

УДК 662.289:678.063

А. А. Аваев, Ю. Р. Осипов
Вологодский государственный университет

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ В ПРОЦЕССАХ ТЕРМИЧЕСКОЙ ВУЛКАНИЗАЦИИ РЕЗИНОВЫХ ОБКЛАДОВ ПРИ МАЛОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ВУЛКАНИЗУЮЩЕГО АГЕНТА

Обоснована возможность использования аналитических моделей теплообмена в резинометаллических системах при термической вулканизации резин с низким содержанием вулканизирующего агента. Представлены аналитические решения линейного уравнения теплопроводности применительно к граничным условиям III и II рода. Приведены графики расчетных температурных полей для реальных материалов и режимов организации технологических процессов. Сравнение расчетных температурных полей с результатами экспериментов доказывает возможность применения предлагаемых моделей в инженерной практике.

Аналитическая модель, теплообмен, резинометаллическая система, вулканизация, линейное уравнение теплопроводности.

The possibility of analytic models of heat transfer in rubber-metal systems is well founded in case of thermal vulcanization of rubber with low content of vulcanization agent. Analytic solutions of linear heat conduction equation are represented with reference to boundary conditions of III^d and II^d types. Graphics of temperature fields for real materials and conditions of technologic processes are presented. Comparison of computed temperature fields with the experiment data proves the possibility of analytic models application in engineering practice.

Analytic model, heat transfer, rubber-metal system, vulcanization, linear heat conduction equation.

Введение.

Процесс термической вулканизации обкладок гуммированных объектов представляет собой один из самых сложных тепловых процессов, протекающих при изменяющихся во времени тепловых потоках и теплообмене между теплоносителем и нагреваемым объектом. Скорость прогрева обкладок резинометаллических изделий ограничена их тепловыми свойствами, обусловленными составом, конфигурацией и размерами объекта.

При вулканизации в индукционный период происходит течение резиновых смесей и изменяется положение границ между слоями резинометаллического изделия; при нагреве покрытия с большим содержанием вулканизирующего агента выделяется теплота вследствие экзотермической реакции вулканизации; тепловые свойства отдельных слоев и элементов резинометаллического изделия могут быть различными и зависящими от температуры. В ходе вулканизации обкладок гуммированных объектов необходимо обеспечить такое распределение и изменение температур во времени, при которых для данного типа обкладки, применяемых материалов и рецептур эластомеров сочетание комплекса основных свойств готового покрытия резинометаллического изделия является наилучшим. Эти требования можно обеспе-

чить выбором рационального теплового режима вулканизации обкладок.

Выбор режима вулканизации обкладок основан на анализе температурных полей в резинометаллическом изделии и на объективной оценке результатов их воздействия на процесс вулканизации.

Моделирование внутреннего переноса тепла в системе резина – металл при термической вулканизации резины с относительно низким содержанием вулканизирующего агента в качестве одного из приближений можно свести к задаче нагрева бесконечной двухслойной пластины. Дело в том, что при низком содержании вулканизирующего агента можно пренебречь тепловыми эффектами реакций, происходящих в резине [2], и тем самым существенно упростить задачу математического моделирования.

Основная часть.

В случае, когда внешний теплообмен осуществляется по закону Ньютона, что соответствует граничным условиям III рода, предлагается использовать систему линейных уравнений теплопроводности, каждое из которых описывает функцию $t_j(x, \tau)$ температуры, зависящую от координаты x и времени τ , при этом значение индекса j ($j = 1; 2$) отно-

сится к левой и правой частям двухслойной пластины [3].

$$\frac{\partial t_1(x, \tau)}{\partial \tau} = a_1 \frac{\partial^2 t_1(x, \tau)}{\partial x^2}; \quad (-l_1 < x \leq 0) \quad (1)$$

$$\frac{\partial t_2(x, \tau)}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 t_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad (0 < x < l_2) \quad (2)$$

где a_j – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Для решения системы уравнений (1)–(2) применены следующие краевые условия

$$t_1(x, 0) = t_2(x, 0) = t_0 = \text{const}; \quad (3)$$

$$t_1(0, \tau) = t_2(0, \tau); \quad (4)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(0, \tau)}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial t_2(0, \tau)}{\partial x}; \quad (5)$$

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1(-l_1, \tau)}{\partial x} + \alpha_1 [t_{c1} - t_1(-l_1, \tau)] = 0; \quad (6)$$

$$-\lambda_2 \frac{\partial t_2(l_2, \tau)}{\partial x} + \alpha_2 [t_{c2} - t_2(l_2, \tau)], \quad (7)$$

где λ_j – коэффициент теплопроводности, Вт/(м²·°C); α_j – коэффициент теплоотдачи от внешней среды с температурой t_{cj} к соответствующей поверхности двухслойной системы, Вт/(м²·°C).

Условие (3) является начальным, оно соответствует постоянству и равенству значений температуры в каждом слое пластины в начальный момент времени ($\tau = 0$).

Условия (4), (5) являются граничными, они определяют равенство температур и тепловых потоков на границе между слоями ($x = 0$).

Условия (6), (7) также относятся к числу граничных условий, они отвечают теплообмену по закону Ньютона на поверхностях $x = -l_1$, $x = l_2$, но в общем случае с различными значениями коэффициентов теплоотдачи α_1 , α_2 и температур внешних сред t_{c1} , t_{c2} .

Решение системы уравнений (1)–(2) при краевых условиях (3)–(7) получено с помощью операционного исчисления и может быть представлено в следующем виде:

$$t_1(X, \tau) = t_0 + f_1(X) - 2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_1(\mu_m) \cdot \cos(\mu_m X) + F_2(\mu_m) \cdot \sin(\mu_m X)}{\mu_m \cdot [K_1 F_3(\mu_m) + F_4(\mu_m)]} \times$$

$$\times \exp(-\mu_m^2 Fo); \quad (8)$$

$$t_2(X, \tau) = t_0 + f_2(X) -$$

$$2 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_1(\mu_m) \cdot \cos(K_2 \mu_m X) + K_1 F_2(\mu_m) \cdot \sin(K_2 \mu_m X)}{\mu_m \cdot [K_1 F_3(\mu_m) + F_4(\mu_m)]} \times \exp(-\mu_m^2 Fo), \quad (9)$$

при этом

$$f_1(X) = \frac{Bi_1 \cdot (t_{c1} - t_0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_2 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (t_{c2} - t_0) (Bi_1 + 1)}{Bi_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_1 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (Bi_1 + 1)} + \frac{Bi_1 \frac{l_1}{l_2} Bi_2 \cdot (t_{c2} - t_{c1}) X}{Bi_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_1 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (Bi_1 + 1)};$$

$$f_2(X) = \frac{Bi_1 \cdot (t_{c1} - t_0) \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_2 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (t_{c2} - t_0) (Bi_1 + 1)}{Bi_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_1 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (Bi_1 + 1)} + \frac{Bi_1 \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot Bi_2 \cdot (t_{c2} - t_{c1}) X}{Bi_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot (Bi_1 + 1) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (Bi_1 + 1)};$$

$$F_1(\mu_m) = Bi_1 \cdot (t_{c1} - t_0) K_1 \times \left[\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m \cdot \cos(K_2 \mu_m) + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot \sin(K_2 \mu_m) \right] + Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (t_{c2} - t_0) (\mu_m \cdot \cos \mu_m + Bi_1 \cdot \sin \mu_m);$$

$$F_2(\mu_m) = Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot (t_{c2} - t_0) (Bi_1 \cdot \cos \mu_m - \mu_m \cdot \sin \mu_m) - Bi_1 \cdot (t_{c1} - t_0) \cdot \left[Bi_2 \frac{l_1}{l_2} \cdot \cos(K_2 \mu_m) - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m \cdot \sin(K_2 \mu_m) \right];$$

$$F_3(\mu_m) = [(Bi_1 + 1) \cdot \sin \mu_m + \mu_m \cdot \cos \mu_m] \times \left[\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m \cdot \cos(K_2 \mu_m) + \frac{l_1}{l_2} Bi_2 \cdot \sin(K_2 \mu_m) \right] + (Bi_1 \cdot \cos \mu_m - \mu_m \cdot \sin \mu_m) \times \left[\frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{l_2}{l_1} \mu_m \cdot \sin(K_2 \mu_m) - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot (Bi_2 + 1) \cdot \cos(K_2 \mu_m) \right];$$

$$F_4(\mu_m) = \left[\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot (Bi_2 + 1) \cdot \sin(K_2 \mu_m) + \frac{a_1}{a_2} \cdot \frac{l_2}{l_1} \mu_m \cdot \cos(K_2 \mu_m) \right] \times (\mu_m \cdot \cos \mu_m + Bi_1 \cdot \sin \mu_m) +$$

$$+ \left[\frac{l_1}{l_2} Bi_2 \cdot \cos(K_2 \mu_m) - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m \cdot \sin(K_2 \mu_m) \right] \times \\ \times [\mu_m \cdot \sin \mu_m - (Bi_1 + 1) \cdot \cos \mu_m].$$

Величины Bi_1, Bi_2, Fo являются критериями Био и Фурье

$$Bi_1 = \frac{\alpha_1 l_1}{\lambda_1}; \quad Bi_2 = \frac{\alpha_2 l_2}{\lambda_2}; \quad Fo = \frac{a_1 \tau}{l_1^2}.$$

Коэффициенты K_1, K_2 вычисляются по формулам:

$$K_1 = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \quad K_2 = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \frac{l_2}{l_1}.$$

В записи решения (8)–(9) использована безразмерная координата $X = x/l_1$ ($X \in (-1; 0]$) и $X = x/l_2$ ($X \in (0; 1)$). Таким образом, часть решения (8) соответствует левой части двухслойной пластины, а (9) – ее правой части.

Значения $\mu_m > 0$ ($m = 1, 2, \dots$) являются корнями характеристического уравнения

$$K_1 (Bi_1 - \mu \cdot tg \mu) \cdot \left[\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu + Bi_2 \cdot \frac{l_1}{l_2} tg(K_2 \mu) \right] = \\ = (\mu + Bi_1 \cdot tg \mu) \cdot \left[\sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu \cdot tg(K_2 \mu) - Bi_2 \cdot \frac{l_1}{l_2} \right].$$

На рис. 1 представлен пример расчета температурного поля при вулканизации слоя резины марки 2566 (НК+СКБ), прикрепленной к стальной пластине (Ст.3).

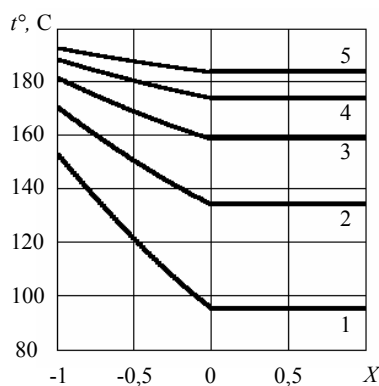


Рис. 1. Пример расчета температурного поля системы резина – металл в соответствии с решением (8)–(9)

Левая часть двухслойной пластины ($X \in (-1; 0]$) соответствует резине, а ее правая часть ($X \in (0; 1)$) – стали. Расчеты проводились при следующих значениях параметров: $l_1 = 0,002$ м;

$l_2 = 0,005$ м; $\alpha_1 = \alpha_2 = 100$ Вт/(м²°С); $t_0 = 20$ °С; $t_{c1} = t_{c2} = 200$ °С. Кривые с номерами 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют следующим значениям времени τ : 1 – 60 с; 2 – 120 с; 3 – 180 с; 4 – 240 с; 5 – 300 с.

Параметры приведенных расчетов соответствуют процессу вулканизации в аппарате с псевдоожиженным слоем инертного зернистого теплоносителя, где в качестве теплоносителя использованы шлаковые шарики со средним диаметром 0,8 мм [1], [4].

В случае, когда к наружным поверхностям двухслойной пластины подводятся тепловые потоки с удельной мощностью q_j , Вт/м², при решении системы уравнений (1)–(2) граничные условия (6) и (7) следует заменить на

$$-\lambda_1 \frac{\partial t_1(-l_1, \tau)}{\partial x} = q_1; \quad (10)$$

$$\lambda_2 \frac{\partial t_2(l_2, \tau)}{\partial x} = q_2. \quad (11)$$

Решение системы уравнений (1)–(2) при краевых условиях (3)–(5) и (10), (11) получено с помощью операционного исчисления и может быть представлено в следующем виде

$$t_1(X, \tau) = t_0 + \frac{a_1 a_2 \cdot (K_1 q_1 \lambda_2 + q_2 \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)} + \\ + \frac{l_1^2 \cdot \left[K_1 q_1 \lambda_2 \cdot \left(a_1 \frac{l_2^2}{l_1^2} + a_2 X^2 \right) + q_2 a_2 \lambda_1 \cdot (1 + X^2) \right]}{2 \lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)} + \\ + l_1 X \cdot \frac{\sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \cdot q_2 l_1 \lambda_1 - q_1 l_2 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 \cdot \left(K_1 \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \cdot l_1 + \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot l_2 \right)} - (K_1 q_1 \lambda_2 + q_2 \lambda_1) \times \\ \times \frac{K_1 \cdot (a_2^2 l_1^3 + 3 a_1 a_2 l_1 l_2^2) + a_1^2 l_2^3 + 3 a_1 a_2 l_2^2 l_1}{6 \lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)^2} + \\ + 2 l_1 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_1(\mu_m) \cdot \cos(\mu_m X) + F_2(\mu_m) \cdot \sin(\mu_m X)}{K_1 F_3(\mu_m) + F_4(\mu_m)} \times \\ \times \exp(-\mu_m^2 Fo); \quad (12)$$

$$t_2(X, \tau) = t_0 + \frac{a_1 a_2 \cdot (K_1 q_1 \lambda_1 + q_2 \lambda_1)}{\lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)} \cdot \tau + \\ + \frac{l_1^2 \cdot \left[K_1 q_1 \lambda_2 a_1 \cdot \left(\frac{l_2^2}{l_1^2} + X^2 \right) + q_2 \lambda_1 \cdot (a_2 + a_1 X^2) \right]}{2 \lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)} + \\ + \frac{l_1^2 \cdot \left[K_1 q_1 \lambda_2 a_1 \cdot \left(\frac{l_2^2}{l_1^2} + X^2 \right) + q_2 \lambda_1 (a_2 + a_1 X^2) \right]}{2 \lambda_1 \lambda_2 \cdot (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)} +$$

$$\begin{aligned}
 & + K_1 l_1 X \cdot \frac{q_2 l_1 \lambda_1 - \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot q_1 l_2 \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2 \cdot \left(K_1 \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \cdot l_1 + \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot l_2 \right)} \\
 & - (K_1 q_1 \lambda_2 + q_2 \lambda_1) \cdot \frac{K_1 (a_2^2 l_1^3 + 3 a_1 a_2 l_1 l_2^2) + a_1^2 l_2^3 + 3 a_1 a_2 l_1^2 l_2}{6 \lambda_1 \lambda_2 (K_1 l_1 a_2 + l_2 a_1)^2} + \\
 & + 2 l_1 \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{F_1(\mu_m) \cdot \cos(K_2 \mu_m X) + K_1 F_2(\mu_m) \cdot \sin(K_2 \mu_m X)}{K_1 F_3(\mu_m) + F_4(\mu_m)} \times \\
 & \times \exp(-\mu_m^2 Fo), \quad (13)
 \end{aligned}$$

при этом

$$\begin{aligned}
 F_1(\mu_m) &= K_1 \frac{q_1}{\lambda_1} \cdot \cos(K_2 \mu_m) + \frac{q_2}{\lambda_2} \cdot \cos \mu_m; \\
 F_2(\mu_m) &= \frac{q_1}{\lambda_1} \cdot \sin(K_2 \mu_m) - \frac{q_2}{\lambda_2} \cdot \sin \mu_m; \\
 F_3(\mu_m) &= K_2 \mu_m^2 \cdot \sin \mu_m \cdot \sin(K_2 \mu_m) - \\
 & - 3 \mu_m \cdot \sin \mu_m \cdot \cos(K_2 \mu_m) - \mu_m^2 \cdot \cos \mu_m \cdot \cos(K_2 \mu_m); \\
 F_4(\mu_m) &= \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m^2 \cdot \sin(K_2 \mu_m) \cdot \sin \mu_m - 3 \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m \times \\
 & \times \sin(K_2 \mu_m) \cdot \cos \mu_m - K_2 \cdot \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \mu_m^2 \cdot \cos(K_2 \mu_m) \cdot \cos \mu_m.
 \end{aligned}$$

Критерий Фурье Fo и коэффициенты K_1, K_2 вычисляются, как и при записи решения (8)–(9), т. е.

$$Fo = \frac{a_1 \tau}{l_1^2}; \quad K_1 = \sqrt{\frac{a_2}{a_1}} \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_2}; \quad K_2 = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}} \cdot \frac{l_2}{l_1}.$$

Значения $\mu_m > 0$ ($m = 1, 2, \dots$) являются корнями характеристического уравнения

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \cdot tg \mu = - \frac{a_1}{a_2} \cdot tg(K_2 \mu).$$

На рис. 2 представлен пример расчета температурного поля при вулканизации слоя резины марки 2566 (НК+СКБ), прикрепленной к стальной пластине (Ст.3).

На рис. 2, как и на рис. 1, левая часть двухслойной пластины соответствует резине, а ее правая часть – стали. Расчеты производились при следующих значениях параметров: $l_1 = 0,001$ м; $l_2 = 0,005$ м; $q_1 = q_2 = 2 \times 10^3$ Вт/м²; $t_0 = 25$ °С. Кривые 1, 2, 3, 4, 5 отвечают следующим значениям времени τ : 1 – 60 с; 2 – 120 с; 3 – 180 с; 4 – 240 с; 5 – 300 с. Параметры приведенных расчетов соответствуют вулканизации в прессах.

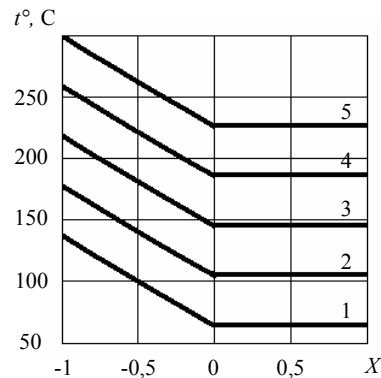


Рис. 2. Пример расчета температурного поля системы резина – металл в соответствии с решением (12)–(13)

Предлагаемая методика расчетов была проверена в результате проведения серии экспериментов, что доказало возможность ее практического применения в инженерных расчетах при разработке оптимальных режимов работы соответствующего технологического оборудования.

Выводы.

Необходимое качество гуммировочных покрытий обеспечивают подбором такого сочетания параметров процесса термообработки, при котором возможна равномерность вулканизации покрытий. Она осуществляется выбором рациональных условий теплообмена и теплопередачи, а также за счет конструкций вулканизационных аппаратов и варьирования характеристик резин.

После расчета температурных полей оценивают их действие, для чего желательно непосредственное измерение кинетики вулканизации покрытий при переменных температурах по программам, задаваемым по расчетам температур во времени для интересующих участков покрытия.

Чем точнее определены условия теплообмена и учтены основные факторы, влияющие на тепловой процесс, чем правильнее модель воссоздает моделируемый объект, тем эффективнее метод проектирования теплового режима вулканизации гуммировочных покрытий.

Так как точные расчеты, проводимые с учетом всех факторов (внутренние источники теплоты, подвижность границ и др.), достаточно трудоемки, целесообразно разделять проектирование режимов вулканизации на несколько периодов. Сначала на упрощенных моделях нужно исследовать необходимое число вариантов режимов и сделать предварительный выбор наиболее подходящих из них, а затем применить уточненные расчеты с целью выбора оптимального варианта.

Литература

1. Аваев, А. А. Математическое моделирование нестационарной теплопроводности при вулканизации эластомерных покрытий на тканевых и металлических подложках / А. А. Аваев. – Череповец, 2010.

2. Лукомская, А. И. Тепловые основы вулканизации резиновых изделий / А. И. Лукомская, П. Ф. Баденков, Л. М. Кеperша. – М., 1972.
3. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М., 1967.

4. Осипов, Ю. Р. Улучшение качественных показателей гуммировочных покрытий с помощью адаптивной системы оптимального управления процессом / Ю. Р. Осипов, С. Ю. Загребин, С. Ю. Осипов // Конструкции из композиционных материалов. – М., 2004. – Вып. 3. – С. 20–30.

УДК 666.97.035.55; 662.986.3; 662.614.2

К. В. Аксенчик, Н. И. Шестаков
Череповецкий государственный университет

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РЕЖИМОВ ТЕПЛОВЛАЖНОСТНОЙ ОБРАБОТКИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

В статье представлена методика расчета режимов тепловлажностной обработки железобетонных изделий, заключающаяся в определении в характерные моменты времени в характерных сечениях изделия температуры, влагосодержания и их перепадов между сечениями, а также в прогнозировании прочности бетона при сжатии и появления усадки материала. Приведены рекомендации по применению методики в инженерной практике. Выполнено сравнение разработанной и традиционной методик расчета режимов по расходу тепловой энергии, электроэнергии и затратам времени.

Тепловлажностная обработка, режим тепловлажностной обработки, бетон.

The article presented the calculation method of heat and moist treatment of ferroconcrete items. The method consisted in determination of temperature, moisture and their drops between the sections in typical times and sections of products and prediction of compressive strength of concrete and the appearance of concrete shrinkage. Guidance on the engineering application of the method is provided. Comparison of developed and traditional calculation methods of regimes at consumption of thermal energy, electricity and time-consuming is made.

Heat and moist treatment, regimes of heat and moist treatment, concrete.

Введение.

В настоящее время режимы тепловлажностной обработки (ТВО) назначаются по указаниям и рекомендациям с обязательной экспериментальной проверкой и уточнением параметров режимов или экспериментально-расчетными способами, которые характеризуются неэффективным использованием тепловой энергии в поверочных экспериментах, значительными расходами и трудозатратами на их проведение. Экспериментальная проверка проводится, как правило, на модельных образцах, отличающихся от железобетонных изделий кинетикой тепло- и массообменных процессов. На практике назначенные режимы часто не обеспечивают проектного энергопотребления и качества изделий, поэтому приходится проводить корректировку режимов в производственных условиях, увеличивать производственные площади для дозревания бетона, что ведет к повышению себестоимости продукции. Совершенствование тепловой работы пропарочных камер на основе расчетно-экспериментальных исследований процессов тепло- и массообмена является актуальной задачей.

Цель исследования – разработка усовершенствованной методики расчета режимов ТВО сплошных плоских бетонных и железобетонных изделий в пропарочной камере и рекомендаций по ее применению.

Основная часть.

Разработанная методика расчета режимов ТВО железобетонных изделий основана на определении в

характерные моменты времени ТВО в характерных сечениях изделия температуры, влагосодержания и их перепадов между сечениями, а также на прогнозировании прочности бетона при сжатии и появления усадки материала. Методика отличается от известных тем, что кроме влияния температуры учитывается еще и влияние влагосодержания.

Исходные данные для расчета.

1. Состав бетона, который может быть задан через удельные расходы компонентов ($\text{кг}/\text{м}^3$) – цемента ($Ц$), мелкого заполнителя ($П$), крупного заполнителя ($Ш$), воды ($В$), арматуры, или массовыми соотношениями $Ц:П:Ш$ и $В/Ц$; относительный объем вовлеченного или оставшегося в смеси воздуха; размеры изделия (толщина, длина, ширина).

2. Характеристики цемента: марка (активность), время начала схватывания, содержание активных минеральных добавок, группа эффективности при пропаривании.

3. Данные о теплофизических и массообменных свойствах бетона, включающие коэффициент теплопроводности сухого бетона при 0°C , коэффициент диффузии жидкой воды в бетоне, максимальное и равновесное влагосодержание.

4. Данные по тепло- и массообмену, включающие коэффициенты тепло- (α) и влаготдачи (α'), которые определяют по известным критериальным уравнениям.

5. Параметры режима ТВО: длительность каждого периода ТВО, начальная температура бетона и