

Кириладш Е. И.,
Костюк В. Е.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА ТЕПЛОИЗОЛЯЦИЕЙ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Численно исследовано тепловое состояние оборудования силового блока при наличии и отсутствии внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного газотурбинного двигателя. Покрытие корпуса двигателя изоляцией 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, газотурбинный двигатель, пожаровзрывобезопасность, тепловое состояние, тепловая изоляция, моделирование.

1. Введение

На блочно-комплектных компрессорных станциях газовой и нефтяной промышленности применяются турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с конвертированными газотурбинными двигателями (ГТД), 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. Тепловое излучения высокотемпературных поверхностей корпуса ГТД может приводить к локальному перегреву и выходу из строя оборудования БС. Поэтому обеспечение пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния (ТС) оборудования БС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Взрывопредупреждение и работоспособность оборудования обычно обеспечиваются вентиляцией БС. В паровых турбинах и газовых турбинах промышленного типа распространена внешняя тепловая изоляция их толстостенных корпусов, которая позволяет уменьшить потери тепла в окружающую среду и увеличить КПД турбины, защитить персонал от воздействия высоких температур и шума оборудования, обеспечить равномерность прогрева узлов двигателя, предупреждая их коробление и снижая температурные напряжения, и обеспечить противопожарные мероприятия [1]. Традиционно изоляция корпусов турбин выполняется напылением теплоизоляционной смеси, например, [2]. 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, на-

пример, [1–4], 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 этого вопроса путем проведения натурных 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 [5]. С развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) появилась возможность подробного моделирования физических процессов в формулировке краевых задач. Так, авторами работ [6–11] выполнены численные исследования отдельных физических явлений в трехмерной постановке с целью оценки эффективности системы вентиляции БС [6, 7], модификаций конструкции БС [8–10] и разработки критерия взрывобезопасности [11]. Однако работы по исследованию ТС БС при наличии тепловой изоляции его узлов авторам неизвестны.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования – аэродинамические и тепловые процессы в БС ТКА.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- сформулировать ММ ТС БС, которая учитывает совокупность значимых аэродинамических и тепловых явлений;

- определить толщины слоев тепловой изоляции корпуса ГТД, необходимые по условиям пожаро-взрывобезопасности и поддержания приемлемого ТС оборудования БС;
- численно исследовать ТС оборудования БС при наличии и при отсутствии тепловой изоляции корпуса ГТД.

самовоспламенения паров минеральных масел 300 °С [15] по рекомендации [16]. Ожидается, что покрытие матами наиболее горячих участков корпуса двигателя также обеспечит приемлемые температуры остального оборудования БС. Толщины матов, выбранных среди изделий производства «Черновицкого завода теплоизоляционных материалов «ROTIS» [17], составили 5...40 мм (рис. 1).

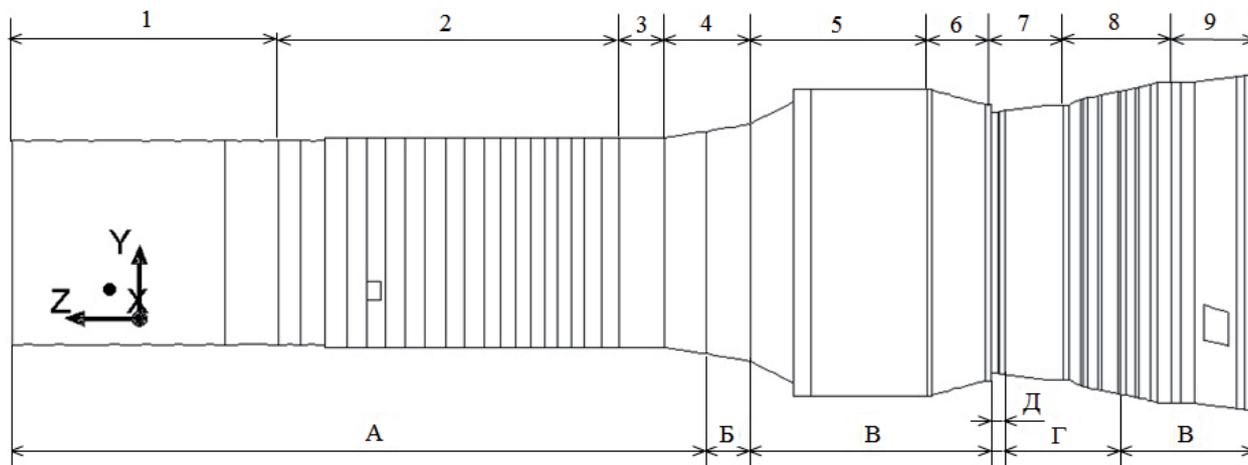


Рис. 1. Характерные участки корпуса ГТД: 1 — проставка; 2 — корпус компрессора низкого давления (КНД); 3 — переходник; 4 — силовой корпус КВД; 5 — кожух камеры сгорания (КС); 6 — силовой корпус турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД); 7 — опорный венец (ОВ) ТНД; 8 — корпус силовой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

4. Материалы и методы исследований

В рамках обобщенной ММ ТС БС [12] 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 [13]. Для замыкания системы уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье-Стокса и энергии использована модель турбулентности Лаундера-Сполдинга, учитывающая силы плавленности [14]. 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).

Толщина матов вычислялась по условиям пожаровзрывобезопасности ТКА, исходя из максимально допустимой температуры поверхности корпуса ГТД 240 °С, составляющей 80 % от минимальной температуры

5. Результаты исследований теплового состояния силового блока при наличии и при отсутствии тепловой изоляции корпуса двигателя

Результаты расчетов ТС БС при наличии тепловой изоляции корпуса ГТД и при ее отсутствии показаны на рис. 2 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.

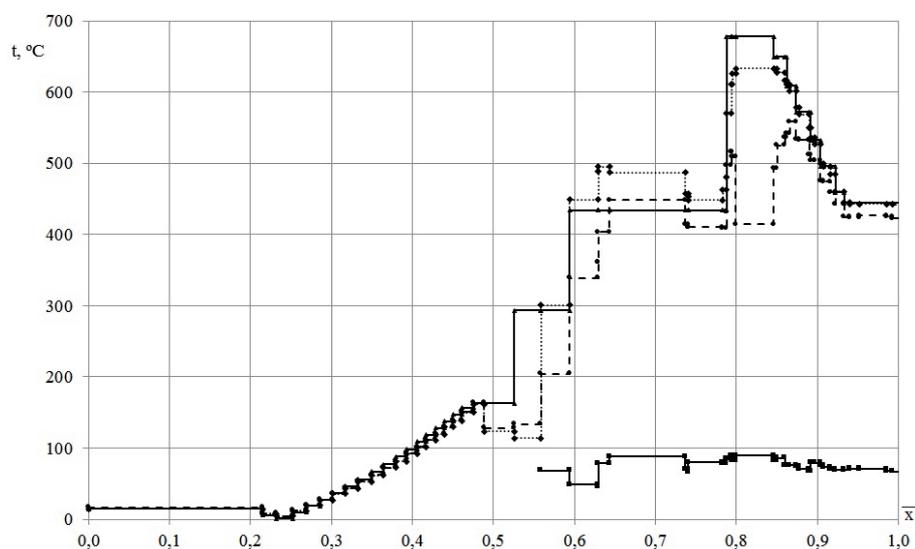


Рис. 2. Температуры t (°C) по относительной длине участков корпуса ГТД \bar{x} : —▲— рабочего тела в проточной части ГТД; —●— наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции (задача 1); —◆— наружной поверхности металлического корпуса ГТД, покрытого изоляцией (задача 2); —■— наружной поверхности изоляции (задача 2)

Таблица 1

Температуры (°С) малоразмерного оборудования БС

Прибор	Зада- ча 1	Зада- ча 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 рис. 2 видно, что при наличии изоляции температура наружной поверхности двухслойного корпуса ГТД существенно уменьшается, а температура расположенного под матами металлического корпуса ГТД увеличивается. Для оценки ТС малоразмерного оборудования БС, не включенного в состав расчетной области, использовались температуры ближайших к нему поверхностей стенок БС. Из табл. 1 видно, что применение тепловой изоляции корпуса ГТД приводит к уменьшению температур оборудования БС на 15...50 °С.

6. Обсуждение результатов исследований влияния тепловой изоляции корпуса двигателя на тепловое состояние оборудования силового блока

При наличии изоляции максимальная температура наружной поверхности двухслойного корпуса ГТД наблюдается на участке между корпусами КНД и КВД, на котором имеется дополнительный тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, и составляет 190 °С, что удовлетворяет условиям пожаро-взрывобезопасности. 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. Увеличение температуры расположенного под матами металлического корпуса ГТД вызывает его дополнительное тепловое расширение с увеличением относительных радиальных зазоров между ротором и статором СТ приблизительно на 0,3 %, что приводит к уменьшению ее КПД на 0,8 % и мощности ГТД на 2,1 %.

Применение тепловой изоляции корпуса ГТД благоприятно сказывается на ТС малоразмерного оборудования БС вследствие уменьшения температуры воздуха в БС и теплового излучения высокотемпературных по-

верхностей корпуса. В наибольшей степени снижаются температуры приборов, расположенных в районе турбины ГТД, в частности, температура светильника 3 уменьшается на 45 °С, а выключателя концевой 1 — на 50 °С.

7. Выводы

В результате проведенных исследований:

1. Разработан вариант обобщенной ММ ТС БС, адаптированный к условиям частной задачи.
2. Определены толщины теплоизоляционных матов, размещаемых на корпусе ГТД, исходя из наибольшей температуры поверхности корпуса ГТД, безопасной в отношении воспламенения паров смазочного масла.
3. Показано, 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. Это приведет к небольшому снижению КПД турбины и мощности ГТД из-за дополнительного теплового расширения корпуса. Для обеспечения возможности покрытия корпуса ГТД теплоизоляционными матами понадобится модификация трубопроводной и кабельной обвязки. Таким образом, вопрос о целесообразности применения внешней тепловой изоляции корпусов конвертированных ГТД, работающих в укрытии БС ТКА, требует дополнительного технико-экономического обоснования.

Литература

1. Воронков, С. Т. Основные направления совершенствования теплозащиты оборудования ТЭС [Текст] / С. Т. Воронков // Промышленная энергетика. — 2003. — № 5. — С. 19–23.
2. Промышленная изоляция ARNOLD [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: <http://www.arnoldgroup.com/3/isolierungen/isolierungen/>. — 15.05.2015.
3. Теплоизоляционные оболочки iSHELL [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: <http://gkflagman.com/catalog/napravlenie/?ID=1765.htm>. — 15.05.2015.
4. Рудюк, В. Теплоакустическая изоляция для объектов нефтегазового комплекса [Текст] / В. Рудюк // Нефтегазовая вертикаль. — № 13–14. — 2014. — С. 14–15.
5. Шляпин, Я. К. Математическое моделирование тепловых режимов отсеков ГПА [Текст] / Я. К. Шляпин // Газовая промышленность. — 2008. — № 2. — С. 16–19.
6. D'Ercole, M. Results and Experience From GE Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Text] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi // Volume 4: Turbo Expo 2005. — ASME, 2005. — Paper No. GT2005-68053. — P. 275–283. doi:10.1115/gt2005-68053
7. Трусов, П. В. Численные исследования процесса вентиляции и теплового состояния шумотеплозащитных кожухов газотурбинных установок с использованием параллельных вычислений [Текст] / П. В. Трусов, Д. А. Чарнцев // Вычислительная механика сплошных сред. — 2012. — Т. 5, № 2. — С. 208–216.
8. Graf, E. Design Improvements Suggested by Computational Flow and Thermal Analyses for the Cooling of Marine Gas Turbine Enclosures [Text] / E. Graf, T. Luce, F. Willett // Volume 5: Turbo Expo 2005. — ASME, 2005. — Paper No. GT2005-68574. — P. 587–593. doi:10.1115/gt2005-68574
9. Vahidi, D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Gas Turbine Package Enclosure [Text] / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer // Volume 5: Marine; Microturbines and Small Turbomachinery; Oil and Gas Applications; Structures and Dynamics, Parts A and B. — ASME, 2006. — Paper No. GT2006-90960. — P. 607–616. doi:10.1115/gt2006-90960

10. Barbato, L. Combined 1D and 3D CFD Approach for GT Ventilation System Analysis [Electronic resource] / L. Barbato, M. Blarasin, S. Rosin // Newsletter. — 2008. — № 1. — P. 15–18. — Available at: \www/URL: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. — 15.05.2015.
11. Santon, R. C. A New Gas Turbine Enclosure Ventilation Design Criterion [Text] / R. C. Santon, M. J. Ivings, D. K. Pritchard // Volume 5: Turbo Expo 2005. — ASME, 2005. — Paper No. GT2005-68725. — P. 445–452. doi:10.1115/gt2005-68725
12. Костюк, В. Е. Обобщенная математическая модель теплового состояния укрытый газотурбинных установок [Текст] / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, А. Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. — 2013. — № 1. — С. 22–26.
13. Костюк, В. Е. Тепловая модель корпуса газотурбинного двигателя [Текст] / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш // Интегрированные технологии та енергозбереження. — 2015. — № 2.
14. Launder, B. E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B. E. Launder, D. B. Spalding. — London: Academic Press, 1972. — 169 p.
15. Эрих, В. Н. Химия и технология нефти и газа [Текст] / В. Н. Эрих, М. Г. Расина, М. Г. Рудин. — Л.: Химия, 1977. — 424 с.
16. Ефремов, С. В. Производственная безопасность. Часть 1. Опасные производственные факторы [Текст]: учеб. пособие / под ред. С. В. Ефремова; Политехн. ун-т. — СПб.: Политехн. ун-т, 2012. — 223 с.
17. Теплоизоляционные изделия ROTYS [Электронный ресурс]. — Режим доступа: \www/URL: <http://rotys.com/produkciya>. — 15.05.2015.

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕПЛОГО РЕЖИМУ ОБЛАДНАННЯ ТУРБОКОМПРЕСОРНОГО АГРЕГАТУ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Чисельно досліджено тепловий стан обладнання силового блока за наявності та відсутності зовнішньої теплової ізоляції

корпусу конвертованого газотурбінного двигуна. Покриття корпусу двигуна ізоляцією 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, газотурбінний двигун, пожежовибухобезпека, тепловий стан, тепла ізоляція, моделювання.

Кирилаш Елена Ивановна, младший научный сотрудник, кафедра конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: kirilash-elena@rambler.ru.

Костюк Владимир Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, кафедра конструкции авиационных двигателей, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

Кирилаш Елена Іванівна, молодший науковий співробітник, кафедра конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Костюк Володимир Євгенович, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Україна.

Kyrylash Olena, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: kirilash-elena@rambler.ru.

Kostyuk Vladimir, National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute», Ukraine, e-mail: aedlab@ic.kharkov.ua.

УДК: 621.313.37.004.17

DOI: 10.15587/2312-8372.2015.44328

**Овчаров С. В.,
Стребков А. А.**

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИЛОВОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

В данной статье на базе исследования потерь активной мощности в асинхронном электродвигателе с короткозамкнутым ротором в функции загрузки на валу и температуры окружающей среды и теплового износа его изоляции разработана методика единой оценки процессов потерь электрической энергии и расхода ресурса изоляционной конструкции в электродвигателе в единицах энергии.

Ключевые слова: электродвигатель, потери, удельные, загрузка, температура, оптимум, энергосбережение, скольжение, диаграмма, ресурс.

1. Введение

В Украине существует народно-хозяйственная проблема ресурсоэнергосбережения в силовом электрооборудовании (силовых трансформаторах, электродвигателях, силовых кабелях), используемом в агропромышленном комплексе. Суть проблемы состоит в том, что Украина только до 40 % обеспечена собственными энергетически-

ми ресурсами, а эксплуатационная надежность силового электрооборудования, работающего в агропромышленном комплексе, остается низкой [1].

Поэтому необходимы научно-технические решения, как в сфере энергосбережения, так и повышения эксплуатационной надежности силового электрооборудования.

Разрабатываемые технические решения должны быть технически и экономически обоснованы. Одним из