

УДК 621.438

МОДЕЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛА В ДВУХФАЗНОЙ ВЫСОКОТЕПЛОПРОВОДНОЙ СРЕДЕ

© 2013 В. Г. Попов, А. В. Викулин, Н. Л. Ярославцев

МАТИ – Российский государственный технологический университет
имени К.Э. Циолковского, г. Москва

Поступила в редакцию 26.09.2013

Авторы исследовали проблемы проектирования охлаждаемых конструкций летательных аппаратов. Определены граничные условия теплообмена на охлаждаемых поверхностях деталей. Проведен анализ формирования твердой фазы при калориметрировании теплонапряженных конструкций в жидкометаллическом термостате и получены аналитические зависимости.

Ключевые слова: граничные условия теплообмена, метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате, тепловой поток, формирование твердой фазы.

Одной из проблем теплового проектирования охлаждаемых конструкций летательных аппаратов является определение граничных условий теплообмена на охлаждаемых поверхностях деталей. При этом во многих случаях течение среды в системе охлаждения может быть представлено канальной моделью, в которой диаметр цилиндрического канала многократно меньше протяженности канала. Пренебрегая малым термическим сопротивлением оболочки конструкции, в тепловой модели с достаточной точностью можно не учитывать взаимное влияние охлаждающих каналов (или ветвей гидравлической схемы конструкции). Указанные доводы позволяют оценить точность экспериментальных исследований теплоотдачи с использованием калориметрирования детали в высокотеплопроводной среде [1]. Соседние каналы в такой модели можно рассматривать как линейные отрицательные источники тепла, разделенные низко теплопроводной стенкой конструкции. При таких условиях основным расчетным уравнением служит уравнение баланса тепла на границе раздела фаз высокотеплопроводной среды и стенки конструкции

$$W = \pi R^2 l \rho_m L_{кр} = c_p \Delta T_B G_B \tau, \quad (1)$$

Попов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор, декан факультета №2 «Аэрокосмические конструкции и технологии», заведующий кафедрой «Двигатели летательных аппаратов и теплотехника».

E-mail: vgorpov@list.ru

Викулин Александр Викторович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов и теплотехника». *E-mail: vav106@yandex.ru*

Ярославцев Николай Львович, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Двигатели летательных аппаратов и теплотехника». *E-mail: dekanat_2@mail.ru*

где $W, Вт$ – мощность источника тепла; $R, м$ – радиус образовавшейся при охлаждении твердой фазы калориметрической среды; $l, м$ – длина канала охлаждения; ρ_m и $L_{кр}$ – плотность твердой фазы и скрытая теплота кристаллизации калориметрической среды; $J = c_p \Delta T_B G_B \tau$ – энтальпия охлаждающей среды (c_p – удельная теплоемкость, ΔT_B – подогрев, $G_B, кг/с$ – расход охладителя и $\tau, с$ – время охлаждения конструкции).

При испытаниях можно выделить три этапа формирования твердой фазы из калориметрической среды. Первый этап – от начала поступления охладителя в каналы системы охлаждения до момента наступления контакта профилей твердой фазы; второй – с момента наступления контакта профилей до образования плоского профиля; третий – до полного слияния соседних профилей, то есть потере распознавания соседних каналов охлаждения. На втором и третьем этапах испытаний из-за взаимодействия соседних источников тепла образуется переохлажденная область твердой фазы, которая приведет к искажению её профиля, которое выражается дополнительным образованием твердой фазы на внешней поверхности её профиля в области между основными каналами системы охлаждения. При этом масса искажающей твердой фазы определяется выражением

$$M_u = 0,5R^2 \rho_m (a - \sin \alpha) l, \quad (2)$$

где a – количество тепла, искажающее локальную картину поля тепловых потоков, в конструкции определится из выражения

$$Q = L_{кр} M_u = 0,5R^2 \rho_m L_{кр} (a - \sin \alpha), \quad (3)$$

где $\alpha, рад$ – центральный угол сегмента перекрытия профиля твердой фазы.

Анализ результатов испытаний охлаждаемой

конструкции с учетом полученных выражений (1...3) позволяет оценить адекватность измеренных и фактически действующих тепловых потоков, повышая точность их определения [1].

В соответствии с этим методом [1] специально подготовленный объект исследования погружается в ванну с расплавленным высокотеплопроводным чистым металлом и при температуре кристаллизации последнего продувается изнутри воздухом. На поверхности испытуемого объекта при этом образуется твердая фаза термостабилизирующего металла (металлограмма), толщина которой эквивалентна количеству отведенного с поверхности объекта тепла, и определяет интенсивность внутренней теплоотдачи к воздуху.

Данный способ используется как для определения средне интегральных, так и локальных характеристик теплообмена в оболочковых конструкциях.

Однако, в последнем случае достоверность полученных результатов во многом определяется временем продувки объекта охлаждающим воздухом. Если это время слишком мало, то процессы теплоотдачи носят явно выраженный нестационарный характер и полученная металлограмма не может быть расшифрована с помощью зависимостей справедливых для стационарного процесса.

При чрезмерно большом времени продувки стационарность явления не вызывает сомнения, но из-за тепловых растоков по корке металла, вызванных тепловым взаимодействием локальных источников тепла, которыми могут быть, например, ребра, формирующие тракт охлаждения, профиль металлограммы сглаживается и в пределе становится сферическим. Это значительно затрудняет, а в ряде случаев делает совсем невозможным определение локальных тепловых характеристик указанным способом.

Целью данной работы являлось создание простейшей математической модели процесса образования металлограммы при калориметрических исследованиях охлаждаемых оболочковых конструкций в жидкометаллическом термостате, которая может быть использована при назначении одного из основных режимных параметров испытания – времени продувки объекта воздухом, а также при расшифровке металлограмм.

При этом задача формулируется следующим образом. Дана гладкая не теплопроводящая бесконечная поверхность, на которой параллельно расположены на расстоянии X друг от друга два бесконечно протяженных отрицательных источника тепла одинаковой мощности q . Эта поверхность находится в идеальном тепловом контакте с расплавленным металлом термостата, находящимся при температуре кристаллизации.

Необходимо найти математические выражения, описывающие профиль металлограммы на различных этапах действия таких источников тепла. Схемы для решения поставленной задачи приведены на рис. 1.

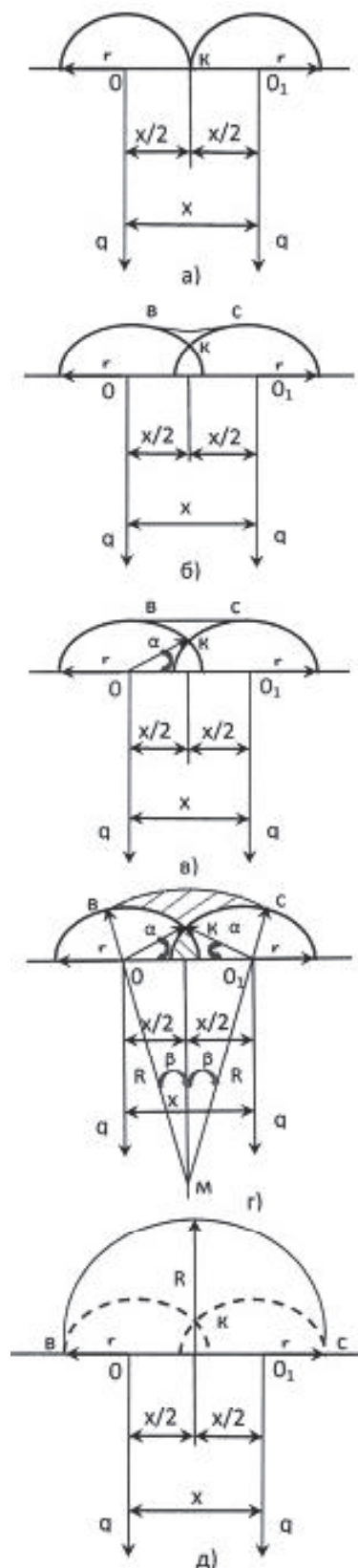


Рис.1. Схема изменения профиля металлограммы при взаимодействии источников тепла

До определенного времени источники тепла не взаимодействуют, друг с другом, поэтому на поверхности стенки, контактирующей с расплавленным термостатирующего металла, будет нарастать твердая фаза металла, профиль которой соответствует двум прямым круговым цилиндрическим поверхностям переменного радиуса r . Величина r зависит от времени τ действия источников. При увеличении τ цилиндрические поверхности корки сближаются и в некоторый момент времени $\tau_{кр1}$ смыкаются на исследуемой стенке (рис. 1, а). С этого времени начинается взаимное влияние источников тепла друг на друга, так как переток тепла по твердой фазе приводит к искажению фронта кристаллизации и на металлограмме появляется область “ θ - c ” (рис. 1, б).

В последующие моменты времени профиль нарастающей корки искажается и приходит к виду, показанному на рис. 1, в, соответствующий этому момент времени $\tau_{кр2}$. Начиная с этого момента времени на профиле корки нет явно выраженных максимумов её толщины, которые определяли ранее местоположение источников тепла на поверхности стенки. Однако, в этот момент времени ещё можно точно идентифицировать положение источников тепла, которое будет соответствовать линиям сопряжения (“ θ ” и “ c ”) цилиндрической и плоской поверхностей профиля твердой фазы. При дальнейшем увеличении времени действия источников плоская поверхность (“ θ - c ”) профиля металлограммы становится криволинейной (рис. 1, г).

Точки сопряжения (“ θ ” и “ c ”) её с круговой цилиндрической поверхностью профиля всё менее соответствуют местоположению источников тепла на поверхности стенки. В момент времени $\tau_{кр3}$ точки “ θ ” и “ c ” достигают поверхности стенки. При этом профиль корки представляет собой прямой круговой цилиндр радиуса R (рис. 1, д), что эквивалентно действию источника тепла удвоенной мощности помещенного на расстоянии $0,5X$ между рассмотренными источниками тепла, т.е., начиная с $\tau_{кр3}$, данным методом нельзя определить на расстоянии X действует один или два источника тепла.

Для определения профиля металлограммы, соответствующего различным моментам времени можно использовать принцип суперпозиции. При этом для построения профиля использовались круговые цилиндрические профили металлограмм независимых источников, а окончательный профиль находился из условия равенства совмещенной площади S_2 и площади S_1 корректирующей профиль металлограмм невзаимодействующих источников.

В результате аналитического анализа получены следующие выражения. Для момента вре-

мени начало взаимодействия источников тепла (рис. 1, а):

$$r_{кр1} = 0,5x. \quad (4)$$

Для момента времени $\tau_{кр2}$, как следует из рис. 1, в:

$$S_1 = \frac{xr}{2} - \frac{x^2 \operatorname{tg} \alpha}{8} - \pi r^2 \frac{90 - \alpha}{360},$$

$$S_2 = \frac{\pi r^2 \alpha}{360} - \frac{x^2 \operatorname{tg} \alpha}{8}.$$

Из условия $S_1 = S_2$ следует, что $r_{кр2} = \frac{2x}{\pi}$.

При $\tau > \tau_{кр2}$ (рис. 1, г):

$$S_1 = \pi R^2 \frac{2\beta}{360} - 2\pi r^2 \frac{90 - \alpha + \beta}{360} - \frac{x^2 \operatorname{tg} \alpha}{4} - \frac{x}{2} (R - r) \cos \beta,$$

$$S_2 = \frac{\pi r^2 \alpha}{180} - \frac{x^2 \operatorname{tg} \alpha}{4}.$$

Приравняем два последних выражения $S_1 = S_2$, т.е.

$$(R^2 - r^2)\beta - \frac{90x}{\pi} (R - r) \cos \beta = 90r^2,$$

где $\beta = \arcsin \frac{x}{2(R - r)}$.

Если $\beta = 90^\circ$; $R = r + 0,5x$; (рис. 1, д), то из условия $S_1 = S_2$ следует, что:

$$r_{кр3} = 0,5(1 + \sqrt{2}), \quad (5)$$

$$0,5\pi r^2 l \rho L = qF\tau,$$

$$r = \sqrt{\frac{2qF\tau}{\pi l \rho L}}, \quad (6)$$

где ρ и L – плотность и удельная теплота кристаллизации термостатирующего металла; l – протяженность источника тепла; F – площадь поверхности стенки, занятая источником тепла; q – мощность источника тепла; τ – время действия источника тепла.

С учетом выражений (4...5), из уравнения (6) получим:

$$\tau_{кр1} = \frac{1}{8} \frac{\pi x^2 l \rho L}{qF}, \quad (7)$$

$$\tau_{кр2} = \frac{1}{4,928} \frac{\pi x^2 l \rho L}{qF}, \quad (8)$$

$$\tau_{кр3} = \frac{1}{1,368} \frac{\pi x^2 l \rho L}{qF}, \quad (9)$$

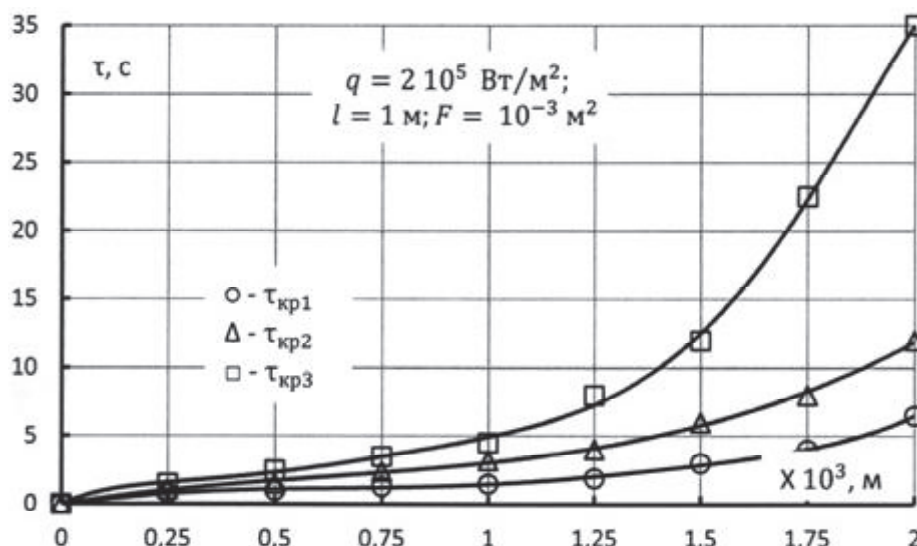


Рис. 2. Динамика разрешающей способности калориметрирования охлаждаемых конструкций

При использовании калориметрического способа в качестве жидкометаллического теплоносителя обычно используется цинк, для которого $\rho = 7100 \text{ кг/м}^3$, $L = 98,3 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$. Если известны также мощность, их протяженность и площадь, то для различных значений расстояний “х” между источниками можно построить с помощью выражений (7...9) зависимость $\tau = f(x)$. Например для $q = 2 \cdot 10^2 \text{ Вт/м}^2$, $l = 1 \text{ м}$, $F = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ такая зависимость имеет вид представленный на рис. 2.

Как видно из рис. 2, взаимодействие источников тепла, находящихся на расстоянии $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, начинается через $\approx 5,5 \text{ с}$; а через $\approx 32 \text{ с}$, такие источники становятся практически не различимы на металлограмме. Поэтому временной интервал испытаний для данных условий не должен превышать $\approx 32 \text{ с}$.

Следует отметить, что в натурном эксперименте кроме рассмотренных факторов на формирование корки оказывают влияние такие явления, как теплопроводность стенки, на которой размещены источники тепла; наволакивание жидкой фазы, возникающее при выемке объекта из термостатирующей среды после окончания продувки. Такие процессы приводят к сокращению указанных временных интервалов испытаний в жидкометаллическом термостате.

Предложенная модель проверена экспериментально и может быть использована в практике планирования калориметрического эксперимента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Викулин А.В., Попов В.Г., Ярославцев Н.Л. Тепловые испытания и доводка охлаждаемых лопаток газовых турбин. Кострома: ООО “КПД”, 2012, 568 с.

THE MODEL OF INTERACTION OF HEAT SOURCES IN THE TWO-PHASE HIGHLY-HEAT-CONDUCTING ENVIRONMENT

© 2013. V. G. Popov, A. V. Vikulin, N. L. Yaroslavtsev

MATI - Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky

The authors investigated the problems of designing of cooled aircraft constructions. Boundary conditions of heat exchange on the cooled surfaces of details are defined. The analysis of formation of the solid phase at the calorimetry of heat-stressed constructions in the liquid-metal thermostat is carried out and analytical dependences are received.

Keywords: boundary conditions of heat exchange, the method of calorimetry in liquid-metal thermostat, heat flow, formation of the solid phase.

Vladimir Popov, Doctor of Technics, Professor, Dean of the faculty №2 «Aerospace designs and technologies», Head at the Aircraft Engines and Heat Engineering Department.

E-mail: vgpovov@list.ru

Alexander Vikulin, Candidate of Technics, Associate Professor, Professor at the Aircraft Engines and Heat Engineering Department. E-mail: vav106@yandex.ru

Nikolay Yaroslavtsev, Candidate of Technics, Associate Professor, Professor at the Aircraft Engines and Heat Engineering Department. E-mail: dekanat_2@mail.ru