

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

Костюк В.Е., Кирилаш Е.И.

**ТЕПЛОВАЯ МОДЕЛЬ КОРПУСА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

**Введение.** На блочно-комплектных компрессорных станциях газовой и нефтяной промышленности широко применяются турбокомпрессорные агрегаты (ТКА) с конвертированными авиационными или судовыми газотурбинными двигателями (ГТД) в качестве привода, входящими в состав силовых блоков (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. С развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (CFD – Computational Fluid Dynamics) стало возможным оценить тепловое состояние (ТС) оборудования БС моделированием физических процессов в формулировке краевых задач. Удачный выбор расчётной области и задание адекватных граничных условий (ГУ) при моделировании ТС оборудования БС ТКА является нетривиальной проблемой, от способа решения которой зависит точность численного решения.

В общем случае укрытие можно рассматривать как систему, включающую следующие энергетически связанные тела: ограждающие конструкции; атмосферный воздух; оборудование (в том числе ГТД), находящееся внутри укрытия; вентиляционный воздух, омывающий оборудование и ограждающие конструкции; цикловый воздух и (или) выхлопные газы, протекающие внутри ГТД и газоотводного устройства; воздух системы внутреннего охлаждения горячих узлов ГТД). Краевую задачу о ТС такой системы можно формулировать как сопряжённую на поверхностях раздела фаз «газ – твёрдое тело». Такой подход является наиболее полным, но по ряду причин трудно реализуем. Авторы работ [1-4] упростили постановку задачи, полностью или частично исключив из рассмотрения наиболее сложный элемент системы – ГТД. Так в работах [1–3] участки границы расчётной области совпадают с наружной, а в работе [4] – с внутренней поверхностью корпуса ГТД. На указанных участках границы в работах [1] и [2] задавались термические ГУ 1-го (температура) и 2-го рода (тепловой поток) соответственно, а в работах [3, 4] – термические ГУ 3-го рода (вынужденной конвекции). Поскольку перечисленные условия зависят от распределения температуры вентиляционного воздуха, которое в данной постановке задачи является искомым, а также от режима работы двигателя, их практическое использование возможно только в сочетании с некоторой тепловой моделью корпуса ГТД. Очевидно, при использовании ГУ 1-го и 2-го рода такая модель может быть только эмпирической. Применение ГУ 3-го рода в сочетании с допущением о независимости условий в проточной части ГТД от условий в укрытии открывает возможность разработки модели, включающей термодинамическую модель ГТД и модель теплопроводности его корпуса, идентифицируемую по результатам эксперимента. Облучённость некоторых участков корпуса ГТД, расположенными внутри проточной части ГТД горячими деталями (например, жаровой трубой (ЖТ)) может быть учтена постановкой комбинированных радиационно-конвективных ГУ.

Цель настоящего исследования – разработать расчётно-экспериментальную тепловую модель корпуса ГТД как основного источника тепловыделения в

пространство укрытия, пригодную для оценки ТС оборудования БС ТКА методами CFD.

**Разработка тепловой модели корпуса ГТД**

Корпус ГТД был условно разделён на тридцать три участка, соответствующих характерным элементам проточной части ГТД, укрупнённо показанных на рис. 1. Корпусы компрессора низкого давления (КНД) и силовой турбины (ТС) были разделены повенцово, кроме того, начиная с компрессора высокого давления (КВД), участки разбивались на части, имеющие кусочно-постоянную толщину в соответствии с толщинами корпуса ГТД.

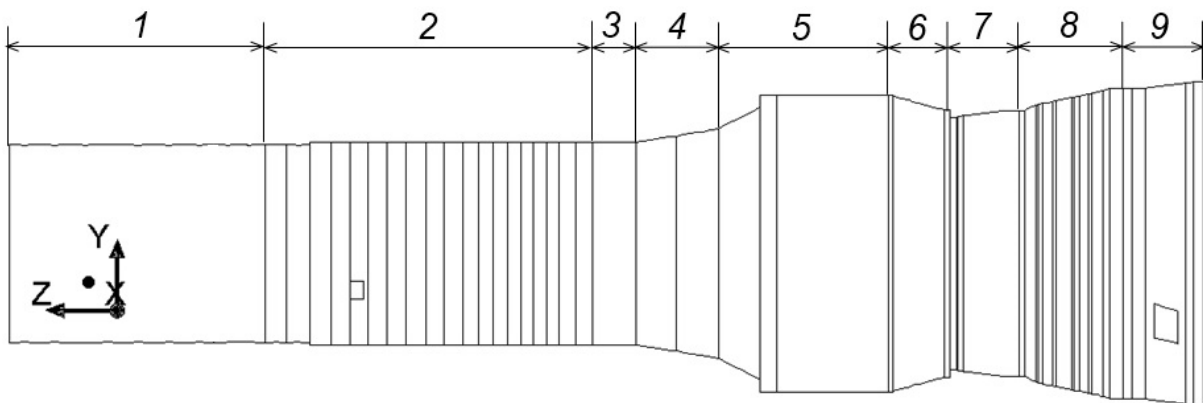


Рисунок 1 – Характерные участки корпуса ГТД: 1 – проставка; 2 – корпус КНД; 3 – переходник; 4 – корпус силовой КВД; 5 – кожух камеры сгорания (КС); 6 – корпус силовой турбины высокого давления (ТВД) и турбины низкого давления (ТНД); 7 – опорный венец (ОВ) ТНД; 8 – корпус ТС; 9 – ОВ ТС

В поперечных сечениях проточной части ГТД, относящихся к характерным элементам, с помощью термодинамической модели ГТД рассчитывались средние температуры и скорости рабочего тела. Используя данные параметры и линейные размеры элементов проточной части ГТД, по критериальным уравнениям [5] рассчитывались коэффициенты теплоотдачи к внутренней поверхности корпуса ГТД от омывающего её рабочего тела: от воздуха к поверхностям межлопаточных каналов направляющих аппаратов КНД и к корпусу ГТД над рабочими колесами КНД, от газа к поверхностям межлопаточных каналов решеток сопловых аппаратов ТС и к корпусу ГТД над рабочими лопатками ТС при отсутствии и наличии бандажных полок; по критериальным уравнениям [6] – от воздуха к корпусу ГТД во входной проставке и в каналах кольцевого сечения, соответствующих переходнику, кожуху КС и полостям корпуса силового КВД, от газа к корпусу ГТД в каналах кольцевого сечения, соответствующих ОВ ТНД и ОВ ТС. Учитывались тепловой поток вследствие теплопроводности вдоль корпуса КВД, не включённого в геометрическую модель корпуса ГТД, и облучение кожуха КС расположенной внутри него ЖТ. С целью экономии вычислительных ресурсов для описания теплопроводности корпуса ГТД была использована модель тонкой теплопроводной оболочки.

В рамках обобщённой математической модели ТС укрытия [7] была сформулирована и решена задача о теплоотдаче при свободном движении воздуха, вызванном гравитационными силами, около корпуса ГТД, работающего на номинальном режиме, с использованием описанной выше тепловой модели корпуса

ГТД. Течение полагалось нестационарным, трёхмерным, турбулентным. Для замыкания системы уравнений неразрывности, сохранения импульса в форме Навье–Стокса и энергии использована модель турбулентности Лаундера–Сполдинга [8], учитывающая силы плавучести. Лучистый теплообмен учитывался включением в систему уравнения переноса излучения.

Численное решение отыскивалось в области пространства, охватывавшей зеркально симметричную половину корпуса ГТД, которая была заключена в цилиндрический объём достаточно большого диаметра, чтобы предполагать, что свободное движение, возникающее у его стенок, не сказывается на обтекании воздухом корпуса ГТД. Расчётная область покрывалась полиэдрической сеткой, включавшей 650 тыс. ячеек. На внутренней поверхности большинства участков корпуса ГТД (лопаточные венцы КНД и ТС, ОВ, полости вокруг КВД) задавались термические ГУ 3-го 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 ЖТ. На участке переходника между КНД и КВД задавались ГУ 2-го рода – тепловой поток. В модели твёрдотельной теплопроводности корпуса ГТД задавались толщины участков и коэффициенты теплопроводности материалов. В первом приближении учитывалась только поперечная теплопроводность корпуса ГТД, во втором – поперечная и продольная. Интегрирование континуальных уравнений выполнялось методом контрольного объёма. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат.

Расчётные температуры наружных поверхностей десяти участков корпуса ГТД осреднялись по окружности в местах, соответствовавших фланцам корпуса ГТД, в которых производилось его термометрирование при отсутствии обдува двигателя вентиляционным воздухом (рис. 2).

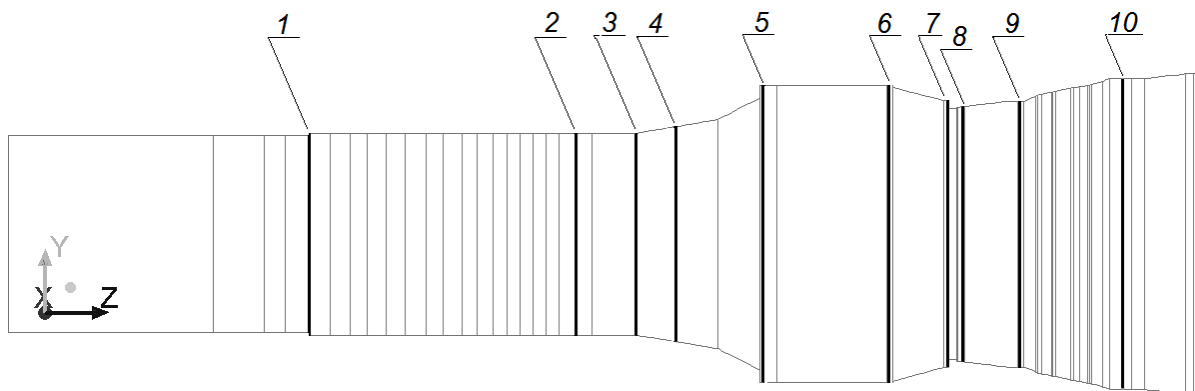


Рисунок 2 – Участки наружной поверхности корпуса ГТД, в которых определялись его средние по окружности температуры

Относительный подогрев наружных поверхностей участков корпуса ГТД определялся по формуле

$$\bar{\Theta} = \frac{T - T_B}{T_{\max.э} - T_B}, \quad (1)$$

где  $T$  – средняя температура наружной поверхности участка корпуса ГТД;  $T_{в}$  – температура окружающей среды;  $T_{\max,э}$  – максимальная замеренная температура наружной поверхности участка корпуса ГТД.

Результаты расчёта относительного подогрева наружных поверхностей участков корпуса ГТД в различных приближениях показаны на рис. 3 и 4.

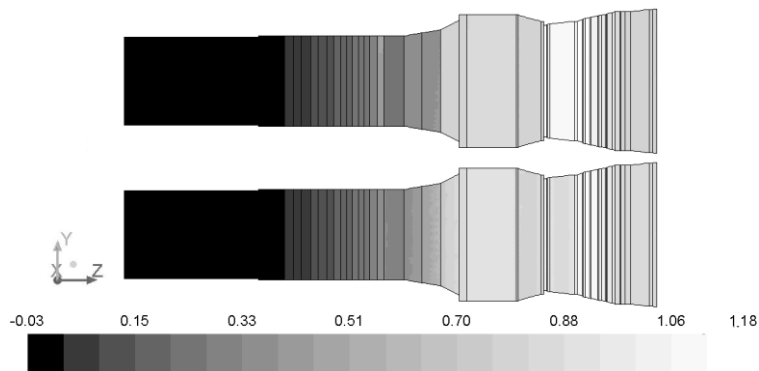


Рисунок 3 – Относительный подогрев наружных поверхностей участков корпуса ГТД: вверху – первое приближение; внизу – седьмое приближение

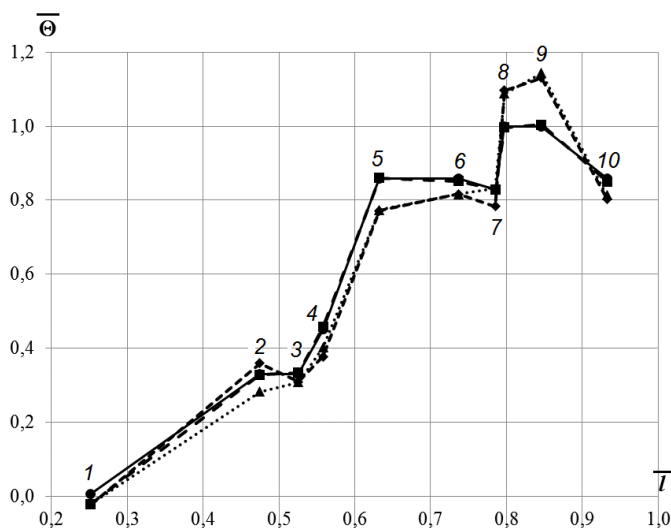


Рисунок 4 – Изменение относительного подогрева наружных поверхностей участков корпуса двигателя по его относительной длине (номера точек на графике соответствуют номерам участков на рис. 2) : —●— — замеренные значения; - -◆- - первое приближение; .....▲..... – второе приближение; - -■- - седьмое приближение

Из рис. 4 видно, что характер изменения расчётных температур наружной поверхности корпуса ГТД, полученных в первом приближении, качественно соответствует характеру изменения замеренных температур, за исключением участков с равной температурой. При учёте продольной теплопроводности (второе приближение) на большинстве участков температуры наружной поверхности корпуса ГТД изменяются незначительно, за исключением участка 2, где подводится тепловой поток, и участка 7, соответствующего застойной области вокруг корпуса ТВД и ТНД. Очевидно подведенный тепловой поток распространяется по корпусу КНД, что приводит к уменьшению температуры на участке 2, а температура на участке 7

увеличивается за счет распространения теплоты от корпуса ОВ ТНД. Наибольшее количественное различие расчётных и измеренных температур имеет место в районе корпуса ТС (участок 9), достигая во втором приближении 71 градуса или 9 %. Данное несоответствие объясняется не учётом подводов и отводов теплоты от деталей и элементов корпуса ГТД, не включённых в геометрическую модель, ошибками, внесёнными при расчёте ГУ, а также погрешностями самого эксперимента. Теплота посредством продольной теплопроводности, в частности, подводится к участкам корпуса ГТД по корпусным деталям от передней опоры ротора КНД, от корпуса КВД, от корпуса ТВД и ТНД, а отводится к задней опоре ротора КНД, опорам турбокомпрессора высокого давления, опорам ТС. Ошибки расчётов обусловлены погрешностями уравнений термодинамической модели ГТД, критериальных уравнений и численных методов, а также неизвестностью точных значений некоторых параметров ГТД (КПД узлов, потерь в элементах проточной части, отборов на охлаждение горячих элементов, температуры стенок ЖТ и т. д.) и геометрических размеров проточной части ГТД.

Основываясь на допущении, что условия в проточной части ГТД не зависят от внешней обстановки, можно внести поправки в параметры тепловой модели корпуса ГТД, которые останутся постоянными вне зависимости от наличия или отсутствия его обдува вентиляционным воздухом и будут компенсировать перечисленные выше ошибки, выполнив идентификацию температур наружной поверхности корпуса ГТД по их экспериментальным значениям.

### **Идентификация тепловой модели корпуса ГТД**

Для идентификации модели использованы температуры наружных поверхностей корпуса двигателя, замеренные на «горячих» участках 2 – 9. Участок 1 принадлежит к холодной части корпуса ГТД, которая оказывает незначительное влияние на ТС оборудования БС ТКА. Кроме того, результаты термометрирования участка 1 были признаны недостоверными, поскольку измеренное значение температуры участка 1 из-за несовершенства измерений и (или) ошибки округления их результатов совпадает с температурой окружающей среды, тогда как даже с учётом передачи теплоты от передней опоры ротора КНД и опор привода физически возможное значение температуры корпуса ГТД на этом фланце находится между значениями температур воздуха внутри проточной части и снаружи ГТД.

ГУ, а именно значения теплового потока, коэффициентов теплоотдачи и температуры ЖТ, на ряде участков наружной поверхности корпуса ГТД уточнялись методом дихотомии. Получаемые в ходе итерационной процедуры расчётные температуры наружной поверхности сравнивались с экспериментальными. Было выполнено ещё пять приближений, пока различия между расчётными и экспериментальными оценками температур не стали меньше 5 К.

Из рис. 3 видно, что температуры наружной поверхности корпусов ОВ ТНД и ТС, полученные на седьмом приближении, уменьшились по сравнению с температурами, полученными на первом приближении, а корпуса КНД, наоборот, увеличились. С физической точки зрения снижение температуры корпуса ОВ ТНД обусловлено стоком теплоты к задней опоре турбокомпрессора высокого давления и передней опоре ТС. Из рис. 4 видно, что расчётное распределение температур, полученное в седьмом приближении, на всех участках соответствует экспериментальному. Максимальные различия не превышают 3,5 градусов (0,5 %).

**Выводы.** Разработана расчётно-экспериментальная тепловая модель корпуса ГТД как основного источника тепловыделения в пространство укрытия БС ТКА, основанная на описании физических процессов, происходящих внутри ГТД, и не требующая коррекции экспериментально измеренной термограммы корпуса ГТД в зависимости от режима работы двигателя и интенсивности его обдува вентиляционным воздухом. Тепловая модель корпуса ГТД может быть использована для оценки ТС оборудования БС ТКА методами CFD.

Направления дальнейших исследований авторы видят в верификации математической модели ТС укрытия, включающей разработанную тепловую модель корпуса ГТД, по данным натурных испытаний БС ТКА при наличии обдува двигателя вентиляционным воздухом.

**Обозначения.**  $\bar{\Theta}$  – относительный подогрев;  $T$  – температура, К; ТКА – турбокомпрессорный агрегат; ГТД – газотурбинный двигатель; БС – силовой блок; CFD – вычислительная аэрогидродинамика (Computational Fluid Dynamics); ТС – тепловое состояние; ГУ – граничные условия; ЖТ – жаровая труба; КНД – компрессор низкого давления; ТС – силовая турбина; КВД – компрессор высокого давления; КС – камера сгорания; ТВД – турбина высокого давления; ТНД – турбина низкого давления; ОВ – опорный венец.

#### Литература

1. Исследование газодинамических характеристик шумотеплоизолирующего кожуха газотурбинной установки газоперекачивающего агрегата при аварийном отключении вентиляторов системы охлаждения / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев, И.Р. Кац, В.В. Мокшанов, А.М. Печенкина // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2008. – № 9. – С. 27–29.
2. Месропян А.В. Численное моделирование газодинамики и теплопереноса в системе охлаждения бокса ГТД / А.В. Месропян, И.И. Мухамедзянова // Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 1. – С. 25–31.
3. Чарнцев Д.А. Математическое моделирование теплового состояния шумотеплоизолирующих кожухов: автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук: спец. 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» / Д.А. Чарнцев. – Пермь, 2012. – 16 с.
4. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation / M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi // Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
5. Теплопередача в охлаждаемых деталях газотурбинных двигателей летательных аппаратов / В.И. Локай, М.Н. Бодунов, В.В. Жуйков, А.В. Щукин. – М.: Машиностроение, 1985. – 216 с.
6. Крейт Ф. Основы теплопередачи / Крейт Ф., Блэк У. – М.: Мир, 1983. – 512 с.
7. Костюк В.Е. Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытий газотурбинных установок / В.Е. Костюк, Е.И. Кириладш, А.Л. Кравчук // Интегрированные технологии и энергосбережение. – 2013. – № 1. – С. 22–26.
8. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.

#### Bibliography (transliterated)

1. Issledovanie gazodinamicheskikh harakteristik shumoteploizoliruyushego kozhuha gazoturbinnoy ustanovki gazoperekachivayushego agregata pri avariynom otklyuchenii ventilyatorov sistemyi ohlazhdeniya. P.V. Trusov, D.A. Charntsev, I.R. Kats, V.V. Mokshanov, A.M. Pechenkina. Himicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie. – 2008. – # 9. – P. 27–29.
2. Mesropyan A.V. Chislennoe modelirovanie gazodinamiki i teplomassoperenosa v sisteme ohlazhdeniya boksa GTD. A.V. Mesropyan, I.I. Muhamedzyanova. Vestnik UGATU. – 2010. – T. 14, # 1. – P. 25–31.
3. Charntsev D.A. Matematicheskoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya shumoteploizoliruyuschih kozhuhov: avtoref. dis. na soiskanie uchyonoy stepeni kand. tehn. nauk: spets. 05.13.18 «Matematicheskoe modelirovanie, chislennyye metodyi i komplekxsiy program». D.A. Charntsev. – Perm, 2012. – 16 p.
4. Results and Experience from Ge Energy's MS5002E Gas Turbine Testing and Evaluation. M. D'Ercole, G. Biffaroni, F. Grifoni, F. Zanobini, P. Pecchi. Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6–9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
5. Teploperedacha v ohlazhdaemyih detalyah gazoturbinnyyih dvigateley letatelnyih apparatov V.I. Lokay, M.N. Bodunov, V.V. Zhuykov, A.V. Schukin. – M.: Mashinostroenie, 1985. – 216 p.
6. Kreyt F. Osnovy teploperedachi. Kreyt F., Blek U. – M.: Mir, 1983. – 512 p.
7. Kostyuk V.E. Obobschyonnaya matematicheskaya model teplovogo sostoyaniya ukrytiy gazoturbinnyyih ustanovok. V.E. Kostyuk, E.I. Kirilash, A.L. Kravchuk. Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie. – 2013. – # 1. – P. 22–26.
8. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence. B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.

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

Костюк В.Є., Кирилаш О.І.

### ТЕПЛОВА МОДЕЛЬ КОРПУСА ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

Розроблено теплову модель корпусу ГТД, який є основним джерелом тепловиділення до простору укриття силового блоку турбокомпресорного агрегату. Для підвищення адекватності моделі виконано ідентифікацію температур зовнішньої поверхні корпусу ГТД за їх експериментальними значеннями. Теплову модель корпусу ГТД можна використовувати для оцінки теплового стану обладнання силового блоку.

Kostyuk V.Ye., Kirilash Ye.I.

### GAS-TURBINE CASE HEAT MODEL

Heat model of the gas-turbine case, which is the main source of the heat release into turbocompressor unit power block enclosure space, was developed. Identification of the gas-turbine case outer surface temperatures by their experimental values for model adequacy improvement was done. Gas-turbine case heat model can be used to power block equipment heat regimen estimation.