

УДК 62-758.34/36:621.438:621.1.016.4.001.57:519.6

Канд. техн. наук В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ КОРПУСА КОНВЕРТИРОВАННОГО ГТД НА ТЕПЛОВОЕ СОСТОЯНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА

Методами вычислительной аэрогидродинамики исследовано тепловое состояние оборудования силового блока турбокомпрессорного агрегата при наличии и отсутствии внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного газотурбинного двигателя. Покрытие корпуса двигателя теплоизоляционными матами из базальтового волокна приведет к значительному снижению температур его наружной поверхности и малоразмерного оборудования силового блока при небольшом уменьшении коэффициента полезного действия турбины и мощности двигателя из-за дополнительного теплового расширения корпуса.

Ключевые слова: турбокомпрессорный агрегат, силовой блок, газотурбинный двигатель, пожаровзрывобезопасность, тепловое состояние, тепловая изоляция, моделирование.

Введение

На блочно-комплектных компрессорных станциях газовой и нефтяной промышленности применяются турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с конвертированными авиационными или судовыми газотурбинными двигателями (ГТД) в качестве привода, находящимися в укрытии силового блока (БС). Такие ГТД во время работы сильно нагреваются. Одной из причин пожара (взрыва) на ТКА может быть воспламенение топливного газа или смазочного масла при контакте с горячими поверхностями корпуса ГТД, температура которых превышает температуру самовоспламенения воспламеняющегося вещества. Тепловое излучение высокотемпературных поверхностей корпусе ГТД может приводить к локальному перегреву и выходу из строя навесного и отдельно стоящего оборудования, контрольно-измерительных приборов и коммуникаций БС. Поэтому обеспечение пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния (ТС) оборудования БС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение. Взрывопредупреждение и работоспособность оборудования обычно обеспечиваются механической вентиляцией БС. В паровых турбинах и газовых турбинах промышленного типа распространена внешняя тепловая изоляция их толстостенных корпусов, которая позволяет снизить термические напряжения и предупредить коробление обеспечением равномерности их прогрева, увеличить КПД турбины, уменьшив потери тепла в окружающую среду, обеспечить противопожарные мероприятия и защитить персонал от воздействия высоких температур и шума оборудования [1, 2].

Традиционно изоляция корпусов турбин выполняется напылением теплоизоляционной смеси, например [3]. Однако после выхода из строя такой изоляции требуется ее разрушение и полное восстановление, поэтому она применяется в паровых турбинах с большими периодами эксплуатации. Современные теплоизоляционные изделия из базальтовых и муллитокремнеземистых волокон, например [2–5], характеризуются низкой теплопроводностью, высокой температуростойкостью, малой объемной массой и большим ресурсом. Однако об использовании внешней тепловой изоляции для конвертированных ГТД с тонкостенными корпусами для уменьшения их роли как источников воспламенения и тепловыделений авторам неизвестно. Исследование данного вопроса путем проведения натуральных испытаний связано с большими материальными затратами и рисками. Физическое моделирование затруднительно в связи со сложностью объекта и невозможностью обеспечить условия подобия. Простейшие математические модели (ММ) теплового баланса не дают информации о локальных скоростях и температурах воздуха в укрытии, так как они оперируют лишь средними величинами [6]. С развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) появилась возможность подробного моделирования физических процессов в формулировке краевых задач. Так, авторами работ [7–13] выполнены численные исследования отдельных физических явлений в трехмерной постановке с целью оценки эффективности системы вентиляции БС [7–9], модификаций конструкции БС [10–12] и разработки критерия

взрывобезопасности [13]. Однако работы по исследованию ТС БС при наличии тепловой изоляции его узлов авторам неизвестны.

Цель настоящей работы — оценить влияние внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД на ТС оборудования БС ТКА методами CFD.

Математическая модель

В рамках обобщенной ММ ТС БС [14] была сформулирована и численно решена методами контрольного объема и дискретных ординат задача о вязком квазистационарном трехмерном турбулентном течении двух сред — воздуха и выхлопных газов, — в проточных частях укрытия и газоотводного устройства соответственно, отделенных друг от друга и окружающей среды непроницаемыми стенками, с учетом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки с использованием тепловой модели корпуса ГТД [15]. Для замыкания системы уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье-Стокса и энергии использована модель турбулентности Лаундера-Сполдинга, учитывающая силы плавучести [16]. Исследовано два варианта корпусов ГТД: существующий металлический (задача 1) и предложенный двухслойный — покрытый, начиная с силового корпуса компрессора высокого давления (КВД), матами из супертонкого базальтового волокна (задача 2) (рис. 1).

Оценка толщины слоев тепловой изоляции корпуса ГТД

Исходя из соображений пожаровзрывобезопасности ТКА и приемлемого ТС оборудования БС, принципиально возможно определить необходимую толщину слоев внешней тепловой изоляции корпуса ГТД при отсутствии его обдува

вентиляционным воздухом. Однако постановка такой задачи относительно максимально допустимых температур всего оборудования ТС представляется слишком громоздкой. Поэтому толщина матов вычислялась только по условиям пожаровзрывобезопасности ТКА в ожидании, что покрытие теплоизоляционными матами наиболее горячих участков корпуса двигателя также обеспечит приемлемые температуры остального оборудования БС. Наибольшая температура поверхности оборудования, безопасная в отношении воспламенения промышленного метана, составляет $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ [17]. Тяжелые жидкие нефтепродукты, в том числе минеральные масла, самовоспламеняются при температурах выше $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]. Чтобы исключить наличие в горючей среде источников воспламенения рекомендуется поддерживать температуры поверхностей машин не более 80 % от минимальной температуры самовоспламенения горючего вещества [19]. В таком случае наибольшая температура поверхности корпуса ГТД, безопасная в отношении воспламенения паров смазочного масла, должна составлять $240\text{ }^{\circ}\text{C}$. По вычисленной толщине тепловой изоляции участков корпуса ГТД, которая обеспечивает температуру его наружной поверхности менее $240\text{ }^{\circ}\text{C}$, были выбраны теплоизоляционные маты среди изделий производства «Черновицкого завода теплоизоляционных материалов «ROTIS» [20] толщиной 5, 20, 30 и 40 мм (см. рис. 1).

Результаты численного исследования

Результаты расчетов ТС БС при наличии тепловой изоляции корпуса ГТД и при ее отсутствии показаны на рис. 2, 3 и приведены в табл. 1.

Результаты расчетов показали, что наличие тепловой изоляции корпуса ГТД практически не влияет на структуру и течение воздуха в БС, однако температура воздуха внутри БС снижается

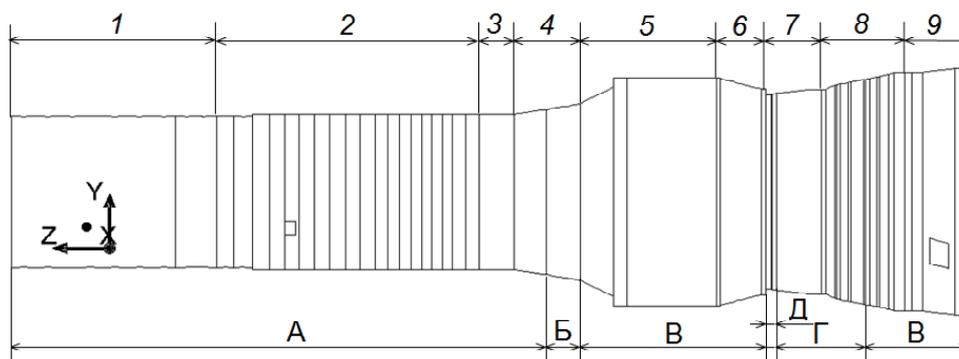


Рис. 1. Характерные участки корпуса конвертированного ГТД: 1 — проставка; 2 — корпус компрессора низкого давления (КНД); 3 — переходник; 4 — силовой корпус КВД; 5 — кожух камеры сгорания (КС); 6 — силовой корпус турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД); 7 — опорный венец (ОВ) ТНД; 8 — корпус силовой турбины (СТ); 9 — ОВ СТ; А — металлический корпус ГТД без изоляции; Б — мат прошивной огнезащитный МБПОР-5 толщиной 5 мм; В — мат теплоизоляционный и звукопоглощающий АТМ-10К в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 20 мм; Г — мат прошивной МТПБа-КТ-6 в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 30 мм; Д — мат прошивной МТПБа-КТ-6 в обкладке из кремнеземной ткани толщиной 40 мм

(см. рис. 2). Температуры внутренних стенок БС при наличии изоляции корпуса ГТД также значительно уменьшаются. При этом наибольшие температуры наблюдаются в районе газотводного устройства.

Из рис. 3 видно, что при наличии изоляции температура наружной поверхности двухслойного корпуса ГТД существенно уменьшается. Ее максимальная температура на участке между корпусами КНД и КВД, на котором имеется дополнительный тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, составляет 190 °С, что удовлетворяет условиям пожаровзрывобезопасности. При этом температура расположенного под матами металлического корпуса ГТД увеличивается. Максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса ГТД без

изоляции составляет около 570 °С на участке корпуса над рабочим колесом первой ступени СТ; при наличии изоляции на этом же участке температура наружной поверхности металлического корпуса возрастает до 610 °С, а максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса достигает 630 °С на участках корпуса ОВ ТНД и соплового аппарата первой ступени СТ. Температуры внутренней поверхности корпуса ГТД близки к температурам наружной из-за его малой толщины и высокой теплопроводности.

Для оценки ТС малоразмерного оборудования БС, не включенного в состав расчетной области, использовались температуры ближайших к нему поверхностей стенок БС.

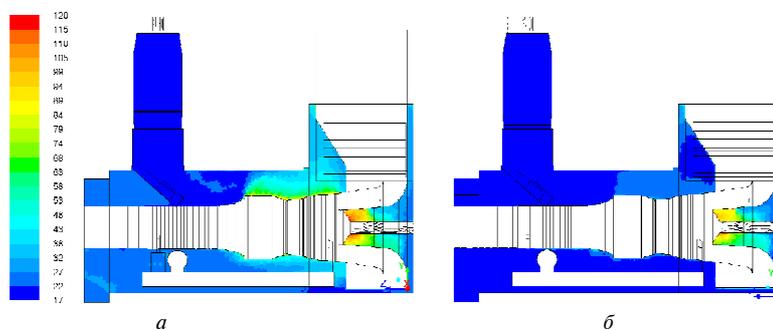


Рис. 2. Температура воздуха (°С) в сечении $x = \text{const}$, проходящем через ось ГТД

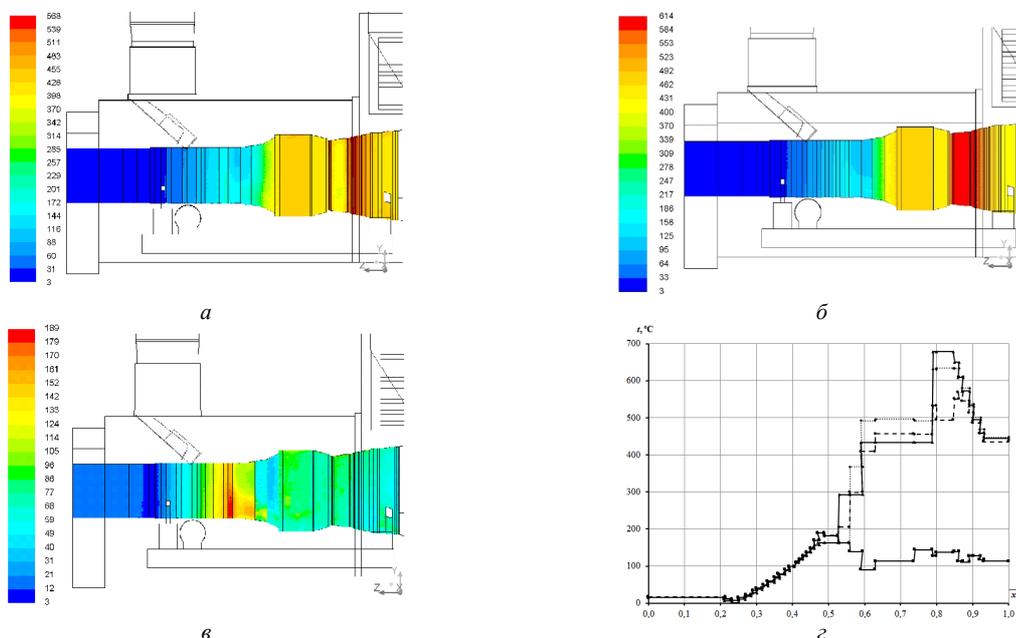


Рис. 3. Температуры (°С) наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции (задача 1) (а) и при её наличии (задача 2) (б), наружной поверхности изоляции (задача 2) (в) и максимальные температуры (°С) по участкам корпуса ГТД (г): —●— — рабочего тела в проточной части ГТД; —●— — наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции (задача 1); —●— — наружной поверхности металлического корпуса ГТД, покрытого изоляцией (задача 2); —■— — наружной поверхности изоляции (задача 2)

Таблица 1 – Температуры (°С) малоразмерного оборудования БС

Прибор	Задача 1	Задача 2	Максимальная допустимая температура, °С
Дозатор газа	44	20	80
Стоп-кран	36	21	60
Газоанализатор углеводородных газов	49	20	50
Термопреобразователь сопротивления	36	21	60
Тепловой пожарный извещатель 1	64	21	182
Тепловой пожарный извещатель 2	56	21	182
Тепловой пожарный извещатель 3	54	24	182
Тепловой пожарный извещатель 4	59	24	182
Выключатель концевой 1	71	21	55
Выключатель концевой 2	41	22	55
Выключатель концевой 3	35	20	55
Светильник 1	46	23	90
Светильник 2	42	21	90
Светильник 3	68	23	90

Из табл. 1 видно, что применение тепловой изоляции корпуса ГТД приводит к уменьшению температур оборудования БС на 1550 °С. Это обусловлено уменьшением температуры воздуха в БС и теплового излучения теплоизолированных поверхностей корпуса ГТД. В наибольшей степени снижаются температуры оборудования, расположенного в районе турбины ГТД, в частности, температура светильника 3 уменьшается на 45 °С, а выключателя концевой 1 – на 50 °С.

Увеличение температуры расположенного под матами металлического корпуса ГТД вызывает его дополнительное тепловое расширение, вследствие чего увеличиваются радиальные зазоры между рабочими лопатками ротора и внутренней поверхностью корпуса. Согласно выполненным авторами оценкам при увеличении температуры металлического корпуса над рабочим колесом первой ступени неохлаждаемой СТ с 570 °С до 610 °С радиальные зазоры между ротором и статором СТ увеличиваются приблизительно на 0,3 %. Это приводит к уменьшению ее КПД на 0,8 % и мощности ГТД на 2,1 %.

Заключение

С помощью варианта обобщенной ММ ТС БС, адаптированной к условиям частных задач, выполнено численное исследование ТС оборудования БС при наличии внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД и при ее отсутствии. Толщины теплоизоляционных матов, размещаемых на корпусе ГТД, определялись, исходя из наибольшей температуры поверхности корпуса ГТД, безопасной в отношении воспламенения паров смазочного масла. Результаты расчетов показали, что наличие тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД значительно снижает температуры его наружной поверхности и малоразмерного оборудования БС. Это уменьшает роль ГТД как источника воспламенения и тепловыделения, что обеспечивает потенциальную

возможность снижения мощности вентиляторов, подающих воздух внутрь БС. Однако покрытие корпуса ГТД тепловой изоляцией имеет и негативные последствия. Во-первых, это приведет к небольшому снижению КПД турбины и мощности ГТД из-за дополнительного теплового расширения корпуса. Во-вторых, для обеспечения возможности покрытия корпуса ГТД теплоизоляционными матами понадобится модификация трубопроводной и кабельной обвязки. Поэтому вопрос о целесообразности применения внешней тепловой изоляции корпусов конвертированных ГТД, работающих в укрытии БС ТКА, требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Список литературы

1. Лебедев-Цветков Ю. Д. Оборудование и рабочие процессы газотурбинных компрессорных станций / Ю. Д. Лебедев-Цветков. – Л. : Недра, 1966. – 157 с.
2. Воронков С. Т. Основные направления совершенствования теплозащиты оборудования ТЭС / С. Т. Воронков // Промышленная энергетика. – 2003. – № 5. – С. 19 – 23.
3. Промышленная изоляция ARNOLD [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.arnoldgroup.com/3/isolierungen/isolierungen.htm>. – 25.05.2015 г.
4. Теплоизоляционные оболочки iSHELL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gkflagman.com/catalog/napravlenie/?ID=1765.htm>. – 25.05.2015 г.
5. Рудюк В. Теплоакустическая изоляция для объектов нефтегазового комплекса / В. Рудюк // Нефтегазовая вертикаль. – № 13–14. – 2014. – С. 14–15.
6. Шляпин Я. К. Математическое моделирование тепловых режимов отсеков ГПА / Я. К. Шляпин // Газовая промышленность. – 2008. – № 2. – С. 16–19.

7. Клочков А. В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования / А. В. Клочков, Е. С. Корнилова, А. А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20–22.
8. Results and Experience from GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Электронный ресурс] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68053. – 9 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
9. Трусов П. В. Численные исследования процесса вентиляции и теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок с использованием параллельных вычислений / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев // Вычислительная механика сплошных сред. – 2012. – Т. 5, № 2. – С. 208–216.
10. 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. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68574. – 7 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
11. Vahidi D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Электронный ресурс] / D. Vahidi, H. Bagheri, V. Glezer. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2006. Barcelona, Spain. May 8–11, 2006. GT2006-90960. – 10 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Barbato L. Combined 1D and 3D CFD Approach for GT Ventilation System Analysis [Электронный ресурс] / L. Barbato, M. Blarasin, S. Rosin // Newsletter. – 2008. – № 1. – P. 15–18. – Режим доступа: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. – 25.05.2015 р.
13. Santon R. C. A New Gas Turbine Enclosure Ventilation Design Criterion [Электронный ресурс] / R. C. Santon, M. J. Ivings, D. K. Pritchard. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68725. – 8 p. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Костюк В. Е. Обобщенная математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок / В. Е. Костюк, Е. И. Кириллаш, А. Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22 – 26.
15. Костюк В. Е. Тепловая модель корпуса газотурбинного двигателя / В. Е. Костюк, Е. И. Кириллаш // Интегровані технології та енергозбереження. – 2015. – № 2.
16. Launder B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B. E. Launder, D. B. Spalding. – London : Academic Press, 1972. – 169 p.
17. Бурдюгов С. И. Безаварийная эксплуатация «горячих» газотурбинных двигателей в составе ангарных ГПА / С. И. Бурдюгов, Г. Н. Захаров, В. Л. Попов // Газовая промышленность. – 2008. – № 4. – С. 57–59.
18. Эрих В. Н. Химия и технология нефти и газа / В. Н. Эрих, М. Г. Расина, М. Г. Рудин. – Л., Химия, 1977. – 424 с.
19. Производственная безопасность. Часть 1. Опасные производственные факторы : учеб. пособие / под ред. С. В. Ефремова ; Политехн. ун-т. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 223 с.
20. Теплоизоляционные изделия [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://rotys.com/mati.htm>. – 25.05.2015 р.

Поступила в редакцию 10.03.2015

Костюк В.Е., Кириллаш О.І. Дослідження впливу теплової ізоляції корпусу конвертованого ГТД на тепловий стан обладнання турбокомпресорного агрегата

Методами розрахункової аерогідродинаміки досліджено тепловий стан обладнання силового блока за наявності та відсутності зовнішньої теплової ізоляції корпусу конвертованого газотурбінного двигуна. Покриття корпусу двигуна теплоізоляційними матами з базальтового волокна призведе до значного зниження температур його зовнішньої поверхні і малорозмірного обладнання силового блока при невеликому зменшенні коефіцієнта корисної дії турбіни та потужності двигуна внаслідок додаткового теплового розширення корпусу.

Ключові слова: турбокомпресорний агрегат, силовий блок, газотурбінний двигун, пожежовибухобезпека, тепловий стан, тепла ізоляція, моделювання.

Kostyuk V. Ye., Kirilash Ye. I. Investigation of the influence of the converted gas-turbine engine case heat insulation on the turbocompressor unit equipment heat state

Research of the turbocompressor unit power block equipment heat state in the presence and absence of external heat insulation of the converted gas-turbine engine case was performed by computational fluid dynamics methods. Engine case covering by heat-insulating mats of basalt fibre will result in essential decrease of the temperatures of its external surface and low-sized power block equipment under low reduction of turbine efficiency and gas-turbine engine power due to additional heat expansion of the case.

Key words: turbocompressor unit, power block, gas-turbine engine, fire- and explosion safety, heat state, heat insulation, simulation.