

В. Е. Костюк, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.

Е. И. Кирилаш

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского  
«Харьковский авиационный институт»

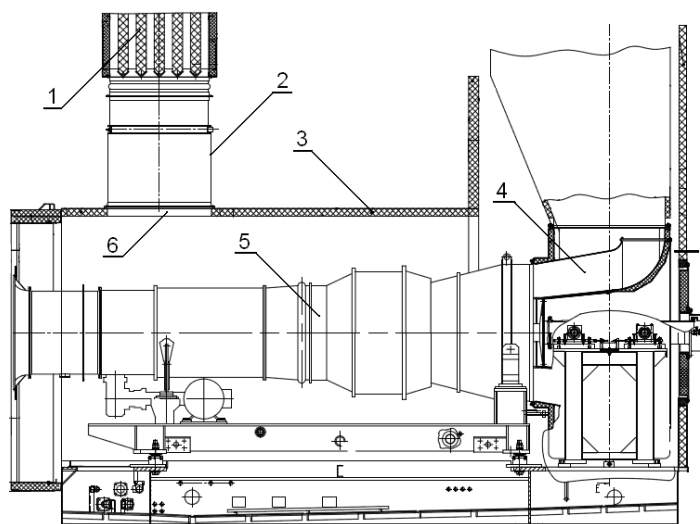
## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СИЛОВОГО БЛОКА ТУРБОКОМПРЕССОРНОГО АГРЕГАТА ПРИ НАЛИЧИИ ТЕПЛОВОЙ ИЗОЛЯЦИИ ГОРЯЧИХ УЗЛОВ

Рассмотрены некоторые проблемы обеспечения пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния оборудования силовых блоков турбокомпрессорных агрегатов. Методами вычислительной аэрогидродинамики исследовано тепловое состояние оборудования силового блока при наличии и при отсутствии внешней тепловой изоляции корпуса конвертированного газотурбинного двигателя. Толщины теплоизоляционных матов, размещаемых на различных участках корпуса двигателя, рассчитывались, исходя из температуры их поверхности, максимально допустимой по условиям пожаровзрывобезопасности. Результаты показали, что покрытие корпуса двигателя тепловой 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. Целесообразность применения внешней тепловой изоляции корпусов конвертированных двигателей, работающих в укрытии силовых блоков турбокомпрессорных агрегатов, требует дополнительного технико-экономического обоснования.

**Ключевые слова:** турбокомпрессорный агрегат, силовой блок, газотурбинный двигатель, пожаровзрывобезопасность, тепловое состояние, тепловая изоляция, численное исследование

### 1. Введение

На современных блочно-комплектных компрессорных станциях газовой и нефтяной промышленности применяются турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с конвертированными авиационными или судовыми газотурбинными двигателями (ГТД), входящим в состав силового блока (БС). БС объединяет заключенные в укрытии, часто выполненном в виде шумотеплоизолирующего кожуха, ГТД и газоотводное устройство с системами обеспечения работы ГТД, системой вентиляции укрытия и охлаждения находящегося в нём оборудования и другими вспомогательными системами (рис. 1).



1 – щиты шумоглушения; 2 – воздуховод; 3 – укрытие; 4 – газоотводное устройство; 5 – ГТД;  
6 – проём в крыше укрытия

Рис. 1. Конструкция БС

Конвертированные ГТД во время работы сильно нагреваются. Одной из возможных причин пожара (взрыва) на ТКА является воспламенение смеси топливного газа или паров смазочного масла с воздухом, образовавшейся в укрытии ГТД вследствие нарушения целостности газовых или масляных трактов и (или) разрушения элементов конструкций ГТД, при контакте с горячими поверхностями корпуса ГТД, температура которых превышает температуру воспламенения данной смеси. Еще одной проблемой является локальный перегрев и выход из строя размещённых в укрытии навесного и отдельно стоящего оборудования, приборов и коммуникаций вследствие теплового излучения высокотемпературных участков корпуса ГТД. Поэтому обеспечение пожаровзрывобезопасности и приемлемого теплового состояния (ТС) оборудования БС является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение. Функционирование оборудования БС обычно обеспечивается механической вентиляцией укрытия. В паровых турбинах и газовых турбинах промышленного типа широко распространена внешняя тепловая изоляция их толстостенных корпусов. Теплоизлучающие поверхности покрывают изоляцией, чтобы уменьшить потери тепла в окружающую среду и тем самым увеличить КПД турбины, защитить персонал от воздействия высоких температур и шума при работе оборудования, обеспечить равномерность прогрева узлов двигателя, что предупреждает их коробление и снижает температурные напряжения, а также обеспечить необходимые противопожарные мероприятия [1, 2]. Традиционно тепловая изоляция корпусов турбин выполняется напылением теплоизоляционной смеси, например, [3]. Однако после каждого выхода из строя такой изоляции требуется её 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 объёмной массой, стойкостью к вибрациям 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 путём 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 охлаждающего 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 трёхмерной постановке с целью оценки эффективности системы вентиляции укрытия 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 и задачи исследования**

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

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

- сформулирована ММ ТС БС, которая учитывает совокупность значимых аэродинамических и тепловых явлений;
- определены толщины слоёв тепловой изоляции корпуса ГТД, необходимые по условиям пожаровзрывобезопасности и поддержания приемлемого ТС оборудования БС;
- численно исследовано ТС оборудования БС при наличии и при отсутствии тепловой изоляции корпуса ГТД.

#### **Математическая модель**

В рамках обобщённой ММ ТС БС [14] была сформулирована и численно решена задача о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух сред – воздуха и выхлопных газов, – в проточных частях укрытия и газоотводного устройства соответственно, отделённых друг от друга и окружающей среды непроницаемыми стенками, с учётом 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).

Исходя из соображений пожаровзрывобезопасности ТКА и приемлемого ТС оборудования БС, принципиально возможно определить необходимую толщину слоёв 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 °С [17]. Тяжёлые жидкие нефтепродукты, в том числе минеральные масла, самовоспламеняются при температурах выше 300 °С [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 °С. По вычисленной толщине тепловой изоляции участков корпуса ГТД, которая обеспечивает температуру его наружной поверхности менее 240 °С, были выбраны теплоизоляционные маты среди изделий производства «Черновицкого завода теплоизоляционных материалов «ROTIS» [20] толщиной 5, 20, 30 и 40 мм (рис. 2).

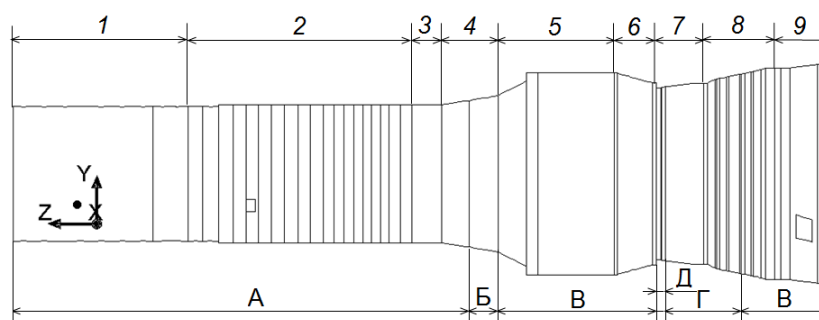


Рис. 2. Характерные участки корпуса ГТД:

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 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

Численное решение каждой задачи отыскивалось в трёхмерной области пространства, охватывавшей проточные части укрытия и газоотводного устройства без включения в неё малоразмерных деталей – навесного и отдельно стоящего оборудования, контрольно-измерительных приборов, коммуникаций и т.п. Расчётная область покрывалась полиэдрической расчётной сеткой, включавшей около 3 млн. ячеек.

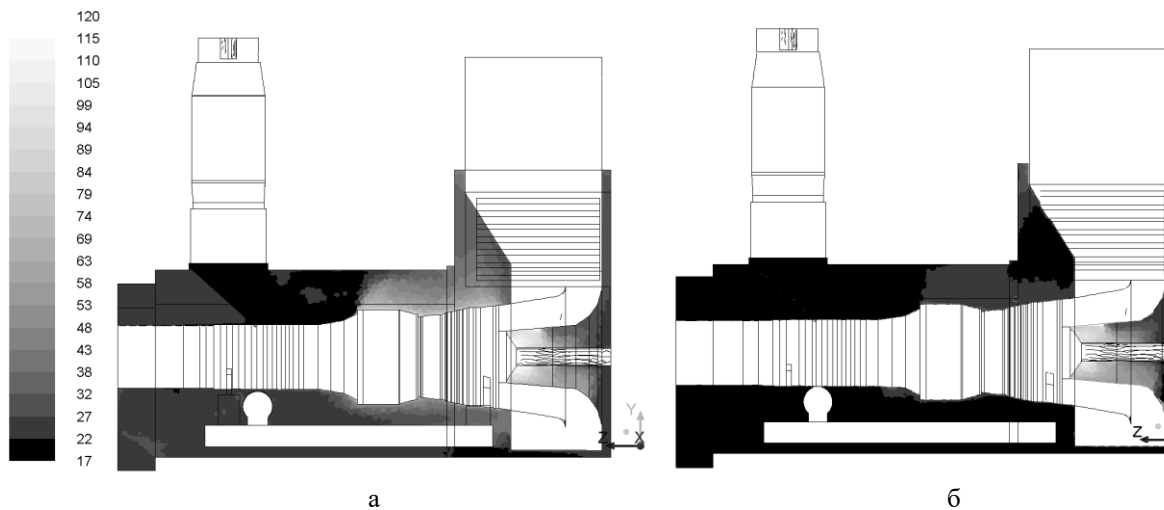
На входах в проточные части укрытия и газоотводного устройства задавались направление течения, массовые расходы, температуры и параметры турбулентности вентиляционного воздуха и выхлопных газов. На выходах из расчётной области задавалось нулевое избыточное статическое давление. На всех поверхностях твёрдых тел, омываемых вязким потоком, применялось граничное условие (ГУ) «прилипания» с использованием эмпирических пристеночных функций в модели турбулентности. Для наружных стенок укрытия наряду с одномерной моделью твёрдотельной теплопроводности использовались термические ГУ третьего рода: температура окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи при свободной конвекции между поверхностью укрытия и окружающей средой.

На внутренней поверхности большинства участков корпуса ГТД (лопаточные венцы КНД и СТ, ОВ, полости вокруг КВД) задавались термические ГУ третьего рода: коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности корпуса ГТД от омывающего её рабочего тела и температуры рабочего тела. На внутренней поверхности кожуха КС применены комбинированные ГУ, предусматривавшие задание дополнительных параметров – температуры и коэффициента излучения жаровой трубы. На участке переходника между корпусами КНД и КВД задавались ГУ второго рода – тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, не включённого в геометрическую модель корпуса ГТД. Теплопроводность корпуса ГТД описана моделью тонкой теплопроводной оболочки. В модели твёрдотельной теплопроводности корпуса ГТД, стенок укрытия и газоотводного устройства задавались их толщины, коэффициенты теплопроводности и степени черноты. Наличием в стенках «тепловых мостиков», иными тепловыделениями, кроме ГТД, а также утечками циклового воздуха и (или) выхлопных газов пренебрегали.

Интегрирование континуальных уравнений выполнялось методом контрольного объёма. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат.

Результаты численного исследования

Результаты расчётов ТС БС при наличии тепловой изоляции корпуса ГТД и при её отсутствии показаны на рис. 3 – 5.

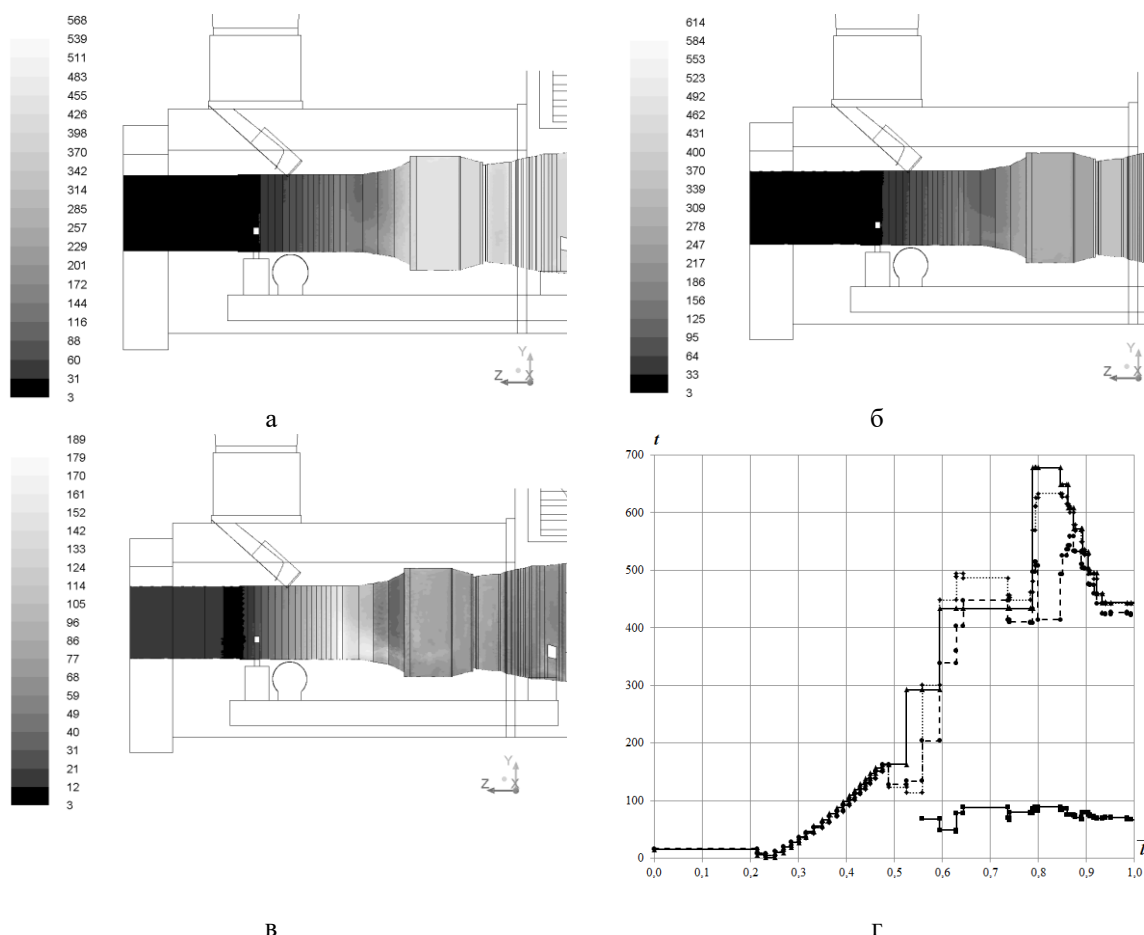


а

б

а – задача 1; б – задача 2

Рис. 3. Температура воздуха (°C) в сечении  $x = \text{const}$ , проходящем через ось ГТД



а

б

в

г

Рис. 4. Температуры (°C) наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции (задача 1) (а) и при её наличии (задача 2) (б), наружной поверхности изоляции (задача 2) (в) и средние температуры (°C) по участкам корпуса ГТД (г): —▲— — рабочего тела в проточной части ГТД; -●- - наружной поверхности корпуса ГТД металлического без изоляции (задача 1); .....♦..... — наружной поверхности металлического корпуса ГТД, покрытого изоляцией (задача 2); —■— — наружной поверхности изоляции (задача 2)

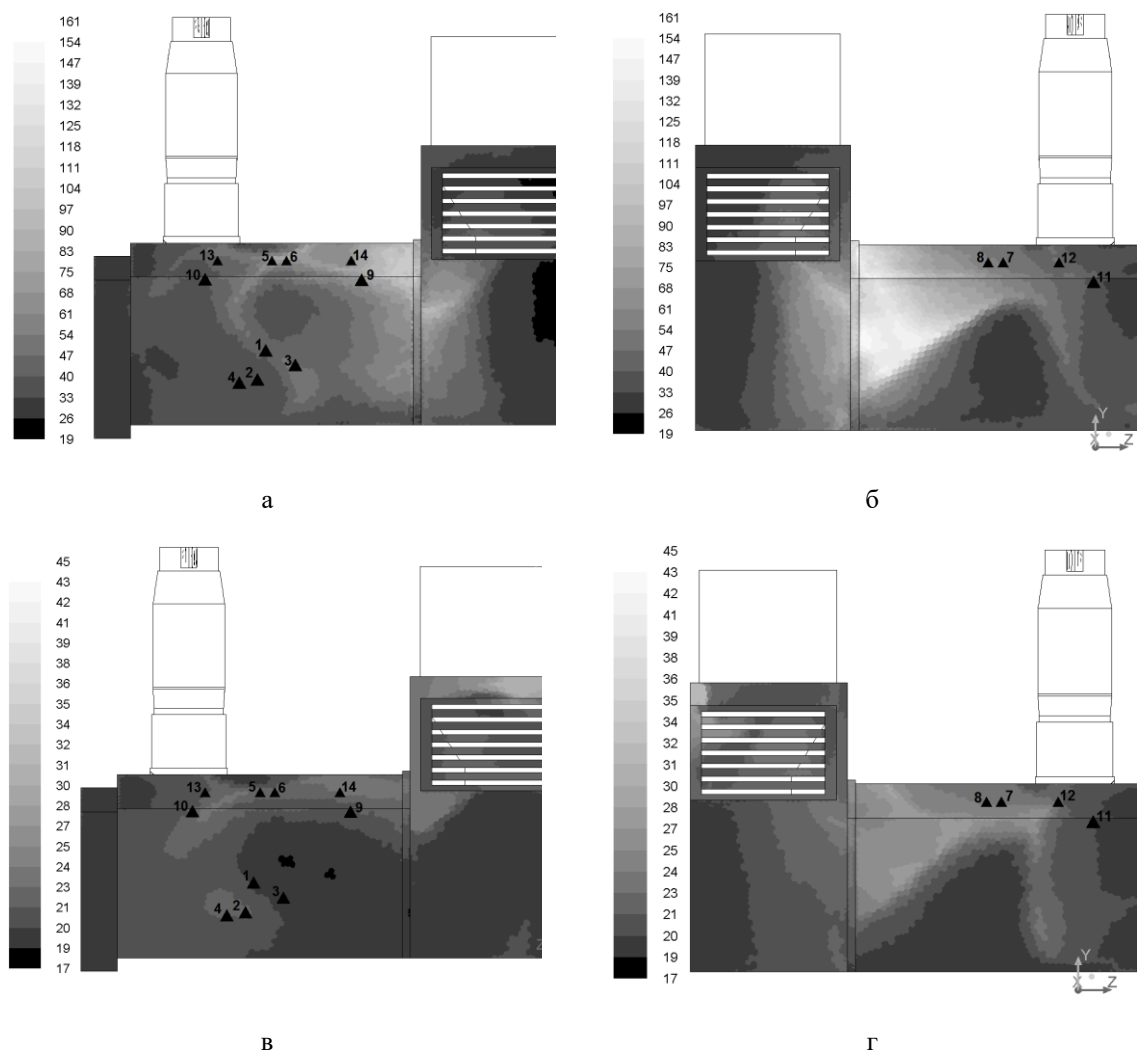


Рис. 5 Температура (°C) внутренних поверхностей стенок БС:

1 – дозатор газа; 2 – стоп-кран; 3 – газоанализатор углеводородных газов; 4 – термопреобразователь сопротивления; 5, 6, 7, 8 – тепловые пожарные извещатели; 9, 10, 11 – выключатели концевые; 12, 13, 14 – светильники; а – задача 1 (вид слева); б – задача 1 (вид справа); в – задача 2 (вид слева); г – задача 2 (вид справа)

Наличие тепловой изоляции корпуса ГТД практически не влияет на структуру и течения воздуха в БС, однако температура воздуха внутри БС снижается. Наибольшие температуры воздуха наблюдаются в застойной зоне около кожуха муфты (см. рис. 3).

Из рис. 4 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 °C. При этом температура расположенного под матами металлического корпуса ГТД увеличивается. Максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса ГТД без изоляции составляет около 570 °C на участке корпуса над рабочим колесом первой ступени СТ; при наличии изоляции на этом же участке температура наружной поверхности металлического корпуса возрастает до 610 °C. Максимальная температура наружной поверхности металлического корпуса при наличии изоляции достигает 630 °C 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.

Температуры внутренних стенок БС при наличии изоляции корпуса ГТД также значительно уменьшаются (см. рис. 5). Наибольшие температуры наблюдаются в районе газоотводного устройства.

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

треугольными маркерами на рис. 5. Применение тепловой изоляции корпуса ГТД приводит к уменьшению температур оборудования БС на 15 ... 50 °С. При этом в наибольшей степени снижаются температуры приборов, расположенных в районе высокотемпературных участков турбины ГТД, в частности, температура светильника 14 уменьшается на 45 °С, а выключателя концевого 9 – 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. В частности, 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 её КПД на 0,8% и мощности ГТД на 2,1 %.

#### **Выводы.**

Выполненное численное исследование ТС оборудования БС ТКА показало, что наличие тепловой изоляции корпуса конвертированного ГТД значительно снижает температуры наружной поверхности корпуса ГТД и малоразмерного оборудования. Это уменьшает роль ГТД как источника воспламенения и тепловыделения, что обеспечивает потенциальную возможность снижения мощности вентиляторов, подающих воздух внутрь БС. Однако покрытие корпуса ГТД теплоизоляционными матами имеет и негативные последствия. В частности, это приведет к небольшому снижению КПД турбины и мощности ГТД из-за дополнительного теплового расширения корпуса. Кроме того, для обеспечения возможности покрытия корпуса ГТД теплоизоляционными матами понадобится модификация их 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.

#### **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 p.
4. Теплоизоляционные оболочки iSHELL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gkflagman.com/catalog/npravlenie/?ID=1765.htm>. – 25.05.2015 p.
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 pp. – 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 pp. – 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, B. 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. – С. 15 – 18. – Режим доступа: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. – 25.05.2015 p.

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 pp. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
14. Костюк, В. Е. Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок / В. Е. Костюк, Е. И. Кирилаш, 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. Кирилаш // 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., Захаров Г. Н., Попов В. Л. 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 г.

V. Ye. Kostyuk, Ye. I. Kirilash

National Aerospace University «Kharkiv Aviation Institute»

**NUMERICAL RESEARCH OF THE TURBOCOMPRESSOR UNIT POWER BLOCK  
EQUIPMENT HEAT STATE IN THE PRESENCE OF HOT COMPONENTS HEAT  
INSULATION**

*Some problems of fire-, explosion safety and acceptable heat state support of the turbocompressor unit power block equipment were considered. Research of the 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. Based on the maximum permissible gas-turbine engine case temperature under the conditions of fire- and explosion safety, thickness of heat-insulating mats on the different gas-turbine engine case parts was calculated. Simulation results have shown essential decrease of the temperatures of the gas-turbine engine case 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. Advisability of external heat insulation application on the cases of converted gas-turbine engines, working in turbocompressor unit power block enclosures, needs additional feasibility study.*

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

1. Lebedev-Tsvetkov, Yu. D. Oborudovanie i rabochie protsessy gazoturbinnnykh kompressornykh stantsiy / Yu. D. Lebedev-Tsvetkov. – L. : Nedra, 1966. – 157 s.
2. Voronkov, S. T. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya teplozashchity oborudovaniya TES / S. T. Voronkov // Promyshlennaya energetika. – 2003. – № 5. – С. 19 – 23.
3. Promyshlennaya izolyatsiya ARNOLD [Elektronnyy resurs]. – Режим доступа: <http://www.arnoldgroup.com/3/isolierungen/isolierungen.htm>. – 25.05.2015.
4. Teploizolyatsionnye obolochki iSHELL [Elektronnyy resurs]. – Режим доступа: <http://gkflagman.com/catalog/napravlenie/?ID=1765.htm>. – 25.05.2015.
5. Rudyuk, V. Teploakusticheskaya izolyatsiya dlya ob'ektov neftegazovogo kompleksa / V. Rudyuk // Nef-tegazovaya vertikal'. – №13-14. – 2014. – С. 14 – 15.
6. Shlyapin, Ya. K. Matematicheskoe modelirovanie teplovykh rezhimov otsekov GPA / Ya. K. Shlyapin // Gazovaya promyshlennost'. – 2008. – № 2. – С. 16 – 19.
7. Klochkov, A. V. Obespechenie vzryvozhachity gazoturbinnogo oborudovaniya / A. V. Klochkov, E. S. Kornilova, A. A. Snitko // Gazoturbinnye tekhnologii. – 2005. – № 8. – С. 20 – 22.
8. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation [Elektronnyy resurs] / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanolini, P. Pecchi. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
9. Trusov, P. V. Chislennye issledovaniya protsessa ventilyatsii i teplovogo sostoyaniya shumoteplo-zashchitnykh kozhukhov gazoturbinnnykh ustanovok s ispol'zovaniem parallel'nykh vychisleniy / P. V. Trusov, D. A. Charntsev // Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred. – 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 [Elektronnyy resurs] / 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 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
11. Vahidi, D. Numerical and Experimental Study of Ventilation for Turbine Package Enclosure [Elektronnyy resurs] / D. Vahidi, H. Bagheri, B. Glezer. – 80 Min / 700 Mb. – Proceedings of ASME TurboExpo 2006. Barcelona, Spain. May 8-11, 2006. GT2006-90960. – 10 p. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
12. Barbato, L. Combined 1D and 3D CFD Approach for GT Ventilation System Analysis [Elektronnyy resurs] / L. Barbato, M. Blarasin, S. Rosin // Newsletter. – 2008. – № 1. – S. 15 – 18. – Rezhim dostupa: <http://www.enginsoft.it/applications/oilgas/geoilgas.html>. – 25.05.2015.
13. Santon, R. C. A New Gas Turbine Enclosure Ventilation Design Criterion [Elektronnyy resurs] / 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 pp. – 1 elektron. opt. disk (CD-ROM).
14. Kostyuk, V. E. Obobshchennaya matematicheskaya model' teplovogo sostoyaniya ukrytyy gazoturbinykh ustanovok / V. E. Kostyuk, E. I. Kirilash, A. L. Kravchuk // Integrirovannyye tekhnologii i energosbere-zhenie. – 2013. – № 1. – S. 22 – 26.
15. Kostyuk, V. E. Teplovaya model' korpusa gazoturbinnogo dvigatelya / V. E. Kostyuk, E. I. Kirilash // Integrovani tekhnologii ta energosberezhennya. – 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. Burdyugov, S. I., Zakharov G. N., Popov V. L. Bezavariynaya ekspluatatsiya «goryachikh» gazoturbinykh dvigateley v sostave angarnykh GPA / S. I. Burdyugov, G. N. Zakharov, V. L. Popov // Gazovaya promyshlennost'. – 2008. – № 4. – S. 57 – 59.
18. Erikh, V. N. Khimiya i tekhnologiya nefi i gaza / V. N. Erikh, M. G. Rasina, M. G. Rudin. – L., Khimiya, 1977. – 424 s.
19. Proizvodstvennaya bezopasnost'. Chast' 1. Opasnye proizvodstvennye faktory : ucheb. posobie / pod red. S. V. Efremova ; Politekhn. un-t. – SPb. : Izd-vo Politekhn. un-ta, 2012. – 223 s.
20. Teploizolyatsionnye izdeliya [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: <http://rotys.com/mati.htm>. – 25.05.2015.

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

**В. Є. Костюк**, канд. техн. наук, старш. наук. співроб.

**О. І. Кирилаш**

**Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ»  
ЧИСЛОВЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООВОГО СТАНУ ОБЛАДНАННЯ СИЛОВОГО БЛОКА  
ТУРБОКОМПРЕСОРНОГО АГРЕГАТА  
ЗА НАЯВНОСТІ ТЕПЛОВОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ГАРЯЧИХ ВУЗЛІВ**

*Розглянуто деякі проблеми забезпечення пожежо- і вибухобезпечності та прийняттого теплового стану обладнання силових блоків турбокомпресорних агрегатів. Виконано дослідження теплового стану обладнання силового блока за наявності та відсутності зовнішньої теплової ізоляції корпусу конвертованого газотурбінного двигуна методами обчислювальної аерогідродинаміки. Товщини теплоізоляційних матів, що розміщалися на різних ділянках корпусу двигуна, розраховувалися, виходячи з температури їх поверхні, максимально припустимої за умовами пожежовибухобезпеки. Результати показали, що покриття корпусу двигуна тепловою ізоляцією призведе до значного зниження температури його зовнішньої поверхні і малорозмірного обладнання силового блока при невеликому зменшенні коефіцієнта корисної дії турбіни і потужності двигуна внаслідок додаткового теплового розширення корпусу. Доцільність використання зовнішньої теплової ізоляції корпусів конвертованих двигунів, що працюють в укритті силових блоків турбокомпресорних агрегатів, потребує додаткового техніко-економічного обґрунтування.*

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

Надійшла 17.05.2015

Received 17.05.2015