

© Б.Г. АКСЕНОВ, С.В. КАРЯКИНА

aksenov@tgasu.ru, karyakinaswetlan@mail.ru

УДК 536.12

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛООБМЕНА В КОНСТРУКЦИЯХ ИЗ МНОГОСЛОЙНЫХ КАРКАСНЫХ ПАНЕЛЕЙ

АННОТАЦИЯ. В работе представлена математическая модель нестационарного теплообмена в конструкциях из многослойных каркасных панелей. Модель позволяет рассчитать теплопотери. Учитывается инфильтрация воздуха через стыки между панелями.

SUMMARY. Mathematical model of nonstationary heat exchange in multilayer skeleton panels constructions is presented. Heat losses through the constructions may be calculated. Inleakage of air through joints between the panels is taken into account.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Многослойные каркасные панели, нестационарный теплообмен, инфильтрация воздуха, теплопотери.

KEYWORDS. Multilayer skeleton panels, nonstationary heat exchange, inleakage of air, heat losses.

При обустройстве месторождений углеводородов применяются сборные промышленные сооружения. В них используются многослойные ограждающие конструкции, состоящие из эффективных утеплителей и листовых материалов. Теплообмен в таких конструкциях характеризуется наличием локальных «мостов холода», в зоне которых тепловые потоки существенно отличаются от среднего теплового потока через ограждение в целом. Поэтому соответствующее тепловое поле следует рассматривать как трехмерное, что усложняет его моделирование.

В работе [1] предлагается модель теплообмена в панелях с алюминиевым каркасом при следующих допущениях: стационарность процесса, постоянство теплофизических характеристик материалов, независимость процесса теплообмена от явлений массопереноса. Модель представляет собой систему уравнений, описывающих теплообмен на внутренней, наружной поверхностях обшивки и через стыковые соединения. Теплообмен внутри теплоизолятора учитывается в функциях источника уравнений для поверхностей обшивки. Это позволяет перейти от трехмерного уравнения к двум двумерным.

Рассматриваемые сооружения эксплуатируются в сложных климатических условиях, характеризующихся большими суточными колебаниями температуры, сильными ветрами. Поэтому для точных теплофизических расчетов конструкций стационарная модель является недостаточной. За время, необходимое для установления стационарного режима, может измениться как температура наружного воздуха, так и тепловой баланс внутри помещения.

Работа [2] посвящена разработке нестационарной модели. В работе [3] модель доработана с учетом инфильтрации воздуха.

В данной работе приводится методика расчета теплотерь.

Полученная математическая модель нестационарной теплопроводности через каркасные алюминиевые панели представляет следующую систему уравнений.

Температурное поле внутренней обшивки описывается уравнением:

$$\begin{aligned} & \lambda_a \left(\frac{\partial^2 t_1(\tau, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_1(\tau, x, y)}{\partial y^2} \right) + \\ & + \frac{\lambda_{из}}{\delta} \frac{\partial t_{из}(\tau, x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=\delta} - \\ & - \frac{\alpha_1}{\delta} (t_{\infty}(\tau) - t_1(\tau, x, y)) = c_a \frac{\partial t_1(\tau, x, y)}{\partial \tau}, \\ & -a < x < a, -b < y < b. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнение для определения температуры внешней обшивки:

$$\begin{aligned} & \lambda_a \left(\frac{\partial^2 t_2(\tau, x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t_2(\tau, x, y)}{\partial y^2} \right) - \\ & - \frac{\lambda_{из}}{\delta} \frac{\partial t_{из}(\tau, x, y, z)}{\partial z} \Big|_{z=d-\delta} + \\ & + \frac{\alpha_2}{\delta} (t_{\infty}(\tau) - t_2(\tau, x, y)) = c_a \frac{\partial t_2(\tau, x, y)}{\partial \tau}, \\ & -a < x < a, -b < y < b. \end{aligned} \quad (2)$$

Для слоя изоляции:

$$\begin{aligned} & \frac{\lambda_{из}}{c_{из}} \frac{\partial^2 t_{из}(\tau, x, y, z)}{\partial z^2} = \frac{\partial t_{из}(\tau, x, y, z)}{\partial \tau}, \\ & -a < x < a, -b < y < b, \delta \leq z \leq d - \delta. \end{aligned} \quad (3)$$

Инфильтрация воздуха учитывается в граничных условиях:

$$\begin{aligned} & x = +a: \\ & - \frac{\partial t_1(\tau, x, y)}{\partial x} = \frac{\partial t_2(\tau, x, y)}{\partial x} = \\ & \frac{(t_1(\tau, x, y) - t_2(\tau, x, y))}{l_1} + \frac{M_p(t_{\infty}(\tau) - t_{x_6}(\tau, x, y))}{\delta \lambda_a}. \end{aligned} \quad (4)$$

Начальные условия:

$$\begin{aligned} & t_1(0, x, y) = t_6(0), \\ & t_2(0, x, y) = t_n(0), \\ & t_{из}(0, x, y, z) = t_6(0) - z \cdot \frac{t_6(0) - t_n(0)}{d}, \\ & -a \leq x \leq a, -b \leq y \leq b, \delta \leq z \leq d - \delta. \end{aligned} \quad (5)$$

В постановке задачи начало координат в центре внутренней обшивки, оси X , Y в плоскости панели, ось Z перпендикулярна ей; τ — время; $2a$ — длина панели; $2b$ — высота панели; d — толщина панели, δ — толщина обшивки; t_p, t_2, t_{us} — температура на внутренней, внешней обшивке и в изоляции; t_s, t_n — средняя температура воздуха внутри и вне помещения; l_1 — параметр размерности длины, характеризующий теплопроводные включения, λ_a, λ_{us} — теплопроводность материала обшивки и изоляции соответственно; α_1, α_2 — коэффициенты тепловлагообмена на внутренней и внешней обшивке; c_{us} — теплоемкость единицы объема материала изоляции; M — удельный, отнесенный к единице длины вдоль оси Y секунднй расход инфильтрующегося воздуха; $t_{x\delta}$ — температура холодного воздуха, поступающего в помещение через стык; C_p — удельная теплоемкость воздуха.

Левая часть граничных условий характеризует тепловой поток за счет теплопроводности обшивки, правая учитывает разность температур наружной и внутренней части стыка и инфильтрацию воздуха. Граничные условия при $x = \pm a, y = \pm b$ ставятся аналогично.

Сложность расчета при таких граничных условиях связана с уточнением расхода M инфильтрующегося воздуха и температуры $t_{x\delta}$. Для их определения целесообразно использование методики, предложенной в работе [1].

Полученная краевая задача нестационарной теплопроводности решается численно методом сеток с использованием неявного метода переменных направлений по формулам прогонки [4].

Построенные поля температур $t_1(\tau, x, y), t_2(\tau, x, y)$ позволяют рассчитать потери тепловой энергии в произвольный момент времени τ . Теплотери через стыковые соединения вычисляются с учетом (4) по формуле:

$$Q(\tau)|_{x=a} = -\lambda_a \cdot \delta \cdot \int_{-b}^b \frac{t_2(\tau, a, y) - t_1(\tau, a, y)}{l_1} + \frac{MC_p(t(\tau) - t_{x\delta}(\tau, a, y))}{\delta \lambda_a} dy, \quad (6)$$

аналогично в сечениях $x = -a, y = b, y = -b$.

Теплотери через стенку панели без учета стыков:

$$Q_p(\tau) = \int_{-(a-\delta)}^{a-\delta} dx \int_{-(b-\delta)}^{b-\delta} \alpha_1 (t_{x\delta}(\tau) - t_1(\tau, x, y)) dy. \quad (7)$$

В результате определения теплового потока $Q(\tau)$ через легкие ограждения получаем приведенное термическое сопротивление R_{np} , которое учитывает влияние теплопроводных включений и инфильтрации воздуха

$$R_{np} = \frac{4ab(t_{x\delta}(\tau) - t(\tau))}{Q_p(\tau) + Q_s(\tau)}, \quad (8)$$

где $Q_s(\tau) = Q(\tau)|_{x=a} + Q(\tau)|_{x=-a} + Q(\tau)|_{x=b} + Q(\tau)|_{x=-b}$.

Расчет, выполненный при исходных данных:

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 0,1 \text{ м}; \quad t_s = +20^\circ \text{ C}; \quad t_n = -46^\circ \text{ C}; \quad \alpha_1 = 8,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}};$$

$$\alpha_2 = 23,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \quad \delta = 0,001 \text{ м}; \quad \lambda_a = 175 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}; \quad \lambda_{из} = 0,052 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$$\lambda_{из} = 0,0237 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad C_p = 10^3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

скорость ветра 5,6 м/с;

плотность наружного воздуха 1,56 кг/м³;

плотность внутреннего воздуха 1,2 кг/м³;

диаметр щелевых каналов в вертикальных стыках 0,696·10⁻³ м;

диаметр щелевых каналов в вертикальных стыках 0,492·10⁻³ м

показал, что температура панели при инфильтрации практически перестает изменяться через 17 ч, при $\tau > 17$ ч стабилизируется тепловой поток через панель.

В результате расчетов установлено, что около 76% теплопотерь приходится на стыковые соединения, причем 45% тепловой энергии теряется за счет теплопроводных включений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ремизов В.В., Шаповал А.Ф., Моисеев Б.В., Аксенов Б.Г. Особенности строительства объектов в нефтедобывающих районах Западной Сибири. М.: Недра, 1996. 382 с.
2. Аксенов Б.Г., Карякина С.В. Динамика потерь тепловой энергии через легкие ограждающие конструкции // Изв. РАН Энергетика. 2000. №4. С. 153-159.
3. Аксенов Б.Г., Семячкин Б.Е., Карякина С.В. Теплофизическое обоснование выбора вариантов конструкций легких ограждений // Изв. вузов. Нефть и газ. 2001. №3. С. 185-189.
4. Аксенов Б.Г., Карякина С.В. Численное решение задачи нестационарного теплообмена в многослойных ограждающих панелях // Математическое и информационное моделирование: сб. науч. трудов. Вып. 4. Тюмень: ТюмГУ, 2002. С. 102-110.