

УДК 550.360

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОГРАНИЧЕННЫХ ОБЛАСТЯХ ТЕПЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО ТЕЛА

Мартынов А.А.

ФГБОУ ВПО Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия (603950, Н. Новгород, ул. Ильинская, 65), e-mail: ooaxis@yandex.ru

При анализе процесса теплообмена конструкция пола и грунты оснований рассматриваются как полуограниченное тело, в котором формируется двух- или трехмерное температурное поле. Однако на начальном этапе развития температурного поля интенсивность теплообмена на поверхности происходит по закономерностям, близким к одномерным процессам, поэтому в ряде случаев целесообразно интенсивность теплообмена на поверхности пола определять по формулам для одномерного температурного поля. В связи с этим ставится задача выявления пределов изменения критерием теплообмена, при которых с некоторой погрешностью допустимо двух- или трехмерную систему заменить одномерной.

Ключевые слова: теплообмен, температурные поля, критерии подобия.

THE HEAT TRANSFER CHARACTERISTICS OF AREAS WITH LIMITED THERMAL EFFECTS ON THE SURFACE SEMI-INFINITE BODY

Martynov A. A.

Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia (603950, N. Novgorod, Ilinsky street, 65), e-mail: ooaxis@yandex.ru

In the analysis of heat transfer design of the floor and foundation soil treated as poluogran-ness of the body, which is formed by a two- or three-dimensional temperature field. However, at the initial stage of development of the temperature field on the surface of the heat exchange takes place on the regularities, of close to one-dimensional process, so in some cases it is advisable to exchange-rate by exchanger on the floor surface determined by the formula for the one-dimensional temperature field. In this connection, the task of identifying the limits of heat transfer changes a criterion at which to some erred-ness acceptable two- or three-dimensional system to replace the one-dimensional.

Keywords: heat transfer, temperature fields, similarity criteria.

Стационарная составляющая определяется как функция перепада между температурой поверхности пола и среднегодовой температурой поверхности грунта за пределами здания, коэффициента теплопроводности грунта, ширины здания, толщины наружной стены здания и координаты рассматриваемой точки на поверхности пола.

Нестационарная составляющая определяется амплитудой годовых колебаний температуры поверхности грунта, значениями теплофизических коэффициентов грунта (теплопроводности и температуропроводности), шириной здания, толщиной наружной стены, координатой рассматриваемой точки на поверхности пола. [2]

Отличительная особенность формирования теплового режима полуограниченного тела при одномерном температурном поле состоит в том, что все тепло, проникающее через области Ω внутрь тела, аккумулируется и расходуется на изменение его теплосодержания и развитие температурного поля. При этом значение теплового потока $q_1(\tau)$ на поверхности при больших значениях критерия Fo стремится к нулю.

В трехмерном температурном поле часть проникающего в тело тепла идет на изменение его теплосодержания и развитие температурного поля, а другая его часть через внешние области Ω передается воздуху окружающей среды. Значения тепловых потоков на поверхности при $Fo \rightarrow \infty$ стремятся к вполне определенной величине. Таким образом, при больших значениях критерия Fo (при состояниях, близких к стационарному) закономерности формирования температурного поля полуограниченного тела качественно отличаются из-за разных граничных условий на поверхности.

Однако благодаря ограниченной скорости различия проявляются постепенно по мере развития температурного поля, поэтому в течение некоторого времени τ , определяемого численным значением критерия Фурье

$$Fo = \frac{(a\tau)}{R^2},$$

где R – характерный размер области Ω , влияние условия теплообмена вне области Ω проявляется слабо и величина теплопоглощения, определенная из одномерной модели теплопередачи, незначительно отличается от теплопоглощения для трехмерной модели.

Для определения численного значения критерия Fo , при котором влияние трехмерности температурного поля на интенсивность теплообмена на поверхности полуограниченного тела незначительно, рассмотрим следующую задачу.

Допустим, дано полуограниченное тело с постоянной начальной температурой по всему объему, равной $t(r, y, 0) = t_b$. Область теплового воздействия источника на поверхности Ω , представляет круг радиусом R , где с момента $\tau > 0$ поддерживается постоянная температур t_c . Поверхность полуограниченного тела вне области Ω омывается воздухом окружающей среды с температурой t_b . Требуется определить среднюю величину теплового потока и количество тепла, проникающего с площади круга вглубь полуограниченного тела. Данная задача является трехмерной или, вследствие осесимметрии, сводимой к двумерной. Тепловой поток в области круга $q(r, \tau)$ будет переменной величиной, зависящей от координат точки поверхности. Среднее значение теплового потока по площади круга в момент времени τ определяется интегралом

$$q_{3cp} = \frac{1}{\pi R^2} \int_0^R q(r, \tau) 2\pi r dr. \quad (1)$$

При переходе к обобщенным переменным относительные величины локального и среднего тепловых потоков запишутся в виде:

$$\Psi_{3q}(\rho, Fo) = \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\substack{\xi=0 \\ 0 < \rho < 1}}; \quad \Psi_{3q_{cp}} = \frac{1}{\pi} \int_0^1 \Psi_{3q}(\rho, Fo) 2\pi \rho d\rho,$$

где $\theta = (t - t_B)/(t_C - t_B)$; $\rho = r/R$; $\xi = y/R$; $Fo = a\tau/R^2$; $Bi = \alpha R/\lambda$.

Взаимосвязь исходных и обобщенных переменных для локального и среднего тепловых потоков выражается формулами:

$$\Psi_{3q}(\rho, Fo) = \frac{R}{\lambda(t_C - t_B)} q_3(r, \tau);$$

$$\Psi_{3q_{cp}}(1, Fo) = \frac{R}{\lambda(t_C - t_B)} q_{3cp}(R, \tau).$$

Аналогичные выражения для количества тепла имеют вид:

$$Q_3(R, \tau) = \int_0^\tau d\tau \int_0^R q_3(r, \tau) 2\pi r dr;$$

$$\Psi_{3Q}(1, Fo) = \int_0^{Fo} dFo \int_0^1 2\pi \rho \Psi_{3q}(\rho, Fo) d\rho;$$

$$\Psi_{3Q}(1, Fo) = \frac{a}{\lambda(t_C - t_B) R^3} Q_3(R, \tau).$$

Взаимосвязь исходных и обобщенных переменных для теплового потока и количество тепла при одномерном температурном поле, когда $R \rightarrow \infty$, условно можно представить в виде:

$$\Psi_{1q}(Fo) = \frac{R}{\lambda(t_C - t_B)} q_1(\tau);$$

$$\Psi_{1Q}(1, Fo) = \frac{a}{\lambda(t_C - t_B) R^3} Q_1(R, \tau);$$

индексы 1 и 3 при q , Q , ψ и Ψ обозначают, что они определяются из одномерной и трехмерной моделей теплопередачи.

Обозначим:

$$P_q = \frac{q_{3cp}(R, \tau)}{q_1(\tau)} = \frac{\Psi_{3q}(1, Fo)}{\Psi_{1q}(Fo)}; \quad (2)$$

$$P_Q = \frac{Q_3(R, \tau)}{Q_1(R, \tau)} = \frac{\Psi_{3Q}(1, Fo)}{\Psi_{1Q}(1, Fo)}. \quad (3)$$

Анализ процесса теплопередачи при одномерном и трехмерном температурных полях показывает, что P_q и P_Q могут быть представлены функциями двух параметров:

$$P_q = \beta_q \beta_{q\alpha}; \quad (4)$$

$$P_Q = \beta_Q \beta_{Q\alpha}. \quad (5)$$

Безразмерные параметры β_q и β_Q отражают изменение величин потока и количества тепла на поверхности полуограниченного поля по сравнению с одномерным вследствие различной степени аккумуляции тепла

$$\beta_q = f_1(Fo); \quad \beta_Q = f_2(Fo). \quad (6)$$

Безразмерные параметры $\beta_{q\alpha}$ и $\beta_{Q\alpha}$ отражают изменение величин потока и количество тепла вследствие теплообмена полуограниченного тела с воздухом окружающей среды при трехмерном температурном поле:

$$\beta_{q\alpha} = f_3(Fo, Bi); \quad \beta_{Q\alpha} = f_4(Fo, Bi). \quad (7)$$

Определение параметров β_q , β_Q , $\beta_{q\alpha}$ и $\beta_{Q\alpha}$ в зависимости от критериев Fo и Bi производится на основе сравнения среднего значения теплового потока и количества тепла, проникающих с области круга радиусом R внутрь полуограниченного тела при трехмерных и одномерных температурных полях.

В качестве математической модели одномерной задачи рассматривается полуограниченный цилиндр с площадью основания $F = \pi R^2$ и теплоизолированной боковой поверхностью.

Выражение для теплового потока на поверхности $y = 0$ при одномерной задаче имеет вид:

$$q_1(\tau) = \frac{[(t_c - t_b)\lambda]}{\sqrt{\pi a \tau}}, \quad (8)$$

количество тепла, прошедшего с поверхности $y = 0$ в глубь полуограниченного цилиндра,

$$Q_1(R, \tau) = \frac{[2\lambda(t_c - t_b)\pi R^2 \sqrt{\tau}]}{\sqrt{\pi a}}. \quad (9)$$

Математическая постановка сформулированной выше задачи в обобщенных переменных имеет вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \theta}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2}; \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta(\rho, 0, Fo) &= 1 \quad \text{при } 0 < \rho < 1; \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \Big|_{\xi=0} &= Bi \theta \Big|_{\xi=0} \quad \text{при } 0 < \rho < \infty; \\ \frac{\partial \theta}{\partial \xi} = \frac{\partial \theta}{\partial \rho} &= 0 \quad \text{при } \xi \rightarrow \infty; \rho \rightarrow \infty. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Решение задачи (9) – (11) было получено на ЭВМ численным методом [1].

Относительное количество поглощенного с площади круга тепла определено как функция критериев

$$\Psi_{3Q} = f_1 (Fo, Bi), \quad (12)$$

а относительная средняя величина теплового потока

$$\Psi_{3q_{cp}} = f_2 (Fo, Bi). \quad (13)$$

В результате анализа и обобщения результатов численных решений трехмерной задачи на ЭВМ и аналитического определения $q_1 (0, \tau)$ и $Q_1 (0, \tau)$ одномерной задачи по формулам (8) и (9) были построены зависимости $\beta_q, \beta_{q_a}, \beta_Q$ и β_{Q_a} от критериев Fo и Bi [1].

Полученные результаты устанавливают соотношения выражений средней величины теплового потока и количества тепла, поглощенного полуограниченным телом при трехмерной и одномерной моделях теплопередачи. На основании этих результатов можно сделать следующие выводы:

- при малых значениях критерия Фурье $Fo < 0,03$ влияние трехмерности температурного поля на величины $q_{3cp} (0, \tau)$ и $Q_3 (R, \tau)$ по сравнению с одномерным полем не превышает 10 %, поэтому при кратковременных тепловых воздействиях на поверхности пола в ограниченной области допустимо воспользоваться моделью одномерного процесса теплопередачи;
- существенные отклонения значений $q_{3cp} (R, \tau)$ и $Q_3 (R, \tau)$ по сравнению со значениями $q_1 (\tau)$ и $Q_1 (R, \tau)$ обусловлены закономерностью аккумуляции тепла в полуограниченном теле, которая практически слабо зависит от условий теплообмена с воздухом окружающей среды;
- при малых значениях критерия $Bi < 3$, даже для больших значений Fo , теплоотдача полуограниченного тела в окружающую среду не превышает 10% количества поглощенного телом тепла, однако при $Bi > 7,5$ это влияние становится существенным.

$$1 - Bi = 15; 2 - Bi = 7,5; 3 - Bi = 3; 4 - Bi = 1,5; 5 - Bi = 0,375$$

Полученные результаты позволили установить значения поправочных коэффициентов, с учетом которых можно использовать одномерную модель теплопередачи при расчете теплопоглощения пола от тепловых воздействий на его поверхности [1].

Список литературы:

1. Гиндоян, А.Г. Тепловой режим конструкций полов / А.Г. Гиндоян. – М.: Стройиздат, 1984. – 222с., ил. (Экономия топлива и электроэнергии).

2. Кочев А.Г., Москаева А.С., Кочева Е.А., Мартынов А.А. Исследование задач теплоустойчивости ограждающих конструкций православных храмов печ. //Современные наукоёмкие технологии. 2015. – №8. – С. 36-40.