

Костюк В.Е., Кирилаш Е.И., Кравчук А.Л.

**ОБОБЩЁННАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ УКРЫТИЙ
ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК**

Введение. На современном этапе развития энергетики и машиностроения широкое распространение получили электрические и компрессорные станции с газотурбинными установками (ГТУ), используемыми в качестве механических приводов генераторов и компрессоров соответственно. Для защиты персонала от шума, тепловых и механических воздействий ГТУ последние часто размещают в относительно компактных шумотеплоизолирующих укрытиях. Большое количество теплоты, выделяемой ГТУ и оборотом, удаляется из укрытия непрерывным потоком пропускаемого через него охлаждающего (вентиляционного) воздуха. Течение охлаждающего воздуха (ОВ) обычно обеспечивается с помощью вентилятора, вращаемого электродвигателем, реже – с помощью эжектора, использующего аэродинамический эффект потока выхлопных газов (ВГ). Однако вентиляция пространства внутри укрытия обуславливает возникновение ряда проблем. В частности, односторонняя подача ОВ может вызывать неравномерное распределение газодинамических параметров внутри укрытия, температур на поверхностях его стенок и неравномерное охлаждение корпуса ГТУ в поперечном направлении. Это может привести к повышению температуры в застойных областях и локальному перегреву стенок укрытия, что отрицательно скажется на работе размещённых в нём оборудования и аппаратуры, и даже к выходу из строя ГТУ из-за изгиба её корпуса, обусловленного разностью температур его поверхностей. В связи с этим разработка рациональных конструкций укрытий ГТУ и эффективных систем их вентиляции является актуальной задачей, имеющей большое практическое значение.

Традиционно проектирование и доводка систем внешнего охлаждения ГТУ и вентиляции укрытий выполнялись без применения пространственных математических моделей (ММ) происходящих в них газодинамических и тепловых процессов. Это обуславливало большие объёмы испытаний, сроки и стоимость опытно-конструкторских работ. Простейшие одномерные ММ теплового баланса не дают информации о локальных скоростях и температурах ОВ в укрытии, так как они оперируют лишь средними величинами. Делались попытки достичь компромисса между адекватностью ММ и её пригодностью к использованию при проектировании укрытий. Например, в работе [1] предложена одномерная модель газового объёма с искусственным учётом эффектов струйных течений. В настоящее время, в связи с развитием методов вычислительной аэрогидродинамики (ВАГД), появилась возможность подробного моделирования физических процессов. В результате авторами работ [2–5] выполнены численные исследования отдельных аспектов, определяющих тепловое состояние (ТС) укрытий ГТУ, в трёхмерной постановке. Однако в известных исследованиях отсутствует обобщённый подход к ММ ТС укрытий ГТУ методами ВАГД, а вопросы адаптации обобщённой модели к условиям частных задач, выявления существенных связей между входными и выходными данными модели и их интерпретации до настоящего времени не рассматривались.

Цель настоящей работы – сформулировать общую постановку задачи о ТС укрытия ГТУ и разработать соответствующую обобщённую ММ, обладающую свойствами адаптируемости, верифицируемости и идентифицируемости.

Общая постановка задачи о тепловом состоянии укрытия ГТУ. Под ТС укрытия ГТУ будем понимать распределение температуры составляющих его твёрдых и заполняющих его газообразных тел в пространстве и её изменение во времени. В общем случае целью моделирования ТС укрытий ГТУ является определение температуры, скорости и направления движения ОВ внутри укрытия, а также температуры внутренних и наружных стенок укрытия в произвольных точках при установившихся и неустановившихся (в том числе аварийных) режимах его эксплуатации с учётом тепловыделений оборудования, находящегося в укрытии, а также утечек циклового воздуха (ЦВ) и (или) ВГ из проточной части ГТУ.

Рассмотрим окружённое внешней средой оснащённое системой вентиляции укрытие с размещёнными внутри него ГТУ, улиткой и оборудованием как систему, состоящую из следующих энергетически взаимосвязанных элементов:

- ГТУ;
- улитка;
- оборудование;
- ограждающие конструкции укрытия (ОКУ);
- ОВ;

- ВГ;
- утечки ЦВ (ВГ);
- атмосферный воздух (АВ);
- теплоизлучающие тела, окружающие укрытие;
- теплопроводная среда, расположенная под полом укрытия.

На рис. 1 показана упрощенная схема теплового баланса укрытия, отражающая энергетические связи между элементами системы.

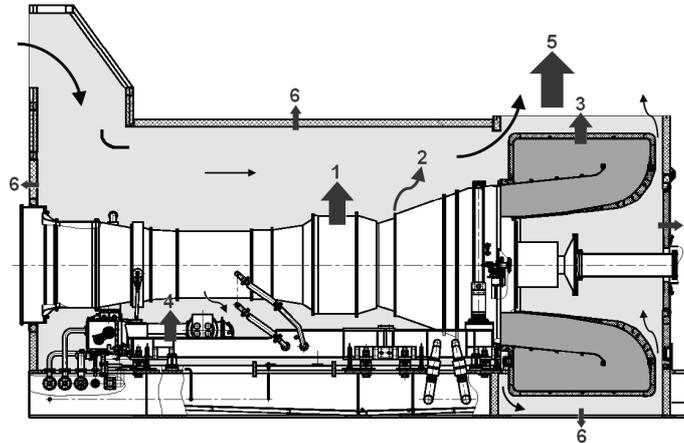


Рисунок 1 – Схема теплового баланса укрытия ГТУ:

- 1 – тепlopоступления от ГТУ; 2 – тепlopоступления за счёт утечек ЦВ (ВГ); 3 – тепlopоступления от улитки; 4 – тепlopоступления от оборудования; 5 – тепlopотери за счёт воздухообмена; 6 – тепlopотери через ОКУ

Энергетические связи (перенос энергии в форме теплоты) между элементами системы обусловлены следующими физическими явлениями:

- трёхмерным вязким течением ОВ внутри укрытия;
- смешением ОВ с утечками ЦВ (ВГ);
- конвективным теплообменом между ОВ и омываемыми им поверхностями;
- конвективным теплообменом между АВ и наружными поверхностями ОКУ;
- конвективным теплообменом между ОВ и внутренними поверхностями улитки;
- теплопроводностью корпуса улитки и ОКУ;
- лучистым теплообменом между поверхностями, обращёнными внутрь укрытия;
- лучистым теплообменом между окружающей средой (ОС) и наружными поверхностями ОКУ;
- лучистым теплообменом между ВГ и внутренними поверхностями улитки.

Обобщённая математическая модель теплового состояния укрытия ГТУ. Описание совокупности перечисленных выше физических явлений требует привлечения разнородных ММ для описания состояния отдельных физических подсистем исследуемой сложной системы. Так, явления вязкого течения, смешения и конвективного теплообмена могут быть описаны системой уравнений неразрывности для бинарной смеси в целом (1), сохранения массы инертной примеси (2), сохранения количества движения в форме Навье–Стокса (3) и сохранения энергии (4), замыкаемой уравнением состояния (5), явление теплопроводности в твёрдых телах (ТТ) – уравнением сохранения энергии в форме уравнения теплопроводности (4а), явление лучистого теплообмена – уравнением переноса излучения в форме (6) для излучающей среды (ВГ) или в форме (6а) для диатермичной среды (ОВ и ЦВ):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial Y}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial Y}{\partial x_i} = \frac{\mu}{Sc} \frac{\partial^2 Y}{\partial x_i^2}, \quad i = 1, 2, 3; \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \rho g_j, \quad i=1, 2, 3; \quad j=1, 2, 3; \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u_i \frac{\partial h}{\partial x_i} = \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial^2 h}{\partial x_i^2} + \frac{\partial q_i^R}{\partial x_i}, \quad i=1, 2, 3; \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}, \quad i=1, 2, 3; \quad (4a)$$

$$p = \rho RT / M; \quad (5)$$

$$\frac{1}{\beta_0} \frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + I(\vec{r}, \vec{s}) = (1 - \omega_0) I_b(\vec{r}) + \frac{\omega_0}{4\pi} \int_{\Omega'=4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') d\Omega'; \quad (6)$$

$$\frac{\partial I}{\partial s} = 0, \quad (6a)$$

где u_i, u_j – составляющие вектора скорости в направлении соответствующих осей декартовых координат x_i, x_j ; ρ – плотность; Y – массовая доля инертной примеси; t – время; μ – коэффициент динамической вязкости; $Sc \equiv \mu/D\rho$ – число Шмидта; D – коэффициент диффузии; p – давление; g_j – составляющая ускорения

свободного падения в направлении оси x_j ; $h = \int_{T^0}^T c_p(T) dT$ – удельная энтальпия; T – температура газа; T^0 – стандартная температура; c_p – удельная изобарная теплоемкость газа; $Pr \equiv \mu c_p/\lambda$ – число Прандтля; λ – коэффициент теплопроводности; q_i^R – составляющая плотности потока теплового излучения в направлении оси x_i ; $a \equiv \lambda/\rho c$ – коэффициент температуропроводности; c – удельная теплоёмкость ТТ; R – универсальная газовая постоянная; M – кажущаяся молекулярная масса смеси; $\beta_0 = k_a + \sigma_s$ – объёмный коэффициент затухания; k_a – объёмный коэффициент поглощения; σ_s – объёмный коэффициент рассеяния; I – интенсивность теплового излучения; \vec{r} – радиус-вектор произвольного луча в направлении распространения теплового излучения \vec{s} ; $\omega_0 = \sigma_s/\beta_0$ – альбеда рассеяния; $I_b = \sigma T^4/\pi$ – интенсивность теплового излучения абсолютно чёрного тела; σ – постоянная Стефана – Больцмана; Ω' – единичный вектор телесного угла, характеризующий направление распространения теплового излучения вследствие рассеяния фотонов \vec{s}' .

Уравнения (1)–(4) записаны, исходя из допущения о том, что эффекты сжимаемости, вязкого нагрева, термо-, баро- и самодиффузии пренебрежимо малы [6]. Уравнение (6) записано, исходя из допущения о квазистационарном, когерентном и изотропном переносе излучения [7]. Для учёта турбулентного характера движения ОБ и ВГ используем гипотезу Буссинеска о турбулентной вязкости и применим к уравнениям (1), (3), (4) процедуру осреднения по Рейнольдсу [6]. Для замыкания получившейся системы осреднённых уравнений, совпадающих по форме с исходными уравнениями (1), (3), (4), если под величинами μ и Pr понимать коэффициент турбулентной вязкости и турбулентное число Прандтля соответственно и полагать, что турбулентная вязкость существенно больше динамической, можно использовать одну из разработанных на сегодняшний день RANS-моделей турбулентности.

Система дифференциальных уравнений в частных производных (ДУЧП) (1)–(3), (4), (4a), (6), (6a), дополненная алгебраическим уравнением (5), уравнениями модели турбулентности и соответствующими краевыми условиями, однозначно описывает ТС укрытия ГТУ в рамках принятых допущений и может быть решена методами ВАГД.

Адаптация математической модели к условиям частной задачи и её верификация по экспериментальным данным. С помощью варианта описанной выше ММ решена задача о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух однокомпонентных сред переменной плотности (ОБ и ВГ) в проточных частях укрытия и улитки соответственно, отделённых друг от друга и ОС непроницаемыми стенками, с учётом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки. Введение дополнительного допущения о близости теплофизических свойств ОБ

Адаптация математической модели к условиям частной задачи и её верификация по экспериментальным данным. С помощью варианта описанной выше ММ решена задача о вязком квазистационарном трёхмерном турбулентном течении двух однокомпонентных сред переменной плотности (ОБ и ВГ) в проточных частях укрытия и улитки соответственно, отделённых друг от друга и ОС непроницаемыми стенками, с учётом смешанного конвективного теплообмена, лучистого теплообмена и теплопроводности через стенки. Введение дополнительного допущения о близости теплофизических свойств ОБ

и ВГ позволило исключить из анализа явление их смешения, и соответственно – уравнение (2) из ММ. Учёт того обстоятельства, что массовая доля трёхатомных газов (CO_2 и H_2O) в ВГ меньше массовой доли двухатомных газов (N_2 и O_2) на порядок величины, позволил принять дополнительное допущение о диатермичности не только воздуха, но и ВГ, и соответственно повсеместно использовать уравнение (6а). Для замыкания системы уравнений (1), (3), (4), (4а), (5) и (6а) использована модель турбулентности Ландера–Сполдинга [8], учитывающая силы плавучести. Исходя из дополнительного допущения об относительной малости толщин стенок, твердотельная теплопроводность в них полагалась одномерной, что позволило упростить уравнение (4а).

Численное решение задачи отыскивалось в трёхмерной области пространства, охватывавшей проточные части укрытия и улитки, которая покрывалась гибридной расчётной сеткой, включавшей несколько миллионов ячеек. На входах в проточные части укрытия и улитки задавались направление течения, параметры турбулентности, массовые расходы и температуры ОВ и ВГ, на выходах – статическое давление. На омываемых поверхностях ТТ задавалось условие «прилипания» с использованием эмпирических пристеночных функций в модели турбулентности. На наружной поверхности корпуса двигателя задавалось кусочно-постоянное распределение температуры. На наружных поверхностях ОКУ задавались температура ОС и коэффициент теплоотдачи. Для стенок задавались их толщина, степень черноты поверхности и коэффициент теплопроводности материала. Интегрирование ДУЧП осуществлялось методом контрольного объёма [9]. Уравнение переноса излучения решалось методом дискретных ординат [7]. Относительный подогрев наружных поверхностей стенок определялся как отношение фактического подогрева к максимальному.

Результаты численного моделирования (рис. 2) показали качественное соответствие данным натурных испытаний, в частности, как в расчёте, так и в эксперименте передняя стенка улитки и наружные поверхности ОКУ в районе турбины имеют максимальные температуры, а правая стенка укрытия нагрета сильнее, чем левая.

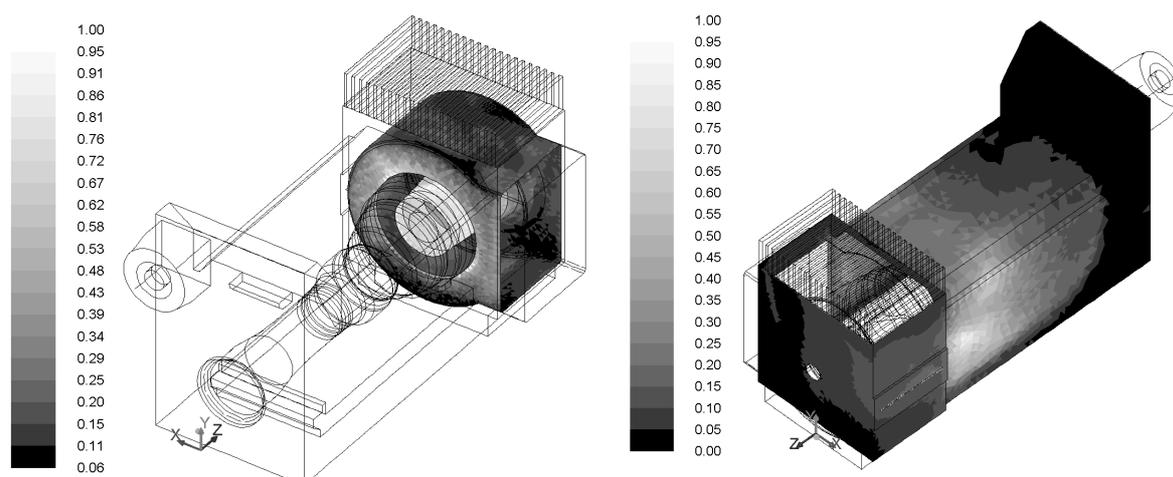


Рисунок 2 – Относительный подогрев наружных поверхностей улитки (слева) и ОКУ (справа)

Выводы. Сформулирована общая постановка задачи о ТС укрытия ГТУ и разработана соответствующая ММ, позволяющая анализировать структуру течения ОВ внутри укрытия и температуру в каждой точке расчётной области, включая наружные и внутренние стенки укрытия, при различных режимах эксплуатации ГТУ. Выполнен численный расчёт ТС укрытия ГТУ с использованием варианта ММ, адаптированного к частной задаче. Результаты численного моделирования показали качественное соответствие данным натурных испытаний.

Направления дальнейших исследований авторы видят в анализе чувствительности ММ к степени черноты поверхностей ТТ и к граничным условиям, характеризующим режимы работы ГТУ и вентиляторов с целью последующей идентификации.

Литература

1. Шляпин Я.К. Математическое моделирование тепловых режимов отсеков ГПА [Текст] / Я.К. Шляпин // Газовая промышленность. – 2008. – № 2. – С. 16–19.

2. Клочков А.В. Обеспечение взрывозащиты газотурбинного оборудования [Текст] / А.В. Клочков, Е.С. Корнилова, А.А. Снитко // Газотурбинные технологии. – 2005. – № 8. – С. 20–22.
3. 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 // Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
4. 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.
5. Трусов П.В. Численное моделирование теплового состояния шумотеплозащитного кожуха газотурбинной установки [Текст] / П.В. Трусов, Д.А. Чарнцев // Вестник СамГУ – Естественнонаучная серия. – 2010. – № 4 (78). – С. 117–126.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа [Текст] / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
7. Суржииков С.Т. Тепловое излучение газов и плазмы [Текст] / С.Т. Суржииков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 544 с.
8. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] / B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
9. Лоханский Я.К. Основы вычислительной гидромеханики и тепломассообмена [Текст] / Я.К. Лоханский. – М.: МГИУ, 2008. – 80 с.

Bibliography (transliterated)

1. Shljapin Ja.K. Matematicheskoe modelirovanie teplovyh rezhimov otsekov GPA [Tekst] Ja.K. Shljapin Gazovaja promyshlennost'. – 2008. – # 2. – p. 16–19.
2. Klochkov A.V. Obespechenie vzryvozashhity gazoturbinnogo oborudovaniya [Tekst] A.V. Klochkov, E.S. Kornilova, A.A. Snitko Gazoturbinnye tehnologii. – 2005. – # 8. – p. 20–22.
3. 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 Proceedings of ASME TurboExpo 2005. Reno, Nevada, USA. June 6-9, 2005. GT2005-68053. – 9 pp.
4. Mesropjan A.V. Chislennoe modelirovanie gazodinamiki i teplomassopere-nosa v sisteme ohlazhde-niya boksa GTD [Tekst] A.V. Mesropjan, I.I. Muhamedzjanova Vestnik UGATU. – 2010. – T. 14, # 1. – p. 25–31.
5. Trusov P.V. Chislennoe modelirovanie teplovogo sostojanija shumoteplozashhitnogo kozhuha gazoturbinnoy ustanovki [Tekst] P.V. Trusov, D.A. Charncev Vestnik SamGU – Estestvennonauchnaja serija. – 2010. – # 4 (78). – p. 117–126.
6. Lojczanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza [Tekst] L.G. Lojczanskij. – M.: Nauka, 1987. – 840 p.
7. Surzhikov S.T. Teplovoe izluchenie gazov i plazmy [Tekst] S.T. Surzhikov. – M.: Izd-vo MG TU im. N.E. Bauman, 2004. – 544 p.
8. Launder B.E. Lectures in Mathematical Models of Turbulence [Text] B.E. Launder, D.B. Spalding. – London: Academic Press, 1972. – 169 p.
9. Lohanskij Ja.K. Osnovy vychislitel'noj gidromehaniki i teplomassoobmena [Tekst] Ja.K. Lohanskij. – M.: MGIU, 2008. – 80 p.

УДК [517:536]:621.452

Костюк В.Є., Кирилаш О.І., Кравчук О.Л.

**УЗАГАЛЬНЕНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТЕПЛООВОГО СТАНУ УКРИТТЯ
ГАЗОТУРБІННИХ УСТАНОВОК**

Розроблено загальну постановку задачі про тепловий стан укриття ГТУ і відповідну їй узагальнену математичну модель. Виконано числовий розрахунок теплового стану укриття з використанням математичної моделі, адаптованої до частинної задачі, результати якого якісно відповідають експериментальним даним.

Kostyuk V.Ye., Kirilash Ye.I., Kravchuk A.L.

GENERIC MATHEMATICAL MODEL OF GAS-TURBINE ENCLOSURE HEAT STATE

General statement of the problem of the gas-turbine enclosure heat state and appropriate generic mathematical model are developed. Enclosure heat state numerical calculation is performed using mathematical model adapted to the particular problem. Numerical calculation results qualitatively correspond to the experimental data.