

Аруова Л.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА БЕТОН В УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ  
(НА ПРИМЕРЕ БЕТОННОЙ ПЛИТЫ)**

Применение солнечной энергии для прогрева бетона, как и при любом другом методе термообработки, требует определения тех или иных технологических или теплофизических характеристик. Последние можно определять экспериментально или расчетным путем. Экспериментальные исследования позволяют получать требуемые данные для конкретных условий, конкретной конструкции и конкретного материала. При большом количестве экспериментальных данных можно сделать определенные обобщения. Расчетный метод также имеет дело с определенной конструкцией и заданными конкретными данными. При расчетах можно варьировать разными характеристиками: среды, материала, технологического прогресса, размером конструкций и получать необходимые данные. К сожалению, в конкретных условиях не всегда известны все необходимые данные и в заключении полученный результат касается только одного конкретного случая. В производственных условиях этого часто бывает достаточно.

Расчетный путь весьма трудоемок, требует высокой квалификации инженера и к сожалению, на производстве применяется крайне редко. Однако постепенно расчетный метод будет применяться по мере внедрения компьютерного моделирования в заводское производство.

Ниже приведен пример численного моделирования теплового воздействия на бетонную плиту.

В результате получены данные, характеризующие температурное поле в рассчитанной плите. Эта плита была исследована экспериментально и как видно из приведенного графика на рис. 2 совпадение расчетных и экспериментальных данных весьма близкое. На наших предприятиях сборного железобетона пока таких программ не разработано, но мы будем в этом направлении работать.

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ПЛИТНЫЕ БЕТОННЫЕ ИЗДЕЛИЯ В УСЛОВИЯХ СОЛНЕЧНОЙ РАДИАЦИИ**

Для решения комплекса технологических вопросов по тепловой обработке бетона с использованием солнечной энергии возникает необходимость моделирования температурного поля и кинетики нарастания прочности в бетонном массиве, заключенном в металлическую форму, при комбинированном конвективном и радиационном тепловом воздействии на его поверхность. Рассмотрим методику численного моделирования этой задачи для двухмерного случая.

Температурное поле в бетонной плите описывается двухмерным нелинейным уравнением теплопроводности с переменными теплофизическими коэффициентами и источниками тепла, учитывающими экзотермическое тепловыделение уложенного бетона

$$C(x, y)\gamma(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x}\left[\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial x}\right] + \frac{\partial}{\partial y}\left[\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial y}\right] + \Pi \frac{\partial Q_3(x, y, t, \tau)}{\partial \tau} \quad (1)$$

Внешнее

тепловое воздействие на бетон задается комбинированными граничными условиями второго и третьего рода (рис. 1).

$$\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial x}\Big|_{x=-R} = \alpha_\epsilon [t(-R, y) - t_{\text{возд}}(\tau)] + q_{\text{вепт}}(\tau); \quad (2)$$

$$\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial x}\Big|_{x=R} = a_\delta [t(R, y) - t_{\text{возд}}(\tau)]; \quad (3)$$

$$\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial y}\Big|_{y=0} = a_H [t(x, 0) - t_H(\tau)]; \quad (4)$$

$$\lambda(x, y)\frac{\partial t(x, y)}{\partial y}\Big|_{y=Y} = a_{\text{ен}}(\tau)[t(x, Y) - t_{\text{возд}}(\tau)] + \xi k_1(\tau)k_2(\tau)k_3(\tau)[k_4(\tau)q_{\text{нр}}(\tau) + q_{\text{диф}}(\tau)]. \quad (5)$$

Начальное значение температуры системы металлическая форма - бетон

$$t(x, y, 0) = t_{\text{нач}}(x, y) = \text{const} \quad (6)$$

Система (1-6) не имеет аналитического решения. Поэтому интегрирование этой системы проводилось методом конечных разностей. При разработке алгоритма расчета температурного поля ЭВМ использован локально-одномерный метод численного решения многомерных уравнений теплопроводности. Для аппроксимации исходных уравнений по двум направлениям, в нашем случае X и Y, были применены неявные двуслойные консервативные схемы на неравномерной сетке.

В условиях применения локально-одномерного метода с шагом  $0,5\lambda$  исходная задача определения температурного поля запишется в виде

$$\frac{1}{2}c(x,y)\gamma(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial x} \right] + \Pi \frac{\partial Q_3(x,y,t,\tau)}{\partial \tau}; \quad -R < x < R; \quad 0 \leq y \leq Y; \quad (7)$$

$$\lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial x} \Big|_{x=-R} = \alpha_\delta [t(-R,y) - t_{\text{возд}}(\tau)] + q_{\text{верм}}(\tau); \quad 0 \leq y \leq Y; \quad (8)$$

$$\lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial x} \Big|_{x=R} = \alpha_\delta [t(R,y) - t_{\text{возд}}(\tau)]; \quad 0 \leq y \leq Y; \quad (9)$$

$$\frac{1}{2}c(x,y)\gamma(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial y} \right] + \Pi \frac{\partial Q_3(x,y,t,\tau)}{\partial \tau}; \quad 0 < y < Y; \quad -R \leq x \leq R; \quad (10)$$

$$\lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial y} \Big|_{y=0} = \alpha_H [t(x,0) - t_H(\tau)]; \quad -R \leq x \leq R; \quad (11)$$

$$\lambda(x,y)\frac{\partial t(x,y)}{\partial y} \Big|_{y=Y} = \alpha_{\text{вн}}(\tau) [t(x,Y) - t_{\text{дпл}}(\tau)] + \quad ; -R \leq x \leq R \quad (12)$$

$$+ \xi k_1(\tau) k_2(\tau) k_3(\tau) [k_4(\tau) q_{\text{нр}}(\tau) + q_{\text{дуф}}(\tau)]$$

$$t(x,y,0) = t_{\text{нач}}(x,y) = \text{const} \quad (13)$$

Исходные уравнения (7-13) аппроксимировали неявными двуслойными консервативными разностными схемами, а затем решали разностные задачи методом прогонки вдоль строк и столбцов. Прочность твердеющего бетона и экзотермические тепловыделения бетона рассчитывались по методике<sup>1</sup>.

Алгоритм решения поставленной задачи, основанный на разностной аппроксимации исходных дифференциальных уравнений, реализован в программе на языке ФОРТРАН-4. Программа отлажена на ЭВМ ЕС-1035. Результаты расчетов выдаются на АЦПУ в виде графиков изменения температур и нарастания прочности в заданных контрольных точках.

Результаты расчета получены при следующих исходных данных:

толщина бетонной плиты  $\delta_{\text{бет}}^y = 0,1 \text{ м}$ ;

ширина плиты  $\delta_{\text{бет}}^x = 0,6 \text{ м}$ ;

коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности плиты  $a_{\text{вн}}(\tau) = 9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности плиты  $a_{\text{н}}(\tau) = 4,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ ;

толщина стенок металлической формы  $\delta_{\text{м}} = 0,01 \text{ м}$ ;

удельная теплоемкость бетона  $C_{\text{бет}} = 0,22 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

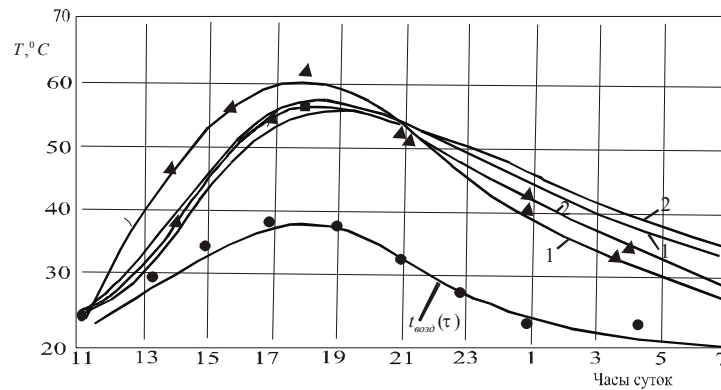
коэффициент теплопроводности бетона  $\lambda_{\text{бет}} = 2,5 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;

плотность бетона  $\lambda_{\text{бет}} = 2400 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Значения потоков солнечной радиации  $q_{\text{верм}}(\tau)$ ,  $q_{\text{нр}}(\tau)$ ,  $q_{\text{дуф}}(\tau)$  приняты по климатологическому справочнику для условий Ташкента.

<sup>1</sup> Разработать и внедрить комплекс программ для выбора оптимальных теплотехнических параметров тепловой обработки бетона при строительстве специальных сооружений: Отсчет/ВНИПИТеплопроект. - М., 1984.

Изменение температуры наружного воздуха  $t_{возд}(\tau)$  приведено на рис.1. Начало заполнения формы  $\tau_n = 11$  ч. Как можно заключить, результаты расчетов с достаточной для практики точностью совпадают с экспериментом. Таким образом, примененный метод численного моделирования температурного поля может быть использован для решения практических задач.



**Рис 1.** Результаты расчета температурного поля в бетонной плите для климатических условий Ташкента: 1-температура бетона на внешней поверхности; 2-температура бетона на контакте с опалубкой (экспериментальные данные); 1 ,2-тоже результаты расчета

**Обозначения:**

$t(x, y)$  - температура, °C;

$\lambda(x, y)$  - Коэффициент теплопроводности бетона, либо металла,

Вт/(м \* °C);

$c(x, y)$  - удельная теплоемкость бетона либо металла, кДж/(кг \* °C);

$\rho(x, y)$  - плотность бетона либо металла, кг/м<sup>3</sup>;

$\rho$  – расход цемента, кг/м<sup>3</sup>;

$Q_3$  – экзотермическое тепловыделение цемента, кДж/кг;

$\alpha_\delta$  - коэффициент теплоотдачи с боковых поверхностей металлической формы, Вт/(м<sup>2</sup> \* °C);

$\alpha_H$  - коэффициент теплоотдачи с внутренней поверхности формы, Вт/( м<sup>2</sup> \* °C);

$\alpha_{вн}(\tau)$  - коэффициент теплоотдачи с внешней поверхности бетона через два слоя пленки, Вт/(м<sup>2</sup> \* °C);

$t_{возд}(\tau)$  - температура воздуха, °C;

$t_H(\tau)$  - температура грунта, °C;

$q_{пр}(\tau)$  - поток солнечной радиации на боковую поверхность плиты, Вт/м<sup>2</sup>;

$q_{диф}(\tau)$  - диффузный поток солнечной радиации, Вт/м<sup>2</sup>;

$t_{нач}$  - начальна температура бетона, °C.