial fans]. *Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naja teplofizika – Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*, 2011, no. 6, pp. 38-50.

22. Solomahova, T. S. Ob jeffektivnoj rabote ventilja-torov v sistemah ventiljaciji [On the effective operation of the fans in ventilation systems]. *Ventiljacija, otoplenie, kondicionirovanie vozduha, teplosnabzhenie i stroitel'naja teplofizika – Heating, Ventilation, Air Conditioning, District Heating, Building Physics Journal*, 2007, no. 1, pp. 8-13.

Поступила в редакцию 1.06.2016, рассмотрена на редколлегии 15.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина.

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ УНІФІКОВАНОГО СИЛОВОГО БЛОКУ ТУРБОКОМПРЕСОРНИХ АГРЕГАТІВ З ГТД ДУ80Л1, НК-36СТ І НК-16СТ

А. В. Смірнов, О. М. Щербаків, Д. О. Ткаченко, В. П. Парафійник, Ю. М. Слабко

У статті розглянуті деякі особливості системи вентиляції уніфікованого силового блоку газотурбінних компресорних агрегатів з приводом на базі двигунів ДУ80Л1 (конструкції ДП НВКГ «Зоря» - «Машпроєкт», м. Миколаїв, Україна), НК-36СТ та НК-16СТ (ПАТ «Кузнецов», м. Самара, РФ). Представлено результати чисельного моделювання теплового стану силових блоків з різними варіантами підведення і організації течії вентиляційного повітря всередині шумотеплоізолюючого кожуха. Розглянуто особливості схеми і алгоритму роботи системи вентиляції, а також представлено результати розрахунково-експериментального дослідження впливу статорних елементів вентилятора, а також способу його установки у блоці вентиляції на його аеродинамічні характеристики. Представлені в роботі технічні рішення підвищують надійність роботи агрегата за рахунок забезпечення необхідних температурних умов роботи двигуна і допоміжного обладнання силового блоку (в діапазоні температур зовнішнього повітря від мінус 40 °С до плюс 45 °С), а також дозволяють знизити енергоспоживання системи вентиляції, приблизно, на 18%.

Ключові слова: турбокомпресорний агрегат, газотурбінний привід, блок силовий, тепловий стан, система вентиляції, чисельне дослідження.

SOME FEATURES OF VENTILATION SYSTEM OF THE UNIFIED ACOUSTIC AND THERMAL ENCLOSURE OF TURBO-COMPRESSOR UNITS WITH GAS TURBINES UGT 25000, NK-36ST AND NK-16ST

A. V. Smirnov, O. M. Shcherbakov, D. O. Tkachenko, V. P. Parafiynyk, Yu. M. Slabko

This article describes some of the features of ventilation system of the unified acoustic and thermal enclosure of turbo-compressor units equipped with gas turbines UGT 25000 (designed by the State Enterprise Gas Turbine Research & Production Complex "Zorya" - "Mashproekt", Mykolayiv, Ukraine), NK-36ST and NK-16ST (PJSC "Kuznetsov", Samara, Russia). The results of numerical simulations of thermal state of enclosures with various cooling schemes, as well as the main features and operating algorithm of the developed ventilation system are presented.

In the end of the paper some results of the computational and experimental studies of the effect of the fan elements to the fan performance are reported. Presented features increase the reliability of the turbo-compressor package by providing the required temperature conditions of the gas turbines and auxiliary power unit equipment (in case of outdoor air temperature range from -40°C to $+45^{\circ}\text{C}$), and reduce the energy consumption of the ventilation system, approximately at 18 %.

Key words: turbo-compressor package, gas turbine, gas turbine enclosure, thermal state, ventilation system, numerical simulations.

Смирнов Андрей Витальевич – канд. техн. наук, генеральный конструктор-начальник СКБ, ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина, e-mail: tkm@frunze.com.ua.

Щербаков Олег Николаевич – канд. техн. наук, ведущий инженер-конструктор отдела турбоблоков СКБ, ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина, e-mail: scherbakov_o@frunze.com.ua.

Ткаченко Дмитрий Александрович – начальник отдела турбоблоков СКБ, ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина, e-mail: tkachenko_d@frunze.com.ua.

Парафейник Владимир Петрович – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., вед. науч. сотр. отдела газодинамики, динамики и прочности машин СКБ, ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина, e-mail: sparzha-2008@mail.ru.

Слабко Юрий Николаевич – ведущий инженер-конструктор отдела турбоблоков СКБ, ПАО «Сумское НПО», Сумы, Украина, e-mail: slabko_yu@frunze.com.ua.

Andriy Smirnov – Ph. D., General designer – Head of Special Design Bureau, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine, e-mail: tkm@frunze.com.ua.

Oleg Shcherbakov – Ph. D., Leading design engineer, Department of turbounits, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine, e-mail: scherbakov_o@frunze.com.ua.

Dmytro Tkachenko – Head of the department of turbounits, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine, e-mail: tkachenko_d@frunze.com.ua.

Volodymyr Parafynuk – Doctor of Technical Science, Senior Researcher, Leading researcher, Department of gas dynamics, dynamics and strength of machines, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine, e-mail: sparzha-2008@mail.ru.

Yurii Slabko – Leading design engineer, Department of turbounits, PJSC «Sumy NPO», Sumy, Ukraine, e-mail: slabko_yu@frunze.com.ua.