

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
И НАУКИ РФ
АССОЦИАЦИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ВУЗОВ СНГ

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ
УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ

СТРОИТЕЛЬСТВО

№ 6 (606)

Июнь 2009 г.

Научно-теоретический журнал
Издается с марта 1958 г.
Выходит один раз в месяц

Главный редактор В. Г. Себешев

Редакционная коллегия: А. А. Афанасьев,
В. Л. Баладинский, Т. И. Баранова, В. А. Воробьев,
П. А. Дмитриев, В. А. Игнатьев, В. И. Костин (зам.
гл. редактора), Г. Б. Лебедев (зам. гл. редактора),
Е. М. Лобанов, Л. С. Ляхович, В. И. Морозов,
Ю. П. Панибратов, Ю. А. Попов, Ю. П. Правдивец,
В. Г. Себешев, И. Б. Соколов, Ю. А. Феофанов,
Е. М. Чернышов, Г. Н. Шоршнев

Ответственный секретарь Н. В. Биткина

Адрес редакции:

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113.
Тел./факс 266-28-59.

www.sibstrin.ru

E-mail: izvuz_str@sibstrin.ru

Свидетельство о регистрации № 993 от 28.11.90 г.

Подписано в печать 15.06.09. Формат 70×108¹/₁₆.
Усл. печ. л. 11,20+0,35. Тираж 350 экз. Заказ 1633.

ЗАО «Новосибирский полиграфкомбинат», 630007,
г. Новосибирск, Красный проспект, 22.

Издатель НГАСУ (Сибстрин), 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

- Немировский Ю. В., Янковский А. П.** Построение определяющих уравнений просадочных и набухающих грунтов, армированных пространственной георешеткой, с учетом предварительного напряженного состояния 3

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Макридин Н. И., Вернигорова В. Н., Максимова И. Н., Овсякова Ю. В.** Особенности фазового состава гидросиликатов кальция в зависимости от вида суперпластификатора 11

- Хлыстов А. И.** Химическое связывание неорганических тугоплавких отходов — один из экологических способов их утилизации 18

- Сучков В. П., Мольков А. А.** Технология производства трудногорючего пенополиуретана с использованием фосфогипса 25

- Логанина В. И., Прошина Н. А., Давыдова О. А.** Применение добавки золя кремниевой кислоты при изготовлении известковых отделочных составов 30

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Подгорнов Н. И., Аппарович Т. В., Коротеев Д. Д. Термообработка бетона в опалубочных формах с использованием солнечной энергии	35
САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА	
Самарин О. Д. Влияние изменения параметров наружного климата на окупаемость энергосберегающих мероприятий	43
СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ	
Илиополов С. К., Чернов С. А., Мардиросова И. В. Модифицированная холодная асфальтобетонная смесь для ремонта дорожных покрытий	49
НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ	
Гилета В. П., Юдин Б. В. Кинематический анализ механизмов с использованием ряда Тейлора	55
Головинский П. А., Ушаков И. И., Ушаков С. И. Исследование трещинообразования эпоксидных полимербетонов методом акустической эмиссии	62
Криворотов А. П., Лубягин А. В., Зубачев П. В., Савков П. А. Оценка взаимодействия жестких цилиндрических включений в нелинейно-деформируемой грунтовой среде	68
Леонович С. Н. Оценка остаточной морозостойкости бетона эксплуатируемых конструкций методом отрыва со скалыванием	75
Никитенко А. Ф., Резников Б. С., Кучеренко И. В. Предельные нагрузки при неупругом деформировании элементов конструкций	83
Селяев В. П., Селяев П. В., Колдин А. О. Прогнозирование долговечности железобетонных изгибаемых элементов вероятностными методами	91
Ерышев В. А., Тошин Д. С. Методика расчета нормального сечения изгибаемого железобетонного элемента при разгрузке	97
Холопов И. С., Чернышев Д. Д. Определение пульсационной ветровой нагрузки при расчете вытяжных башен	105
Черных А. В., Черных В. В. Определение величины смещения гребня шва горизонтальных соединений при дуговой сварке с использованием магнитного поля	113
В ЛАБОРАТОРИЯХ ВУЗОВ	
Албаут Г. Н., Митасов В. М., Пичкурова Н. С., Табанюхова М. В. Модельное исследование влияния организованных трещин на напряженное состояние балок	119

ТЕОРИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

УДК 539.3

Ю. В. НЕМИРОВСКИЙ, А. П. ЯНКОВСКИЙ

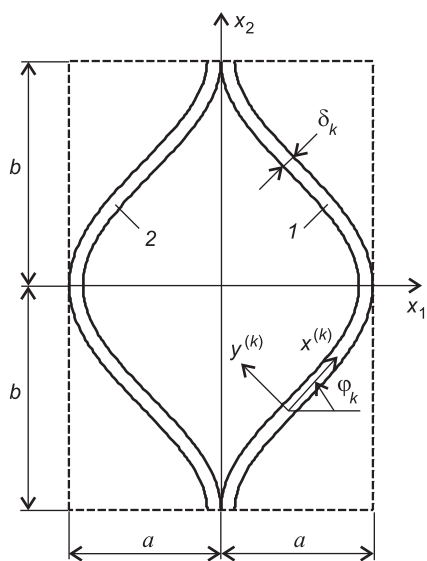
ПОСТРОЕНИЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ УРАВНЕНИЙ ПРОСАДОЧНЫХ И НАБУХАЮЩИХ ГРУНТОВ, АРМИРОВАННЫХ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОРЕШЕТКОЙ, С УЧЕТОМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ¹

Предложена модель термовлагомеханического поведения просадочных и набухающих грунтов, армированных пространственной георешеткой со структурой общего вида, без привлечения энергетических критериев эквивалентности. Проведен конкретный расчет характеристик геокомпозита со сложной структурой армирования тремя методами; показано, что некоторые расчетные эффективные технические постоянные армированного грунта, определенные кинематическим и статическим методами, различаются при сложных структурах армирования на десятки процентов...

грунт, армирование, георешетка, определяющие уравнения, структурная теория.

Настоящая работа продолжает исследования, опубликованные авторами в [1, 2], где были разработаны кинематический и статический методы определения эффективных термоупругих характеристик грунта, армированного пространственной георешеткой, с использованием энергетических критериев эквивалентности. Известно, что для достаточно простых структур армирования кинематический метод дает верхнюю, а статический — нижнюю оценки расчетных значений эффективных жесткостей композита. В [2] было показано, что в простейшем случае (прямолинейного армирования по двум ортогональным направлениям) расчетные эффективные технические постоянные геокомпозита, определенные этими методами, различаются менее чем на 0,1%. Однако, как будет показано ниже, в общем случае более сложного армирования грунта, что и имеет место на практике, для некоторых эффективных характеристик геокомпозита возникающая «вилка» расчетных значений может составлять несколько десятков процентов, что не позволяет дать однозначный ответ о выборе расчетных значений этих характеристик. Кроме того, до настоящего времени при построении определяющих уравнений геокомпозитов не учитывались такие свойства грунтов, как просадка или набухание при изменении их влажности [3], а также наличие начального (предварительного) напряженного состояния в фазах композиции. В связи с этим настоящее исследование посвящено построению модели механического поведения просадочных и набухающих грунтов, армированных пространственной георешеткой, позволяющей (модели) определять эффективные термовлагоупругие характеристики геокомпозита без привлечения энергетических критериев эквивалентности с учетом предварительного напряженного состояния всех фаз композиции.

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 08-01-90403-Укр_а) и Президиума СО РАН (Постановление № 10 от 15.01.09, номер проекта 72).



Представительный элемент (ячейка) геокompозита, армированного пространственной георешеткой (вид сверху)

Будем использовать те же обозначения, что введены авторами в [1, 2], но при более общей схематизации георешетки (см. рисунок), чем в [1, 4] (ср., например, с рис. 1 в [1]).

Так как при сооружении слоистых дорожных покрытий с использованием пространственно армированных геокompозитов грунт внутри ячейки искусственно уплотняют [4], чтобы, согласно критерию прочности Кулона — Мора [3], увеличить сцепление грунта с георешеткой, а также взаимное сцепление частиц самого грунта, то в армирующих элементах, в грунте и, как следствие, в геокompозите в целом могут возникнуть начальные напряжения. (Определение начальных напряженных состояний в грунте и элементах георешетки представляет собой самостоятельную задачу, выходящую

за рамки настоящего исследования. Далее в данной работе предполагаем, что эти напряжения известны.)

Для нахождения практически пригодных зависимостей, определяющих все независимые термовлагоупругие постоянные рассматриваемого геокompозита, необходимо сделать некоторые допущения, аналогичные тем, что использованы в [1, 2]. При этом допущения 1–3 из [1] остаются без изменений (допущение 6 вообще не используется), а вместо гипотез 4, 5 соответственно примем следующие.

4". Осредненные поля деформаций, напряжений и температуры в композиции определяются по правилу простой смеси — пропорционально объемному содержанию каждого составляющего.

5". Все фазовые материалы линейно упруги, ортотропны и однородны; определяющие уравнения для них с учетом предварительного напряженного состояния и набухания или просадки грунта в матричной форме имеют вид² [3]

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_0 &= \bar{p}_0 + A_0(\bar{\epsilon}_0 - \bar{\alpha}_0 T_0 - \bar{\beta}_0 \Delta w), \\ \bar{\sigma}_k &= \bar{p}_k + A_k(\bar{\epsilon}_k - \bar{\alpha}_k T_k), \quad k=1, 2, \dots, K,\end{aligned}\tag{1}$$

где \bar{p}_0, \bar{p}_k — вектор-столбцы начальных напряжений в грунте и k -м армирующем элементе георешетки, имеющие структуру, аналогичную векторам $\bar{\sigma}_0, \bar{\sigma}_k$ (см. (10) в [2]);

K — количество армирующих элементов георешетки в ячейке (на рисунке изображена георешетка с двумя ($K=2$) криволинейными армирующими элементами; возможен расчет и более сложных георешеток, в рамках настоящего исследования это не принципиально);

Δw — приращение влажности грунта по сравнению с естественным состоянием;

$\bar{\beta}_0$ — вектор-столбец коэффициентов линейного расширения набухающего (если компоненты этого вектора положительны [3]) или просадочного (если компоненты этого вектора отрицательны [3]) грунта. (Остальные

² Малмейстер А. К. Сопротивление полимерных и композитных материалов. Рига: Зинатне, 1980. 572 с.

векторные и матричные величины в (1) имеют тот же смысл, что и в соотношениях (1), (3) в [1].)

З а м е ч а н и е 1. В отличие от допущения 4'', в [1] осреднялись температурное поле и лишь поля деформаций (кинематическая гипотеза 4 в [1]), а в [2] — поля напряжений (статическая гипотеза 4' в [2]).

Согласно (1) и допущению 1 из [1], определяющие уравнения для рассматриваемого геокомпозита имеют вид

$$\bar{\sigma} = \bar{p} + A(\bar{\epsilon} - \bar{\alpha}T - \bar{\beta}\Delta w), \quad (2)$$

где \bar{p} , $\bar{\beta}$ — вектор-столбцы, имеющие смысл, аналогичный \bar{p}_0 , $\bar{\beta}_0$ в (1), но уже для геокомпозита в целом; остальные векторы и матрица A в (2) определяются соотношениями (3) в [1].

Используя допущения 4'' и рассуждая, как в [1], выведем соотношения, совпадающие с (9), (11) в [1], т.е. в рамках рассматриваемой модели, как и в [1, 2], средняя температура композиции в пределах ячейки равна температуре каждого фазового материала ($T = T_k$, $0 \leq k \leq K$). Кроме этого, согласно допущению 4'', осредненные поля напряжений в геокомпозите определяются так:

$$\bar{\sigma} = \frac{V_0}{V} \bar{\sigma}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \bar{s}_k \delta_k dl, \quad V_0 = V - h \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k dl, \quad (3)$$

где V_0 — объем грунта в ячейке;

h — толщина армированного грунта;

δ_k , l_k — толщина и длина (вдоль направляющей) k -го армирующего элемента (который, согласно рисунку, представляет собой цилиндрический оболочечный элемент, образующая которого совпадает с поперечным к слою направлением x_3);

\bar{s}_k — вектор-столбец напряжений в k -м армирующем элементе в глобальной системе координат x_1, x_2, x_3 , в которой заданы и компоненты вектора $\bar{\sigma}_0$ (в отличие от этого, компоненты векторов $\bar{\sigma}_k$ в (1) заданы в локальной системе координат $x^{(k)}, y^{(k)}, z^{(k)} \equiv x_3$, связанной с k -м армирующим элементом, поэтому вектор \bar{s}_k выражается через $\bar{\sigma}_k$ соотношением (15) в [2]); суммирование производится от 1 до K .

Используя связь между \bar{s}_k , $\bar{\sigma}_k$ и определяющие уравнения (1), из соотношения (3) получим

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = & \frac{V_0}{V} \bar{\sigma}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{\sigma}_k dl = \frac{V_0}{V} A_0 \bar{\epsilon}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k \bar{\epsilon}_k dl - \\ & - \frac{V_0}{V} A_0 \bar{\beta}_0 \Delta w - \left[\frac{V_0}{V} A_0 \bar{\alpha}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k \bar{\alpha}_k dl \right] T + \\ & + \frac{V_0}{V} \bar{p}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{p}_k dl, \end{aligned} \quad (4)$$

где компоненты матриц D_k определяются равенствами (24) в [1].

Выразим в (4) деформации $\bar{\epsilon}_k$ через $\bar{\epsilon}_0$. Для этого используем второе и третье допущения (см. [1]) и условия сопряжения полей напряжений и перемещений на лицевых поверхностях контакта k -го армирующего элемента с грунтом, после чего получим равенства, совпадающие с (13), (14) в [1], и дополнительные соотношения

$$\begin{aligned}
p_{yy}^{(k)} &= p_{11}^{(0)} \sin^2 \varphi_k + p_{22}^{(0)} \cos^2 \varphi_k - p_{12}^{(0)} \sin 2\varphi_k, \\
p_{yz}^{(k)} &= -p_{13}^{(0)} \sin \varphi_k + p_{23}^{(0)} \cos \varphi_k, \\
p_{xy}^{(k)} &= 0,5(p_{22}^{(0)} - p_{11}^{(0)}) \sin 2\varphi_k + p_{12}^{(0)} \cos 2\varphi_k \quad (1 \leq k \leq K),
\end{aligned} \tag{5}$$

вытекающие из соотношений (13) в [1]. (Здесь $p_{yy}^{(k)}, p_{yz}^{(k)}, p_{xy}^{(k)}$ — компоненты вектора \bar{p}_k ; $p_{ij}^{(0)}$ ($i, j=1, 2, 3$) — компоненты вектора \bar{p}_0 .)

Преобразуем равенства (13) в [1] с учетом (1), (5) и соотношений (11), (14) из [1], тогда получим

$$\begin{aligned}
&A_{21}^{(k)}(\epsilon_{xx}^{(k)} - \alpha_x^{(k)} T) + A_{22}^{(k)}(\epsilon_{yy}^{(k)} - \alpha_y^{(k)} T) + A_{23}^{(k)}(\epsilon_{zz}^{(k)} - \alpha_z^{(k)} T) = \\
&= [A_{11}^{(0)}(\epsilon_{11}^{(0)} - \alpha_1^{(0)} T - \beta_1^{(0)} \Delta w) + A_{12}^{(0)}(\epsilon_{22}^{(0)} - \alpha_2^{(0)} T - \beta_2^{(0)} \Delta w) + \\
&+ A_{13}^{(0)}(\epsilon_{33}^{(0)} - \alpha_3^{(0)} T - \beta_3^{(0)} \Delta w)] \sin^2 \varphi_k + [A_{21}^{(0)}(\epsilon_{11}^{(0)} - \alpha_1^{(0)} T - \beta_1^{(0)} \Delta w) + \\
&+ A_{22}^{(0)}(\epsilon_{22}^{(0)} - \alpha_2^{(0)} T - \beta_2^{(0)} \Delta w) + A_{23}^{(0)}(\epsilon_{33}^{(0)} - \alpha_3^{(0)} T - \beta_3^{(0)} \Delta w)] \cos^2 \varphi_k - \\
&- 2G_{12}^{(0)} \epsilon_{12}^{(0)} \sin 2\varphi_k, \quad 2G_{xy}^{(k)} \epsilon_{xy}^{(k)} = -\sin 2\varphi_k [A_{11}^{(0)}(\epsilon_{11}^{(0)} - \alpha_1^{(0)} T - \beta_1^{(0)} \Delta w) + \\
&+ A_{12}^{(0)}(\epsilon_{22}^{(0)} - \alpha_2^{(0)} T - \beta_2^{(0)} \Delta w) + A_{13}^{(0)}(\epsilon_{33}^{(0)} - \alpha_3^{(0)} T - \beta_3^{(0)} \Delta w)] / 2 + \\
&+ \sin 2\varphi_k [A_{21}^{(0)}(\epsilon_{11}^{(0)} - \alpha_1^{(0)} T - \beta_1^{(0)} \Delta w) + A_{22}^{(0)}(\epsilon_{22}^{(0)} - \alpha_2^{(0)} T - \beta_2^{(0)} \Delta w) + \\
&+ A_{23}^{(0)}(\epsilon_{33}^{(0)} - \alpha_3^{(0)} T - \beta_3^{(0)} \Delta w)] / 2 + 2G_{12}^{(0)} \epsilon_{12}^{(0)} \cos 2\varphi_k, \\
&2G_{yz}^{(k)} \epsilon_{yz}^{(k)} = -2G_{13}^{(0)} \epsilon_{13}^{(0)} \sin \varphi_k + 2G_{23}^{(0)} \epsilon_{23}^{(0)} \cos \varphi_k,
\end{aligned} \tag{6}$$

где $A_{ij}^{(k)}, A_{mn}^{(0)}, \alpha_i^{(k)}, \alpha_m^{(0)}$ определены в [1] (см. там соотношения (16)–(18)); $\beta_1^{(0)}, \beta_2^{(0)}, \beta_3^{(0)}$ — компоненты вектора $\bar{\beta}_0$ в (1), причем

$$\bar{\beta}_0^* = \{\beta_1^{(0)}, \beta_2^{(0)}, \beta_3^{(0)}, 0, 0, 0\}; \tag{7}$$

«звездочка» означает операцию транспонирования.

Из (6) и равенств (14) в [1] можно однозначно определить все деформации $\epsilon_{ij}^{(k)}$ ($i, j=x, y, z$) в k -м армирующем элементе; соответствующее равенство запишем в матричной форме

$$\bar{\epsilon}_k = B_k \bar{\epsilon}_0 + \bar{C}_k T - \bar{F} \Delta w, \tag{8}$$

где

$$\bar{F}_k^* = \{0, F_2^{(k)}, 0, F_4^{(k)}, 0, 0\}, \quad k=1, 2, \dots, K; \tag{9}$$

$$\begin{aligned}
F_2^{(k)} &= [\sin^2 \varphi_k (A_{11}^{(0)} \beta_1^{(0)} + A_{12}^{(0)} \beta_2^{(0)} + A_{13}^{(0)} \beta_3^{(0)}) + \cos^2 \varphi_k (A_{21}^{(0)} \beta_1^{(0)} + \\
&+ A_{22}^{(0)} \beta_2^{(0)} + A_{23}^{(0)} \beta_3^{(0)})] / A_{22}^{(k)}, \quad F_4^{(k)} = \sin 2\varphi_k [\beta_1^{(0)} (A_{21}^{(0)} - A_{11}^{(0)}) + \\
&+ \beta_2^{(0)} (A_{22}^{(0)} - A_{12}^{(0)}) + \beta_3^{(0)} (A_{23}^{(0)} - A_{13}^{(0)})] / (4G_{xy}^{(k)}).
\end{aligned} \tag{10}$$

(Компоненты остальных векторов $\bar{\epsilon}_k, \bar{\epsilon}_0, \bar{C}_k$ и матрицы B_k в (8) определяются соотношениями (20), (21) в [1].)

Подставим (8) в (4), тогда после элементарных преобразований с учетом третьего допущения из [1] получим

$$\begin{aligned}
\bar{\sigma} &= \left(\frac{V_0}{V} A_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k B_k dl \right) \bar{\epsilon}_0 - \left(\frac{V_0}{V} A_0 \bar{\beta}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k \bar{F}_k dl \right) \Delta w - \\
&- \left[\frac{V_0}{V} A_0 \bar{\alpha}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k (\bar{\alpha}_k - \bar{C}_k) dl \right] T + \frac{V_0}{V} \bar{p}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{p}_k dl.
\end{aligned} \tag{11}$$

Выразим здесь $\bar{\epsilon}_0$ через $\bar{\epsilon}$. Согласно допущению 4'', осредненное поле деформаций $\bar{\epsilon}$ в геокомпозите определяется так:

$$\bar{\epsilon} = \frac{V_0}{V} \bar{\epsilon}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \bar{\epsilon}_k \delta_k dl, \quad (12)$$

где $\bar{\epsilon}_k$ — вектор-столбец, содержащий компоненты тензора деформаций k -го армирующего элемента в глобальной системе координат x_1, x_2, x_3 , поэтому имеет место соотношение (23) из [1], с учетом которого, а также допущения 3 (см. [1]) и выражения (8) равенство (12) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} \bar{\epsilon} = & \frac{V_0}{V} \bar{\epsilon}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{\epsilon}_k dl = \left(\frac{V_0}{V} I + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k B_k dl \right) \bar{\epsilon}_0 + \\ & + \left(\frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{C}_k dl \right) T - \left(\frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{F}_k dl \right) \Delta w, \end{aligned} \quad (13)$$

где I — единичная матрица размером 6×6 .

$$\text{Из соотношения (13) следует } \bar{\epsilon}_0 = E \bar{\epsilon} - \bar{G} T - \bar{H} \Delta w, \quad (14)$$

где E — матрица размером 6×6 , \bar{G} , \bar{H} — вектор-столбцы вида

$$\begin{aligned} E = & \left(\frac{V_0}{V} I + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k B_k dl \right)^{-1}, \quad \bar{G} = E \left(\frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{C}_k dl \right), \\ \bar{H} = & E \left(\frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{F}_k dl \right). \end{aligned} \quad (15)$$

Подставим (14) в равенство (11), тогда после элементарных преобразований будем иметь

$$\begin{aligned} \bar{\sigma} = & \left(\frac{V_0}{V} A_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k B_k dl \right) E \bar{\epsilon} + \left(\frac{V_0}{V} \bar{p}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{p}_k dl \right) - \\ & - \left[\frac{V_0}{V} A_0 (\bar{\alpha}_0 + \bar{G}) + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k (\bar{\alpha}_k - \bar{C}_k + B_k \bar{G}) dl \right] T - \\ & - \left[\frac{V_0}{V} A_0 (\bar{\beta}_0 - \bar{H}) + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k (\bar{F}_k - B_k \bar{H}) dl \right] \Delta w. \end{aligned} \quad (16)$$

Из сопоставления равенств (2) и (16) вытекают матричные соотношения

$$A = \left(\frac{V_0}{V} A_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k B_k dl \right) E, \quad \bar{p} = \frac{V_0}{V} \bar{p}_0 + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k \bar{p}_k dl; \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} = & A^{-1} \left[\frac{V_0}{V} A_0 (\bar{\alpha}_0 + \bar{G}) + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k (\bar{\alpha}_k - \bar{C}_k + B_k \bar{G}) dl \right], \\ \bar{\beta} = & A^{-1} \left[\frac{V_0}{V} A_0 (\bar{\beta}_0 - \bar{H}) + \frac{h}{V} \sum_k \int_0^{l_k} \delta_k D_k A_k (\bar{F}_k - B_k \bar{H}) dl \right], \end{aligned} \quad (18)$$

где A^{-1} — матрица, обратная матрице A из (17). В (17), (18) нужно учесть выражения для матриц и векторов (15), (9), причем компоненты матриц B_k , D_k и векторов \bar{C}_k , \bar{F}_k (см. (10) и (21), (24) в [1]) зависят от естественной координаты l вдоль направляющей линии k -го армирующего элемента, поэтому в общем случае интегралы в (17), (18) следует определять численно.

Первое равенство (17) определяет эффективные жесткости композиции; второе соотношение (17) — осредненное начальное напряженное состояние в геокомпозите. Первое равенство (18) задает эффективные коэффициенты линейного теплового расширения, а второе соотношение (18) — эффективные коэффициенты линейного расширения набухающего или проседающего геокомпозита.

Таким образом, соотношения (17), (18) определяют все эффективные термовлагоупругие характеристики грунта, армированного пространственной георешеткой.

З а м е ч а н и е 2. Важной особенностью предложенной модели геокомпозита является возможность определения напряжений $\bar{\sigma}_k$ и деформаций $\bar{\epsilon}_k$ в фазах композиции по известным средним деформациям $\bar{\epsilon}$. Действительно, пусть известны деформации $\bar{\epsilon}$ и температура T геокомпозита, а также приращение $\Delta\omega$ влажности грунта в нем, тогда из (14), (8) известны $\bar{\epsilon}_k$, а из (1) с учетом $T_k = T$ можно получить $\bar{\sigma}_k$. Знание напряжений $\bar{\sigma}_k$ и деформаций $\bar{\epsilon}_k$ ($0 \leq k \leq K$) имеет принципиальное значение при построении и использовании в дальнейшем структурных теорий прочности² [3] геокомпозита, и кроме того, для изотропных фазовых материалов позволяет построить структурные формулы для эффективных характеристик геокомпозита при нелинейно-упругом деформировании материалов фаз композиции (см. замечание 2 в [1]; при этом термовлагоупругие характеристики грунта могут зависеть от приращения $\Delta\omega$ влажности грунта [3]).

Пример. Рассчитаем механические характеристики геокомпозита (армированного пространственной георешеткой), представительный элемент которого (вид сверху) изображен на рисунке. Размеры представительной ячейки $a = b = 0,1$ м, толщина армирующих элементов $\delta_k = 0,001$ м ($k = 1, 2$), механические характеристики [4]: изотропного грунта $E_0 = 40$ МПа, $\nu_0 = 0,35$; изотропного материала георешетки $E_a = 393$ МПа, $\nu_a = 0,4$ (такие характеристики армирующих элементов соответствуют георешетке Geoweb [4]).

Направляющие линии армирующих элементов аппроксимируем по формуле

$$x_1 = -0,5(-1)^k [(a - \delta_k) \cos(\pi x_2 / b) + a], \quad k = 1, 2. \quad (19)$$

(Возможны более сложные и точные, чем (19), аппроксимации геометрии георешетки.)

В таблице приведены расчетные значения эффективных технических постоянных рассматриваемого геокомпозита, определенные кинематическим [1], статическим [2] методами и на основе модели, предложенной в настоящей работе. (Интегралы в (17) вычислялись численно с разбиением участков интегрирования на 100 отрезков и с учетом (19).) Технические постоянные в таблице рассчитаны по формулам, аналогичным (8) из [2], где нужно сделать замены $x \rightarrow 1$, $y \rightarrow 2$, $z \rightarrow 3$ и отбросить верхний индекс (k).

Из таблицы видно, что все три обсуждаемых метода дают близкие значения расчетных эффективных механических характеристик рассматриваемого геокомпозита. Исключение составляет лишь эффективная жесткость G_{12} , для которой «вилка», определяемая кинематическим и статическим методами (т. е. сверху и снизу), составляет 18% от нижней оценки. Равенство (17) определяет значение G_{12} , лежащее примерно

посередине между соответствующими величинами, вычисленными кинематическим и статическим методами. (При других структурах армирования и других соотношениях жесткостей грунта и армирующих элементов, как показывают расчеты, проведенные авторами, значение G_{12} , вычисленное по формуле (17), может существенно отличаться от среднего арифметического тех же величин, определенных кинематическим и статическим методами.)

Расчетные значения механических характеристик геокомпозита

Технические постоянные	Метод расчета		
	кинематический [1]	статический [2]	формула (17)
E_1 , МПа	41,798796	41,79282	41,63806
E_2 , МПа	41,73356	41,728876	41,57358
E_3 , МПа	45,182948	45,182556	45,182752
ν_{21}	0,3653802	0,3652231	0,3676947
ν_{31}	0,3523966	0,3523576	0,3523777
ν_{32}	0,35218	0,3521452	0,352162
G_{12} , МПа	17,505398	14,830321	16,112438
G_{23} , МПа	15,825065	15,812884	15,818973
G_{31} , МПа	15,861465	15,849291	15,855377

Замечание 3. Расчеты показывают, что в случае простейшего однонаправленного армирования (например, по направлению x_1 или x_2) все три метода дают полностью совпадающие результаты; при перекрестном прямолинейном (по направлениям x_1 и x_2 , см. рисунок в [2]) армировании значения эффективных технических постоянных геокомпозита, определенные разными методами, различаются менее чем на 0,1%; при сложных же (см. рисунок) структурах армирования, как видно из таблицы, для некоторых эффективных характеристик различие может составлять несколько десятков процентов. Выбор той или иной модели расчета пространственно армированного геокомпозита в конечном итоге должен определяться количественным сравнением с достоверными результатами корректно проведенных экспериментов, которые, насколько известно авторам, в настоящее время пока отсутствуют [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Немировский, Ю. В. Кинематический метод определения эффективных термоупругих характеристик грунта, армированного пространственной георешеткой [Текст]/Ю. В. Немировский, А. П. Янковский//Изв. вузов. Строительство.— 2007.— № 6.— С. 18–26.
2. Немировский, Ю. В. Статический метод определения эффективных термоупругих характеристик грунта, армированного пространственной георешеткой [Текст]/Ю. В. Немировский, А. П. Янковский//Изв. вузов. Строительство.— 2008.— № 5.— С. 8–13.
3. Тер-Мартirosян, З. С. Механика грунтов [Текст]: учеб. пособие/З. С. Тер-Мартirosян.— М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов, 2005.— 488 с.
4. Матвеев, С. А. Армированные дорожные конструкции: моделирование и расчет [Текст]/С. А. Матвеев, Ю. В. Немировский.— Новосибирск: Наука, 2006.— 348 с.

НЕМИРОВСКИЙ Ю. В., д-р физ.-мат. наук, проф.

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

ЯНКОВСКИЙ А. П., д-р физ.-мат. наук

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН

Получено после доработки 20.03.09

Nemirovsky Yu. V., doctor of physical and mathematical sciences, professor, Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia

Yankovsky A. P., doctor of physical and mathematical sciences, Khristianovich Institute of theoretical and applied mechanics the Siberian Branch of the Russian Academy of Science, Russia

CONSTRUCTION OF THE DETERMINING EQUATIONS SUBSIDENCING AND SWELLING SOILS, REINFORCED WITH A SPATIAL GEOLATTICE, IN VIEW OF A PRELIMINARY STRESS-CONDITION

The model of thermo-damp-mechanical behaviour subsidencing and swelling the soils reinforced by the space geolattice with structure of a general view, without engaging power criteria of equivalence is offered. Concrete calculation of characteristics of a geocomposite with complex structure of reinforcement by three methods is lead; it is shown, that some calculated effective technical constants of the reinforced soil certain cinematic and static methods, discriminate at complex structures of reinforcement on tens percent...

soil, reinforcement, a geolattice, the determining equations, the structural theory.

REFERENCES

1. Nemirovsky, Yu. V. Cinematic a method of definition effective thermo-elastic characteristics of the soil reinforced by the space geolattice [Text]/Yu. V. Nemirovsky, A. P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction.— 2007.— N 6.— P. 18–26.
2. Nemirovsky, Yu. V. Static a method of definition effective thermo-elastic characteristics of the soil reinforced by the space geolattice [Text]/Yu. V. Nemirovsky, A. P. Yankovsky // News of Higher Educational Institutions. Construction.— 2008.— N 5.— P. 8–13.
3. Ter-Martirosyan, Z. S. Soil mechanics [Text]/the Manual/Z. S. Ter-Martirosyan.— M.: Publishing house of Association builds. High schools, 2005.— 488 p.
4. Matveev, S. A. Reinforc road designs: modelling and calculation [Text]/S. A. Matveev, Yu. V. Nemirovsky.— Novosibirsk: Science, 2006.— 348 p.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 691.32:678.06

Н. И. МАКРИДИН, В. Н. ВЕРНИГОРОВА, И. Н. МАКСИМОВА,
Ю. В. ОВСЮКОВА

ОСОБЕННОСТИ ФАЗОВОГО СОСТАВА ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ВИДА СУПЕРПЛАСТИФИКАТОРА

На основе анализа ионизационных рентгенограмм изучено влияние добавок суперпластификатора С-3 и диспергатора НФ на фазовый состав образующихся гидросиликатов кальция в процессе гидратации минералов β -C₂S и C₃S. Высказаны теоретические воззрения о влиянии модифицирующих добавок на формирование гидратационных структур твердения...

гидросиликаты кальция, фазовый состав, ионизационные рентгенограммы, суперпластификатор, минералы цемента, кристаллические решетки, химическая связь, дефекты структуры.

Трехкальциевый силикат $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (C₃S) и β -двухкальциевый силикат β -2CaO-SiO₂ (β -C₂S) являются основными минералами портландцементного клинкера и определяют его важнейшие технические свойства. Было исследовано влияние СП С-3 и НФ на фазовый состав образующихся гидросиликатов кальция (ГСК) в процессе гидратации минералов β -C₂S и C₃S. Гидратацию минералов проводили в суспензии с водотвердым отношением В/Т = 300. Добавки СП С-3 и НФ вводили в суспензию в количестве 60 мг/дм³, что составляло 2 % от массы минералов. Гидратация минералов проходила при комнатной температуре в течение 80 сут. Как показано во многих работах, кинетика гидратации в суспензиях практически не отличается от кинетики гидратации в пастах, несмотря на различие в водосиликатных отношениях. Через 80 сут синтеза ГСК отфильтровывали и промывали эфиром, а затем высушивали при 105 °С.

Полученные порошкообразные ГСК прессовали в таблетки. Были получены ионизационные рентгенограммы образцов ГСК на дифрактометре ДРОН-2. В таблице представлены основные линии (Å) негидратированных и гидратированных минералов β -C₂S и C₃S как без добавок СП, так и в их присутствии. Ионизационные рентгенограммы гидратированных минералов представлены на рис. 1, 2.

Из данных таблицы и рис. 1, 2 следует, что на ионизационных рентгенограммах всех образцов наблюдается исчезновение некоторых линий, характерных для негидратированных образцов β -C₂S и C₃S, и появление новых линий. На ионизационных рентгенограммах гидратированных образцов β -C₂S наблюдается смещение одной части линий в сторону меньших углов, другой части — в сторону больших углов. Это указывает на изменение периодов идентичности кристаллической решетки β -C₂S как в

© Макридин Н. И., Вернигорова В. Н., Максимова И. Н., Овсюкова Ю. В., 2009

-C ₂ S				C ₃ S			
негидрати- рованный	гидрати- рованный без добавок	гидрати- рованный с С-3	гидрати- рованный с НФ	негидрати- рованный	гидрати- рованный без добавок	гидрати- рованный с С-3	гидрати- рованный с НФ
—	3,39 25%	3,57 сл.	3,85 сл.	—	3,86 сл.	3,85 сл.	3,85 сл.
3,20 сл.	3,29 20%	3,39 20%	3,57 сл.	—	3,39 45%	3,56 сл.	—
3,02 сл.	3,04 100%	3,28 20%	3,39 сл.	3,03 80%	3,28 20%	3,39 40%	3,39 40%
2,84 сл.	2,98 10%	3,05 100%	3,29 10%	2,97 сл.	3,03 100%	3,28 25%	3,28 30%
2,77 100%	2,78 50%	2,98 10%	3,03 100%	2,78 100%	2,97 30%	3,03 100%	3,03 100%
—	2,75 60%	2,79 60%	2,98 <10%	2,75 90%	2,79 50%	2,97 30%	2,98 сл.
2,72 90%	2,70 10%	2,75 50%	2,79 20%	2,60 90%	2,76 45%	2,78 35%	2,79 40%
2,60 40%	2,61 50%	2,70 20%	2,75 40%	—	2,70 40%	2,75 30%	2,76 40%
2,45 20%	2,49 сл.	2,62 60%	2,70 10%	—	2,61 50%	2,70 25%	2,71 20%
2,38 20%	2,37 сл.	2,50 30%	2,61 25%	—	—	2,61 35%	2,61 40%
—	2,33 сл.	2,39 сл.	2,50 <10%	—	2,50 сл.	2,50 10%	2,49 <10%
2,27 20%	2,29 сл.	2,33 10%	2,37 сл.	2,32 сл.	2,37 сл.	2,37 10%	2,37 сл.
2,18 40%	2,19 25%	2,29 сл.	2,29 10%	—	2,33 сл.	—	2,33 сл.
2,14 сл.	2,10 сл.	2,19 30%	2,19 20%	2,19 60%	2,29 сл.	2,29 10%	2,25 40%
2,04 сл.	2,06 сл.	2,10 сл.	2,09 <10%	—	2,19 30%	2,19 15%	2,19 10%
2,01 сл.	1,98 10%	2,06 сл.	2,06 сл.	—	2,09 сл.	2,09 10%	2,09 <10%
1,97 20%	1,94 сл.	1,98 10%	1,98 сл.	1,97 сл.	1,98 20%	1,98 15%	1,98 10%
—	1,91 сл.	1,94 сл.	1,94 сл.	1,94 10%	1,91 сл.	1,94 сл.	1,91 сл.
1,88 15%	1,87 сл.	1,91 сл.	1,91 сл.	—	1,88 15%	1,91 сл.	1,88 10%
—	1,82 сл.	1,87 сл.	1,88 10%	—	1,82 сл.	1,88 10%	—
1,78 15%	1,77 30%	1,82 сл.	1,82 50%	1,82 сл.	—	1,82 сл.	1,82 сл.
1,70 10%	1,74 сл.	1,76 30%	1,76 20%	1,77 50%	1,77 20%	1,77 10%	1,76 сл.
—	1,65 сл.	1,63 сл.	1,63 сл.	1,68 35%	1,64 сл.	1,74 сл.	—
1,62 30%	1,63 25%	—	1,60 сл.	1,54 20%	1,55 сл.	1,72 сл.	1,63 сл.
1,54 сл.	1,54 сл.	1,55 сл.	1,55 сл.	—	—	1,63 сл.	—
1,52 сл.	1,50 25%	1,49 10%	1,49 сл.	—	1,49 сл.	1,55 сл.	1,55 сл.
1,47 сл.	1,46 сл.	1,48 сл.	—	1,48 40%	—	1,49 сл.	1,49 сл.

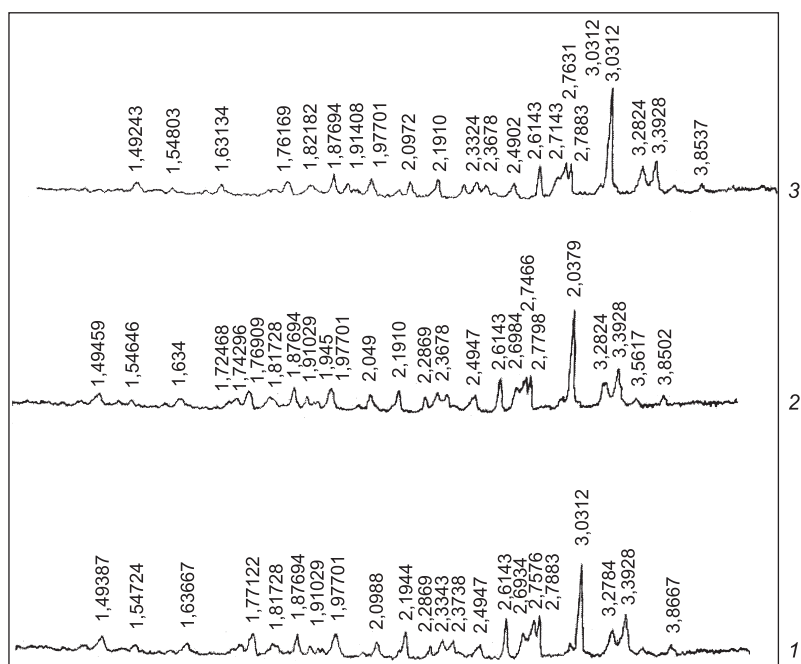


Рис. 1. Ионизационные рентгенограммы гидратированных образцов C_3S
 1 — без добавок СП; 2 — с добавкой С-3; 3 — с добавкой НФ

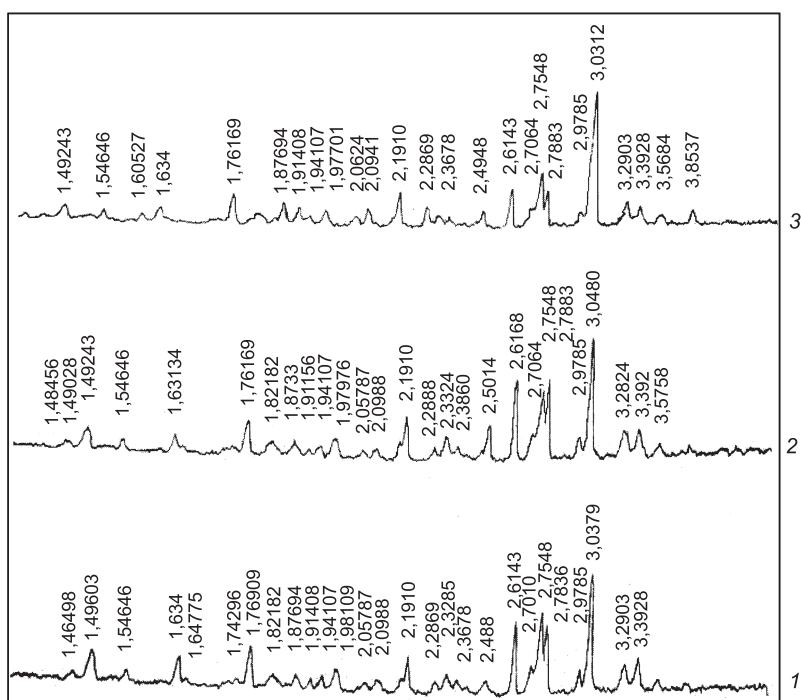


Рис. 2. Ионизационные рентгенограммы гидратированных образцов $\beta-C_2S$
 Условн. обозн. см. на рис. 1

сторону увеличения, так и в сторону уменьшения. Перестройка кристаллической решетки $\beta-C_2S$ вызвана взаимодействием этого минерала с водой. На ионизационных рентгенограммах гидратированных образцов C_3S наблюдается смещение линий только в сторону меньших углов, в сторону увеличения периодов идентичности кристаллической решетки C_3S , что

указывает на перестройку ее, вызванную взаимодействием C_3S с водой. Сравнивая ионизационные рентгенограммы гидратированных образцов β - C_2S и C_3S , можно сделать вывод, что линии β - C_2S более интенсивные, менее размытые, а в области больших углов меньше дублетов. Это указывает на лучшую степень закристаллизованности продуктов гидратации β - C_2S .

Анализ ионизационных рентгенограмм показал, что в образцах β - C_2S , гидратированных без добавок СП, присутствуют две фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,29 (20%); 3,04 (100%); 2,70 (70%); 2,61 (50%); 2,33 (сл.); 2,19 (25%); 2,10 (сл.); 2,06 (сл.); 1,94 (сл.); 1,65 (сл.); 1,54 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,39 (25%); 2,98 (10%); 2,78 (60%); 2,75 (60%); 2,49 (сл.); 2,37 (сл.); 2,29 (сл.); 1,98 (10%); 1,87 (сл.); 1,82 (сл.); 1,77 (30%); 1,63 (25%).

Фазы формируются приблизительно в равных количествах.

В образцах β - C_2S , гидратированных в присутствии СП С-3, наблюдаются также две фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,28 (20%); 3,05 (100%); 2,79 (60%); 2,70 (20%); 2,62 (60%); 2,29 (сл.); 2,19 (30%); 2,10 (сл.); 2,06 (сл.); 1,91 (сл.); 1,76 (30%); 1,55 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,57 (сл.); 3,39 (20%); 2,98 (10%); 2,75 (50%); 2,50 (30%); 2,39 (сл.); 1,98 (10%); 1,94 (сл.); 1,87 (сл.); 1,82 (сл.); 1,63 (сл.).

СП С-3 препятствует кристаллизации этих фаз, так как относительная интенсивность линий этих фаз в присутствии СП С-3 меньше. Фаза C_2SH (А) преобладает.

В образцах β - C_2S , гидратированных в присутствии СП НФ, наблюдаются три фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,29 (10%); 3,03 (100%); 2,79 (20%); 2,70 (10%); 2,61 (25%); 2,29 (10%); 2,19 (20%); 2,09 (<10%); 2,06 (сл.); 1,91 (сл.); 1,76 (20%); 1,60 (сл.); 1,55 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,57 (сл.); 3,39 (сл.); 2,98 (<10%); 2,75 (40%); 2,50 (10%); 2,37 (сл.); 1,98 (сл.); 1,94 (сл.); 1,82 (50%); 1,63 (сл.);

— фаза C_2SH (С): линии (\AA) — 3,85 (сл.); 3,03 (100%); 2,70 (10%); 1,88 (10%).

Суперпластификатор НФ, внедряясь в кристаллическую решетку β - C_2S , создает большие стерические затруднения, чем С-3, поэтому формируется больше фаз. Преобладает фаза C_2SH (А).

В образцах минерала C_3S , гидратированных без добавок СП, присутствуют три фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,28 (20%); 3,03 (100%); 2,79 (50%); 2,70 (40%); 2,61 (50%); 2,29 (сл.); 2,19 (30%); 2,09 (сл.); 1,91 (сл.); 1,64 (сл.); 1,55 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,39 (45%); 2,97 (30%); 2,76 (45%); 2,50 (сл.); 2,37 (сл.); 1,98 (20%); 1,82 (сл.); 1,77 (20%);

— фаза C_2SH (С): линии (\AA) — 3,86 (сл.); 3,03 (100%); 2,50 (сл.); 2,33 (сл.); 1,88 (15%).

Преобладает фаза C_2SH (А).

Нестехиометричность и дефектность структуры C_3S являются причиной формирования в кристаллической решетке минерала нескольких фаз под действием воды.

В образцах C_3S , гидратированных в присутствии СП С-3, наблюдаются три фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,28 (25%); 3,03 (100%); 2,70 (25%); 2,61 (35%); 2,29 (10%); 2,19 (15%); 2,09 (10%); 1,91 (сл.); 1,77 (10%); 1,74 (сл.); 1,72 (сл.); 1,55 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,56 (сл.); 3,39 (40%); 2,97 (30%); 2,78 (35%); 2,75 (30%); 2,50 (10%); 2,37 (10%); 1,98 (15%); 1,94 (сл.); 1,82 (сл.); 1,63 (сл.);

— фаза C_2SH (С): линии (\AA) — 3,85 (сл.); 3,03 (100%); 2,50 (10%); 1,88 (10%).

В присутствии СП С-3 формируются те же фазы, но относительная интенсивность их линий меньше вследствие меньшей степени закристаллизованности образовавшихся фаз. Преобладает фаза C_2SH (А).

В образцах C_3S , гидратированных в присутствии СП НФ, присутствуют три фазы:

— фаза C_2SH (А): линии (\AA) — 3,28 (30%); 3,03 (100%); 2,71 (20%); 2,61 (40%); 2,25 (40%); 2,19 (10%); 2,09 (<10%); 1,91 (сл.); 1,76 (сл.); 1,55 (сл.);

— фаза C_2SH (В): линии (\AA) — 3,39 (40%); 2,98 (сл.); 2,79 (40%); 2,76 (40%); 2,49 (<10%); 2,37 (сл.); 1,98 (10%); 1,82 (сл.); 1,63 (сл.);

— фаза C_2SH (С): линии (\AA) — 3,85 (сл.); 3,03 (100%); 2,49 (<10%); 2,33 (сл.); 1,88 (–10%).

Относительная интенсивность линий выделившихся фаз меньше в присутствии СП НФ, чем без этого СП.

С добавкой СП НФ фазы C_2SH (А) и C_2SH (В) формируются в равной степени. Во всех случаях фаза C_2SH (С) формируется хуже.

По Калоусеку, фазы, выделяющиеся при гидратации β - C_2S и C_3S , имеют состав:

C_2SH (А): $1,8 \div 2,4 \text{ CaO-SiO}_2 \cdot 1 \div 1,25 \text{ H}_2\text{O}$;

C_2SH (В): $1,75 \div 2,4 \text{ CaO-SiO}_2 \cdot 1,1 \div 1,5 \text{ H}_2\text{O}$;

C_2SH (С): $1,75 \div 2,25 \text{ CaO-SiO}_2 \cdot 0,3 \div 0,4 \text{ H}_2\text{O}$.

Как видно, взаимодействие минералов β - C_2S и C_3S с водой при данных условиях синтеза происходит непрерывно и приводит к образованию нескольких бертоллидных фаз, твердых растворов внедрения с различными областями гомогенности по СаО и H_2O . В кристаллической решетке β - C_2S атомы кальция находятся в двух валентных состояниях. Поэтому при гидратации β - C_2S образуются две фазы и только в присутствии СП НФ появляется третья фаза. При гидратации C_3S образуются три фазы как в отсутствии добавок СП, так и в их присутствии. При соприкосновении β - C_2S с водой молекулы воды адсорбируются как на атомах кальция, кремния, так и на атомах кислорода. Расстояние между атомами Са_{II} и кислорода больше, чем Са_I–О и еще больше, чем Si–О. Поэтому рвутся связи Са_{II}–О и сразу же нарушается координационная насыщенность атомов кальция.

Атомы Са_{II}, находящиеся в пустотах структуры между тетраэдрами, начинают диффундировать в кристаллической решетке с тем, чтобы занять в ней такое положение, которое привело бы к валентной (координационной) насыщенности. Диффузия в твердом кристаллическом веществе, несмотря на дефекты, протекает медленно. Поэтому катионы кальция при наличии связанной воды в структуре не успевают сформировать колонки из Са_{II}–О, а просто статистически распределяются в кристаллической решетке, образуя области гомогенности, состоящей из большого числа химических соединений, отличающихся друг от друга разным чис-

лом атомов в элементарной ячейке. Эти соединения как бы продолжают друг друга, простираясь от 1,8 CaO до 2,4 CaO. Разрушение колонок из $\text{Ca}_{II}\text{—O}$ приводит к разрушению колонок и из $\text{Ca}_I\text{—O}$, их перестройке и миграции атомов Ca_I . Поэтому при гидратации $\beta\text{-C}_2\text{S}$ образуются только две фазы переменного состава, два бертоллида. Громоздкие молекулы СП С-З адсорбируются только на катионах кальция и кремния и способствуют более быстрому разрыву связи Ca—O , диспергируют структуру и создают стерические затруднения при формировании новых фаз в недрах старой кристаллической решетки $\beta\text{-C}_2\text{S}$. Такое же действие оказывает и СП НФ, но стерические затруднения СП НФ больше, поэтому формируются три фазы переменного состава, хотя преобладают две — C_2SH (А) и C_2SH (В).

В кристаллической решетке C_3S атомы кальция находятся в трех валентных состояниях: в островном кремнекислородном мотиве, в первой полусфере остатка решетки CaO и во второй полусфере остатка решетки CaO. Расстояния Ca—O в этой части структуры C_3S меняются. Значит, меняется и валентность (координационное число) Ca. Разность длин Si—O -связей в SiO_4 -тетраэдрах колеблется в пределах 0,1–0,15 Å. Значительная часть ионов Ca^{2+} в C_3S имеет несимметричное окружение. При соприкосновении C_3S с водой молекулы воды адсорбируются как на катионах кальция и кремния, так и атомах кислорода. Связь Ca—O рвется там, где она длиннее, а значит, и слабее. Нарушается координация катионов кальция, молекулы воды, внедрившиеся в кристаллическую решетку C_3S , также нарушают координацию кальция. Это является причиной перестройки кристаллической решетки C_3S . Катионы кальция перемещаются на такие расстояния, чтобы было реализовано валентное насыщение. Перемещаясь, катионы кальция попадают в новое окружение, в связи с чем координационное число атомов меняется. Так как катионы кальция перемещаются в кристаллической решетке, то этот процесс протекает медленно. При этом состав непрерывно меняется, что приводит к образованию областей гомогенности (однородности) по CaO и H_2O . Области гомогенности включают в себя множество химических соединений с разным числом атомов в элементарной ячейке. Так как в C_3S кальций находится в трех валентных состояниях, то и формируются три фазы переменного состава. Роль СП С-З и НФ сводится к диспергированию частиц C_3S и к созданию стерических затруднений при формировании фаз переменного состава.

Структуры кристаллических решеток $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и C_3S дефектны. В основном это точечные дефекты-вакансии, одномерные дефекты-дислокации. Вводя молекулы СП С-З в кристаллические решетки $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и C_3S , делаем их более активными, реакционноспособными. Однако в присутствии данных СП и большом водотвердом отношении формируется только ближний порядок в структуре ГСК.

МАКРИДИН Н. И., д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ВЕРНИГОВА В. Н., д-р хим. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

МАКСИМОВА И. Н., канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ОВСЮКОВА Ю. В., асп.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 11.02.09

Makridin N. I., doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Vernigorova V. N., doctor of chemical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Maksimova I. N., candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Ovsyukova Yu. V., post graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

CALCIUM HYDROCILICATES PHASE CONSTITUENT PECULIARITIES DEPENDING ON THE KIND OF SUPER PLASTICIZER

Calcium hydrociliates phase constituencies' peculiarities depending on the kind of super plasticizer. The influence of super plasticizer C-3 additives and dispraiser $H\Phi$ on the phase constituent of the forming calcium hydrociliates in the process of mineral $\beta-C_2S$ и C_3S hydration is researched on the basis of ionized analysis...

calcium hydrociliates, phase constituent, ionized X-rays, super plasticizer, cement minerals, crystalline grates, chemical tie, structural defects.

УДК 691.327:666.974.2

А. И. ХЛЫСТОВ

ХИМИЧЕСКОЕ СВЯЗЫВАНИЕ НЕОРГАНИЧЕСКИХ ТУГОПЛАВКИХ ОТХОДОВ — ОДИН ИЗ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ИХ УТИЛИЗАЦИИ

Представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований по замене дорогостоящих технических материалов (порошкообразных тугоплавких оксидов) в составах фосфатных жаростойких композитов вторичными минеральными ресурсами (отходами промышленности). Описывается новый способ получения воздушно-твердеющих фосфатных связующих и бетонов на их основе. Предлагается способ повышения физико-термических свойств штучных огнеупоров путем применения химически активных фосфатных связующих для структурно-химической модификации...

безотходные технологии, безобжиговые огнеупорные композиты, оксиды, гидроксиды металлов.

Одна из важных экологических проблем — создание безотходных технологий производства материалов, обладающих высокими физико-термическими свойствами, для конструкций футеровок тепловых агрегатов. Футеровки промышленных печей, как известно, работают в сложных физико-химических условиях (высокая температура, агрессивная газовая среда, прямой контакт материала футеровки с расплавами металлов и сплавов, расплавами флюсов). В последние годы были разработаны принципы получения безобжиговых огнеупорных композитов (жаростойких растворов, бетонов, набивных масс) с повышенными сроками службы в качестве футеровочного материала. Применительно к жаростойким бетонам, относящимся к безобжиговым многокомпонентным композитам, использование данных принципов открывает широкие возможности по созданию новых футеровочных материалов с заданными свойствами.

Из всего набора минеральных вяжущих веществ (портландские и глиноземистые цементы, жидкое стекло и силикат-глыба) наибольшей химической активностью к оксидам и гидроксидам, из которых состоит большинство промышленных отходов, обладают фосфатные связующие.

Установлено, что основным фактором, определяющим возможность применения оксидов и гидроксидов для получения фосфатных связующих, является тепловой эффект реакций $Me_nO_m + H_3PO_4$ и $Me(OH)_n + H_3PO_4$.

Интенсивность химического взаимодействия оксида или гидроксида с ортофосфорной кислотой, очевидно, будет тем активнее, чем меньше плотность упаковки ионов твердого вещества или, что то же самое, чем меньше ионная плотность [1]. Вместе с тем, структура твердой фазы зависит от энергии единичной связи между катионами—анионами. Следовательно, чем больше энергия единичной связи между катионами—анионами, тем будет устойчивее структура твердой фазы. Таким образом, способность оксидов или гидроксидов металлов взаимодействовать с ортофосфорной кислотой с выделением или поглощением теплоты и образовывать твердеющие с ней композиции можно считать характеристикой их активности и представить в виде функции:

© Хлыстов А. И., 2009

$$K_a = f(P_i \cdot \epsilon), \quad (1)$$

где K_a — коэффициент активности оксида или гидроксида;
 P_i — ионная плотность оксида или гидроксида, определяемая по формуле проф. А. А. Новопашина [1];

ϵ — энергия единичной связи катионов с кислородом для оксидов металлов, кДж/моль.

Для гидроксидов необходимо принимать энергию единичной связи соответствующих оксидов.

Ранее [2] было определено выражение для вычисления коэффициента активности оксидов:

$$K_a = \frac{185}{P_i \cdot \epsilon}. \quad (2)$$

Данное выражение, как показали исследования, пригодно также и для гидроксидов.

Коэффициент активности оксидов и гидроксидов, определяемый по их структурно-энергетическим характеристикам, является основой проектирования составов фосфатных связующих, твердеющих в заданных условиях.

Согласно этому коэффициенту оксиды и одновременно гидроксиды подразделяются на группы по степени их активности (не твердеющие в композиции с H_3PO_4 в нормальных условиях, твердеющие и бурно взаимодействующие). Величины коэффициента активности и теплового эффекта позволяют достоверно подбирать составы различных фосфатных композиций для получения связующих, твердеющих в естественных (нормальных) условиях.

По химическому составу любого техногенного неорганического продукта можно определить его коэффициент активности и спрогнозировать процесс фосфатного связывания, т. е. оценить условия применения тех или иных сырьевых компонентов для синтезирования жаростойких композиций.

При изучении физико-механических свойств, а также химсостава железосодержащих отходов серно-кислотной промышленности — пиритных огарков с химзаводов (г. Череповец Вологодской обл.; г. Воскресенск Московской обл.) было установлено, что они могут быть использованы в качестве тонкомолотого компонента железифосфатного связующего. В естественном состоянии пиритные огарки представляют собой тонкодисперсный порошок, в состав которого входят до 70% Fe_2O_3 , 5...6% FeO и 14...24% SiO_2 . Кроме того, физико-химическими методами исследований (ДТА, ИК-спектроскопия) было обнаружено наличие гидроксида железа $Fe(OH)_3$, количество его может достигать 18%. Оксид трехвалентного железа Fe_2O_3 при нормальной температуре взаимодействует с ортофосфорной кислотой H_3PO_4 очень медленно, поэтому требуется подогрев смеси до 70 °С, так как собственной теплоты по реакции выделяется недостаточно:



Оксид двухвалентного железа FeO , а также гидроксид $Fe(OH)_3$, наоборот, реагируют с кислотой энергично, выделяя при этом значительное количество теплоты. Так, оксид двухвалентного железа активно взаимодействует с ортофосфорной кислотой при температуре 20 °С. Цементное

тесто начинает схватываться через 2 мин за счет значительного выделения теплоты:



Поскольку активность гидроксидов по отношению к кислотам значительно выше по сравнению с оксидами, то выделение теплоты в композиции $\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{H}_3\text{PO}_4$ будет происходить интенсивнее. В связи с этим использование оксидов и гидроксидов железа в отдельности связано с преодолением обычных для фосфатных связующих трудностей: либо требуется частичная нейтрализация ортофосфорной кислоты в случае применения FeO и $\text{Fe}(\text{OH})_3$, либо бетонную смесь нужно подогреть для обеспечения твердения в случае применения Fe_2O_3 .

Как показали исследования, в пиритных огарках оксиды железа находятся в оптимальном соотношении: оксид двухвалентного железа, так же как $\text{Fe}(\text{OH})_3$, быстро реагирует с H_3PO_4 и разогревает смесь до необходимой температуры для проявления вяжущих свойств Fe_2O_3 с H_3PO_4 . В случае использования пиритных огарков после гидроудаления их приходится сушить при температуре 100...120 °С. Фосфатное связующее, полученное путем затворения пиритных огарков 70%-й ортофосфорной кислотой, начинает схватываться через 45...50 мин и через 2...2,5 ч затвердевает. В дальнейшем по мере увеличения содержания в цементном камне ортофосфатов железа прочность его растет примерно прямо пропорционально времени твердения в воздушных условиях и в 7-суточном возрасте стабилизируется на уровне 55,0...60,0 МПа. Таким образом, железозосфатное связующее по основным свойствам аналогично портландцементу марки 500, но контрольный срок его твердения равен 7 сут. Жаростойкие бетоны на основе железозосфатного связующего в нормальных условиях твердения в суточном возрасте приобретают прочность, достаточную для распалубки, транспортировки и монтажа изделий. В 7-суточном возрасте они приобретают конечную прочность, величина которой определяется свойствами заполнителей.

Огнеупорность железозосфатного связующего равна 1300 °С, а рабочая температура футеровки из бетона, где применяется керамзит в качестве крупного заполнителя, составляет 1000 °С. При использовании в качестве заполнителя шамотных песка и щебня рабочая температура может достигать 1200 °С.

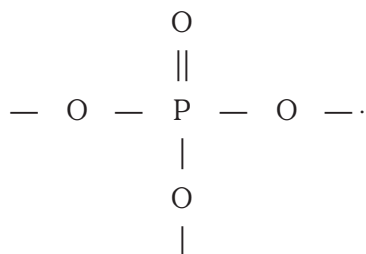
В целях увеличения температуры службы бетона на железозосфатном связующем в его состав достаточно ввести огнеупорные высокоглиноземистые, алюмосиликатные и цирконсодержащие тонкомолотые добавки.

Для получения смешанного алюможелезозосфатного связующего в качестве глиноземсодержащего компонента можно использовать технические продукты, такие как высокоглиноземистый муллитовый мертель ММЛ-62, технический глинозем, тонкодисперсный корунд и другие, а также отходы промышленности, например, алюмохромистые, высокоглиноземистые и алюмосиликатные отходы химии и нефтехимии: отработанный катализатор ИМ-2201 (70...75% Al_2O_3 и 13...15% Cr_2O_3); отработанный оксид алюминия (95...99% Al_2O_3) и др. Для получения смешанного цирконжелезозосфатного связующего можно использовать тонкомолотый цирконовый концентрат КЦ-1. При введении указанных компонентов в композицию пиритных огарков с ортофосфорной кислотой образуются смешанные вяжущие, обладающие иными свойствами, чем чистое железозосфатное. Огнеупорность смешанного железозосфатного вяжущего возрастает практически прямо пропорционально

количеству глинозем- и цирконсодержащего продукта, введенного в фосфатную композицию. Сроки схватывания смешанного вяжущего удлинятся, но даже при введении 80...90% глинозема, отработанного катализатора ИМ-2201 или отработанного оксида алюминия сохраняется способность фосфатного связующего схватываться в воздушных условиях и набирать прочность. При последующей термообработке прочность вяжущего возрастает за счет образования алюмофосфатов, цирконийфосфатов и хромфосфатов.

Таким способом удалось создать воздушно-твердеющее алюможелезофосфатное связующее с температурой применения 1500 °С и цирконжелезофосфатное связующее с температурой применения 1600 °С. Термостойкость цементного камня из синтезированных вяжущих превышает 30 теплосмен, т. е. она близка к термостойкости обычных алюмофосфатных и цирконфосфатных связующих.

На основе разработанных алюможелезофосфатного и цирконжелезофосфатного связующих были подобраны составы тяжелых жаростойких бетонов с шамотным и высокоглиноземистым заполнителями классов по прочности В30 и В35. Разработанные составы бетона можно применять для футеровок тепловых агрегатов химии и нефтехимии, цветной металлургии и котельных установок. Изучение химической стойкости новых фосфатных материалов в расплавах флюсов (криолит, карналит), металлического алюминия и его сплавов, легкоплавкого стекла (фритты, предназначенной для приготовления глазури) показало, что жаростойкие бетоны не смачиваются агрессивными расплавами. По химической стойкости фосфатные жаростойкие бетоны значительно превосходят штучные шамотные огнеупоры, т.е. алюмосиликатные. Повышенная химическая стойкость фосфатных материалов объясняется специфической структурой ортофосфатов, у которых расположенные на поверхности тетраэдры PO_4 обращены в сторону расплава кислородом, связанным с центральным атомом «Р» двойной связью и поэтому полностью пассивированным:



На этом фрагменте структуры ортофосфатов видно, что на поверхности структурной группы располагаются ионы кислорода с полностью компенсированным зарядом [3]. Эти соображения подтверждаются результатами наблюдений за поведением отдельных бетонных элементов футеровок печей для плавки алюминиевых сплавов. В связи с этим жаростойкие бетоны на фосфатных связующих из-за дороговизны следует применять в крайне редких случаях, т.е. в футеровках тепловых агрегатов с высокими химической агрессией и температурой.

Повышенные физико-термические показатели фосфатных связующих гарантируют им высокие температуры плавления конечных высокотемпературных фаз (фосфатов металлов). В результате теоретических исследований определена зависимость основного эксплуатационного показателя применяемого фосфатного связующего — температуры плавления от структурно-энергетических характеристик трех замещенных фосфатов. Вначале для фосфатов определяется фактор плав-

кости в зависимости от их ионной плотности и средней энергии связи по формуле

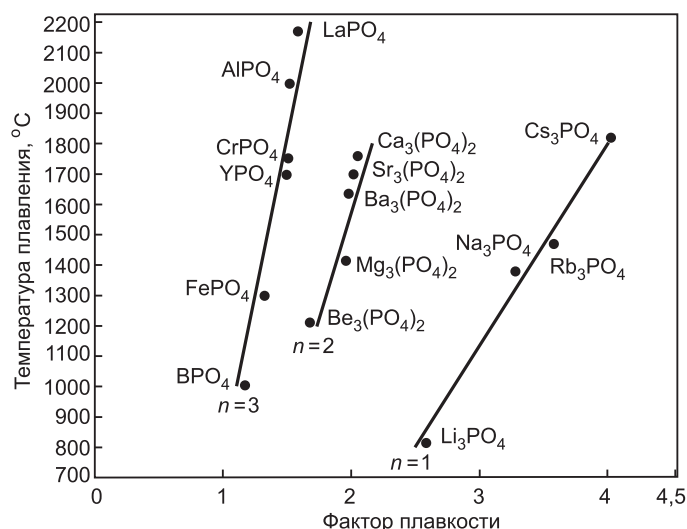
$$F = \frac{100}{\sqrt[3]{P_i \cdot \epsilon_{\text{ср}}}}, \quad (5)$$

где F — фактор плавкости;

P_i — ионная плотность трехзамещенного фосфата по А. А. Новопащину;

$\epsilon_{\text{ср}}$ — средняя энергия связи фосфата по Сану.

На рисунке представлены зависимости температуры плавления некоторых фосфатов металлов от их структурно-энергетических характеристик.



Зависимость температуры плавления фосфатов металлов от их структурно-энергетических характеристик

Полученные прямые адекватно описывает следующая математическая формула

$$t_{\text{пл}} = 376,8 \cdot n \cdot F, \quad (6)$$

где $t_{\text{пл}}$ — температура плавления фосфата, °C;

n — валентность катиона;

F — фактор плавкости, определенный по (5).

Для повышения физико-термических показателей штучных керамических огнеупоров и жаростойких композитов на основе гидравлических вяжущих были проведены эксперименты по структурно-химической модификации футеровочных материалов с помощью ортофосфорной кислоты, а также на основе реакционноактивных растворов на базе водорастворимых фосфатных связующих. Данные связки готовились в результате синтеза активного глиноземсодержащего шлама, состоящего в основном из гидроксида $\text{Al}(\text{OH})_3$ (шлам щелочного травления алюминия Самарского металлургического завода), с ортофосфорной кислотой определенной концентрации. Содержание Al_2O_3 в шламе и P_2O_5 в затворителе подбирались из расчета получения кислых водорастворимых алюмофосфатов. Присутствие в шламе щелочи в виде NaOH способствовало повышению температуры и быстрому растворению основного компонента шлама $\text{Al}(\text{OH})_3$.

Кислые алюмофосфатные связки (АФС) типов $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$ и $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ оказались реакционноактивными жидкостями — модификаторами не только штучных керамических огнеупоров, но и огнеупорных

композитов (жаростойких бетонов гидравлического твердения). Процесс структурно-химической модификации заключался в нагнетании водорастворимых фосфатных связок в поры огнеупорных композитов. При этом возможно использовать практически все технологические приемы при изготовлении бетонополимеров [4].

Результаты экспериментов по химической модификации некоторых керамических материалов с помощью АФС представлены в таблице.

Как видно из таблицы, прочностные показатели, а также плотность шамотного огнеупора при высоких температурах обжига повышаются. Это связано с химической активностью жидкости — модификатора $(\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3)$, способствующей при высоких температурах образованию в пористой структуре огнеупорной керамики стабильных силико- и алюмофосфатов, обладающих повышенной тугоплавкостью. Для подтверждения высказанных предположений были проведены соответствующие физико-химические исследования с использованием огнеупорной керамики как алюмосиликатного, так и высокоглиноземистого состава.

Влияние пропитки керамических материалов водорастворимой алюмофосфатной связкой $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$ и последующего нагрева на их физико-механические свойства

Заполнитель	Средняя плотность ρ_0 , г/см ³ , в числителе и предел прочности при сжатии R , МПа, в знаменателе образцов после термообработки при 200°С и последующего нагрева до температуры, °С					
	200	500	800	1000	1200	1500
Шамот, не подвергнутый пропитке	$\frac{1,93}{20,60}$	$\frac{2,01}{19,70}$	$\frac{2,08}{23,70}$	$\frac{2,05}{20,80}$	$\frac{2,03}{19,60}$	$\frac{2,08}{29,60}$
Шамот, пропитанный $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$	$\frac{2,15}{47,60}$	$\frac{2,18}{41,00}$	$\frac{2,10}{36,80}$	$\frac{2,12}{34,00}$	$\frac{2,10}{39,50}$	$\frac{2,00}{40,70}$
Керамзит, не подвергнутый пропитке	$\frac{0,75}{2,60}$	$\frac{0,76}{2,40}$	$\frac{0,74}{2,10}$	$\frac{0,72}{1,90}$	Образцы расплавились	—
Керамзит, пропитанный $\text{Al}_2(\text{HPO}_4)_3$	$\frac{1,10}{3,80}$	$\frac{1,03}{4,80}$	$\frac{1,05}{4,50}$	$\frac{1,13}{4,90}$	$\frac{1,12}{5,20}$	—

Физико-химические исследования образцов модифицированных керамических огнеупоров, а также жаростойких бетонов на синтезированных композиционных вяжущих осуществлялись с использованием рентгеноструктурного, дифференциально-термического, петрографического анализов, а также электронной микроскопии и др. Структурно-химическая модификация была опробована также при ремонте футеровок тепловых агрегатов, выполненных как из штучных керамических огнеупоров, так и из монолитных жаростойких бетонов с помощью активных пропиточно-обмазочных составов.

Применение такого способа ремонта футеровок с помощью структурно-химической модификации показало следующее:

— происходит поверхностное взаимодействие реакционноактивных кислых фосфатов с соединениями футеровочного материала с образованием тугоплавких фосфатов;

— образуется контактный переходный слой, компенсирующий термические деформации при нагревании;

— формируется защитный слой на базе фосфатных связующих, обладающий высокой адгезией и когезией к ремонтируемой поверхности.

В целом использование неорганического техногенного сырья в композиции с фосфатными связками позволяет получать целый комплекс материалов специального назначения: жаростойкие бетоны и растворы, жидкие фосфатные связки и т. д. Данные материалы с экологической

точки зрения могут быть востребованы непосредственно на тех же предприятиях, где они образовались, что является значительным шагом к переходу к безотходным технологиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новопашин, А. А. Минеральная часть поволжских сланцев [Текст]/А. А. Новопашин.— Куйбышев: Куйбышев. кн. изд-во, 1973.— 119 с.
2. Новопашин, А. А. Получение желез фосфатных связующих для жаростойких бетонов [Текст]/А. А. Новопашин, А. И. Хлыстов//Изв. вузов. Строительство и архитектура.— 1982.— № 2.— С. 64–68.
3. Хлыстов, А. И. Повышение эффективности и улучшение качества огнеупорных футеровочных материалов: монография [Текст]/А. И. Хлыстов; Самарск. ГАСУ.— Самара, 2004.— 134 с.
4. Баженов, Ю. М. Технология бетонов [Текст]/Ю. М. Баженов: учеб. пособие.— М.: изд-во АСВ, 2007.— 528 с.

ХЛЫСТОВ А. И., д-р техн. наук, доц.

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

Получено 27.11.08

Khlystov A. I., doctor of technical sciences, assistant professor, Samara State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

THE CHEMICAL BINDING OF NON-ORGANIC REFRACTORY WASTE: AN ECOLOGICAL WAY OF UTILIZATION

The study presents the theoretical background and experimental results of substituting expensive technical materials (powder refractory oxides) by secondary mineral resources (industrial waste) in heat resisting phosphate composites. A new approach to creating the air-hardening phosphate binding and concrete out of it is described.

The way to increase the physical-thermal properties of fire proof structures by application of the chemically active phosphate binding for structural-chemical modification is also presented...

chemical binding, industrial waste, phosphates, fire-proof concrete.

REFERENCES

1. Novopashin, A. A. The mineral component of the Volga slates [Text]/A. A. Novopashin.— Kuibyshev: Kuibyshev Book Publishing Company, 1973. — 119 p.
2. Novopashin, A. A. Receiving ferrum-phosphate binding for heat-resisting concrete [Text]/A. A. Novopashin, A. I. Khlystov//University News. Building Construction and Architecture.— 1982.— N 2.— P. 64–68.
3. Khlystov, A. I. Increasing the effectiveness and improving quality of fire-proof refractory materials. Monograph [Text]/A. I. Khlystov; Samara State University of Architecture and Civil Engineering.— Samara, 2004.— 134 p.
4. Bazhenov, Y. M. The technology of concrete [Text]/Y. M. Bazhenov: the study guide.— M.: ABC Publishing, 2007.— 528 p.

УДК 691.175.002.3

В. П. СУЧКОВ, А. А. МОЛЬКОВ

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРУДНОГОРЮЧЕГО ПЕНОПОЛИУРЕТАНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФОСФОГИПСА

Рассмотрено решение экологической проблемы, связанной с образованием и хранением фосфогипса. Предложен простой в реализации метод, позволяющий значительно снизить пожарную опасность жесткого пенополиуретана. Реализация предложенного способа снижения пожарной опасности пенополиуретана осуществляется за счет введения антипирена одновременно с гипсосодержащим наполнителем...

пенополиуретан, фосфогипс, огнестойкость, антипирен, гипсосодержащий наполнитель.

В настоящее время в России ежегодно накапливается около 20 млн т гипсосодержащих отходов. Несмотря на то, что на большинстве предприятий стремятся к созданию мало- и безотходных технологий, на практике часто на 1 т полезной продукции приходится несколько тонн гипсосодержащих отходов. Самым распространенным гипсосодержащим отходом во всем мире является фосфогипс. При получении 1 т фосфорной кислоты образуется 4–5 т фосфогипса, аналогично складывается ситуация при производстве фосфатных удобрений. Накоплено уже значительное количество фосфогипса, который, как правило, хранится в отвалах. Необходимость транспортирования и хранения фосфогипса заметным образом усложняет эксплуатацию предприятий и даже при соблюдении всех требований органов санитарного надзора ухудшает санитарное состояние площадки завода и экологическую обстановку прилегающей к нему территории. Фосфогипс отравляет почву и водоемы содержащимися в нем растворимыми примесями фтора и фосфорной кислоты. Как показывают исследования почвы, в 2-километровой зоне около отвалов фосфогипса наблюдается превышение ПДК по фторидам в 5–20 раз, содержанию растворимых сульфатов в 10–100, фосфатов в 2–5 и кальция в 2–15 раз по сравнению с фоном.

Для создания отвалов фосфогипса приходится постоянно отчуждать большие участки земель, иногда обрабатываемые, причем эти площадки нередко превышают размеры промышленных площадок самих предприятий [1]. В связи с этим в настоящее время ставится вопрос о закрытии ряда предприятий по причине невозможности выделения земли под отвалы.

Одним из основных направлений утилизации фосфогипса является получение на его основе гипсовых вяжущих. На втором месте находится его использование в технологии производства портландцемента. Заслуживают внимания и другие пути утилизации фосфогипса: производство сульфидизатора для шахтной плавки окисленных никелевых руд, синтез низкотемпературного белита на основе фосфогипса, изготовление серной кислоты и извести [2]. Также фосфогипс предлагается использовать в сельском хозяйстве.

Однако практически все технологии, направленные на переработку фосфогипсов, связаны с введением дополнительных технологических операций, что приводит к значительному усложнению технологии и соот-

ветственно к дополнительным капитальным затратам. По этой причине материалы и изделия из попутного продукта не могут конкурировать с аналогичной продукцией на основе природного гипсового камня. В этой связи проблема переработки фосфогипса остается актуальной до сих пор.

Другой важной проблемой в строительстве является высокое потребление энергетических ресурсов на отопление зданий различного назначения. Энергопотребление зданий составляет около 43 % от всей вырабатываемой тепловой энергии, из которой 90 % идет на отопление. Затраты на отопление в нашей стране в 2–2,5 раза выше, чем в западно-европейских странах. Огромное количество тепловой энергии, ежегодно поставляемой на обогрев зданий различного назначения, расходуется на теплопотери, т.е. по сути на отопление улицы, что наносит не только значительный экономический урон, но и внушительный экологический ущерб. Последнее обстоятельство требует разработки и применения высокоэффективных теплоизоляционных материалов.

Среди обширного класса теплоизоляционных материалов жесткие пенополиуретаны (ППУ) занимают заметное место как наиболее высокоэффективный теплоизоляционный материал с уникальным комплексом физико-механических свойств.

Благодаря малому коэффициенту теплопроводности, большому диапазону плотностей, хорошей совместимости с минеральными и другими материалами, гибкости технологии и возможности переработки различными методами, более других широко используют в различных отраслях промышленности жесткие ППУ [3]. Основные области потребления жесткого пенополиуретана — строительство, теплоизоляция трубопроводов, производство домашних холодильников и промышленных рефрижераторов, транспорт, мебельная промышленность и судостроение.

Несмотря на высокие показатели физических и механических свойств, пенополиуретан только начинает завоевывать российский рынок теплоизоляционных материалов. Это обстоятельство объясняется, во-первых, тем, что пенополиуретан пока имеет достаточно высокую стоимость, хотя этот недостаток компенсируется за счет высоких эксплуатационных свойств (в частности долговечность пенополиуретанов составляет порядка 50 лет), и низкую удельную материалоемкость при производстве теплоизоляционных работ с его применением. Во-вторых, существенным фактором, сдерживающим применение пенополиуретана на строительных площадках России, является его высокая пожарная опасность. Пенополиуретан чаще всего относят к горючим материалам средней воспламеняемости. Он легко загорается от кратковременного действия малокалорийных источников поджигания, горит, выделяя большое количество тепла и дыма с резким запахом.

В связи с этим нами предложено техническое решение двух проблем: утилизация фосфогипса и получение трудногорючих ППУ.

Снижение горючести полимеров основано на следующих способах [4].

1. Огнезащита устойчивыми к пламени материалами подразумевает покрытие плитками, листами из негорючих или трудносгораемых материалов изделий из горючих материалов. Преимущества огнезащитных покрытий — простота изготовления и сравнительно небольшая стоимость работ. Главный недостаток этого способа заключается в отслаивании покрытий от основного горючего материала. При этом возрастает вероятность загорания основного материала.

2. Введение наполнителей приводит к некоторому снижению горючести. Наполнители широко используются для получения материалов с заданными технологическими и эксплуатационными свойствами и снижения их стоимости. Основной недостаток аналогичен указанному для вышеприведенного способа (расслаивание при повышенных температурах),

а эффект снижения горючести от введения наполнителей, как правило, оказывается незначительным.

3. Введение антипиренов и составов, замедляющих горение, в полимерные материалы заключается обычно в равномерном распределении этих веществ в объеме материала. Этот способ более эффективен по сравнению с предыдущими. Основным недостатком этого способа является в ряде случаев увеличение горючести материала в процессе его эксплуатации, поскольку введенные замедлители горения могут «выпотевать», вымываться или иным способом выделяться из материала. Следует также отметить, что введение антипиренов в малых количествах зачастую малоэффективно, а увеличение их концентрации приводит к существенному снижению физико-механических свойств материала.

4. Модификация самих полимерных материалов с целью снижения их горючести. Применение этого способа позволяет уменьшить вероятность диффузии элементов замедлителей горения в области 200–350 °С. Однако модификация нередко приводит к существенному изменению свойств материала. Кроме того, модификация требует некоторого изменения технологического процесса, что ведет к повышению себестоимости изделий.

Анализируя способы снижения горючести, можно сделать вывод, что для снижения пожарной опасности теплоизоляции на основе пенополиуретана нет однозначного способа решения поставленной задачи. Проведя эксперименты по наполнению пенополиуретана гипсосодержащим наполнителем и антипиреном в отдельности, было установлено, что образцы пенополиуретана имеют повышенную огнестойкость в сравнении с ненаполненными, что говорит о некоторой эффективности их введения в пенополиуретан. Однако эффект снижения горючести при введении гипсового наполнителя оказывается недостаточным для перевода материала в класс трудногорючих. Введением антипирена в количестве более 30% по массе удалось получить трудногорючий пенополиуретан, но при этом наблюдалось значительное снижение физико-механических свойств.

Исходя из этого, предложен комбинированный метод снижения горючести пенополиуретана, основанный на введении гипсосодержащего наполнителя совместно с антипиреном.

Добиваясь снижения горючести, необходимо следить за тем, чтобы физико-механические и другие эксплуатационные свойства получаемого теплоизоляционного материала не ухудшались. Анализ определения физико-механических свойств показал, что введение в пенополиуретан совместно с антипиреном гипсового наполнителя позволяет получить теплоизоляционный материал с улучшенными свойствами. Материал обладает повышенной прочностью, низким, порядка 3% по объему, водопоглощением. В образцах полностью исчезают воздушная усадка и набухание в воде. При этом происходит незначительное повышение плотности и коэффициента теплопроводности. Результаты определения физико-механических и пожарно-технических характеристик показаны в таблице.

Полученные при определении пожарно-технических характеристик результаты свидетельствуют о высокой эффективности данного способа модификации. При введении одновременно с антипиреном гипсосодержащего наполнителя происходит значительное усиление антипирирующего действия расширенного графита за счет выделения при повышении температуры содержащейся в фосфогипсе кристаллогидратной воды. Введением в пенополиуретан антипирена в количестве 5–9% совместно с 30% минерального наполнителя удается получить трудногорючий материал и понизить его класс горючести с Г4 до Г2. Получаемый по такой методике пенополиуретан имеет высокие физико-механические свойства, как было отмечено выше, и повышенную огнестойкость, что подтверждают показан-

**Физико-механические и пожарно-технические характеристики
наполненного пенополиуретана**

Содержание наполнителя, %	Содержание антипирена, %	Средняя плотность, кг/м ³	Прочность при 10 % деформации, МПа	Максимальное приращение температуры, °С	Потеря массы, %	Горючесть
10	5	49	0,12	392	59	Горючий
30	5	68	0,16	302	55	
50	5	101	0,19	250	44	Трудногорючий
10	10	51	0,11	302	52	Горючий
30	10	71	0,15	243	41	Трудногорючий
50	10	105	0,19	224	28	
10	15	56	0,11	286	40	Горючий
30	15	64	0,13	233	28	Трудногорючий
50	15	116	0,17	218	23	

тели потери массы при горении и максимальная температура газообразных продуктов горения.

Таким образом, в результате исследований разработана экологически безопасная технология утилизации фосфогипса за счет комплексного его использования в технологии полимерных теплоизоляционных строительных материалов. Также предложен оригинальный способ (защищенный патентом RU 2336283 C2) получения трудногорючего наполненного пенополиуретана с улучшенными физико-механическими свойствами за счет одновременного применения наполнителя — фосфогипса и антипирена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воробьев, Х. С. Состояние и перспективы использования вторичных продуктов и отходов промышленности в производстве строительных материалов [Текст]/Х. С. Воробьев//Строительные материалы.— 1985.— № 10.— С. 6–7.
2. Ахметов, А. С. Техничко-экономическая характеристика переработки фосфогипса на серную кислоту и вяжущие материалы [Текст]/А. С. Ахметов, Е. Б. Ярош//Технология минеральных удобрений.— Л., 1992.— С. 10–13.
3. Денисов, А. В. Жесткие пенополиуретаны теплоизоляционного назначения [Текст]/А. В. Денисов//Строительные материалы.— 2005.— № 6.— С. 21–22.
4. Кодолов, В. И. Замедлители горения полимерных материалов [Текст]/В. И. Кодолов.— М.: Химия, 1980.— 274 с.: ил.

СУЧКОВ В. П., канд. техн. наук, проф.

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

МОЛЬКОВ А. А., канд. техн. наук

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 16.03.09

Suchkov V. P., candidate of technical sciences, professor, Hishny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

Molkov A. A., candidate of technical sciences, Hishny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Russia

**A TECHNOLOGY FOR THE PRODUCTION
OF FIRE RETARDANT POLYURETHANE FOAM MATERIAL
WITH PHOSPHOGYPSUM ADDITIVE**

The authors suggest a solution to the environmental problems associated with production and storage of phosphogypsum. The proposed environmentally friendly process is designed for complex phosphogypsum by-product recycling and production of foamed plastic thermal insulation materials for building purposes. The technology is easy to implement and allows considerable reduction of fire risks involved in the use of rigid foam polyurethane in

buildings. This is achieved by introduction of a gypsum-based filler in combination with a fire retardant additive. The resulting material features high flame resistance and excellent physical and mechanical properties...

polyurethane foam, phosphogypsum, fire retardant additive, gypsum-based filler.

REFERENCES

1. Vorobjov, Kh. S. The state of the art and the prospects for industrial byproducts and wastes recycling in the production of building materials [Text]/Kh. S. Vorobjov//Building Materials.— 1985.— N 10.— P. 6–7.
 2. Akhmetov, A. S. Technical and economic characteristics of phosphogypsum recycling in the production of sulfuric acid and binding materials [Text]/A. S. Akhmetov, Ye. B. Yarosh//Mineral fertilizer production technology.— L., 1992.— P. 10–13.
 3. Denisov, A. V. Rigid polyurethane foam thermal insulation materials [Text]/A. V. Denisov//Building Materials.— 2005. — N 6.— P. 21–22.
 4. Kodolov, V. I. Fire retardants for polymeric materials [Text]/V. I. Kodolov.— M.: Khimiya, 1980.— 274 p.: ill.
-

УДК 691.55 : 666.92

В. И. ЛОГАНИНА, Н. А. ПРОШИНА, О. А. ДАВЫДОВА

ПРИМЕНЕНИЕ ДОБАВКИ ЗОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ КИСЛОТЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗВЕСТКОВЫХ ОТДЕЛОЧНЫХ СОСТАВОВ

Приведены сведения о влиянии добавки золя и его возраста на свойства известковых составов. Даны размеры частиц золя в зависимости от его возраста...

наполнитель, известь, пластическая прочность, прочность при сжатии, активность, оптическая плотность.

При разработке рецептуры известковых составов, предназначенных для реставрации памятников архитектуры, в качестве декоративного наполнителя применялся цветной песок Нижнеаблязовского месторождения (Пензенская обл., Кузнецкий р-н) [1]. Наполнитель представляет собой

Таблица 1
Гранулометрический состав
наполнителя

Содержание фракций, об. %		
песчаная 1–0,05 мм	пылеватая 0,05–0,005 мм	глинистая менее 0,005 мм
77	12,33	10,67

смесь песка и глины, имеющую красно-коричневый цвет. Гранулометрический состав наполнителя, определенный по методу Рутковского, представлен в табл. 1. Удельная поверхность $S_{уд} = 1318 \text{ см}^2/\text{г}$, средний диаметр частиц 17,17 мкм. Химический состав песка следующий, мас. %: SiO_2 — 89,34...95,48;

Al_2O_3 — 2,45...5,06; Fe_2O_3 — 0,11...0,39; п.п.п. — 0,32...1,10. Содержание пигмента в песке $97 \text{ кг}/\text{м}^3$.
Для подбора оптимальной гранулометрии цветного песка испытывались образцы, приготовленные на молотом песке с удельной поверхностью $S_{уд} = 5065 \text{ см}^2/\text{г}$, а также песке фракции 2,5...0,14 мм и двухфракционном песке с соотношением фракций 0,63...0,315 – 50 % и 2,5...1,25 – 50 %. Удельная поверхность известки составляла $S_{уд} = 5590 \text{ см}^2/\text{г}$. Образцы-кубы изготавливали из известково-песчаной смеси с водоизвестковым отношением В/И = 1, 2 и В/И = 2. Оценивались пластическая прочность растворной смеси и кинетика набора прочности при сжатии. Результаты исследований приведены на рис. 1 и в табл. 2.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, свидетельствует, что с увеличением известково-песчаного отношения И:П наблюдается ускорение набора пластической прочности. Так, спустя 12 ч после затворения пластическая прочность состава с И:П = 1:4 составляла 0,03 МПа (кривая 3), а при соотношении И:П = 1:2 — 0,0024 МПа (кривая 1). Приготовление смеси состава 1:2 на двухфракционном песке так-

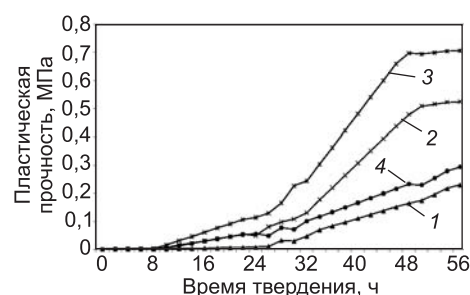


Рис. 1. Влияние количества и фракции песка на пластическую прочность смеси
1 — И:П = 1:2 (фр. 2,5–0,14); 2 — И:П = 1:3 (фр. 2,5–0,14); 3 — И:П = 1:4 (фр. 2,5–0,14); 4 — И:П = 1:2 (двухфракционный песок)

© Логанина В. И., Прошина Н. А., Давыдова О. А., 2009

Таблица 2

Соотношение известь:песок = И:П (фракция песка 2,5–0,14), В/И = 1, 2	Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа
1:2	0,51
1:3	0,69
1:4	0,81
Соотношение известь:песок = И:П = 1:3 (молотый песок $S_{уд} = 5064,68 \text{ см}^2/\text{г}$), В/И = 2	0,51

же способствует ускорению набора пластической прочности на 28% в возрасте 56 ч по сравнению с раствором на однофракционном песке (кривая 4).

Согласно полученным экспериментальным данным, известковые составы обладают невысокой прочностью, составляющей в возрасте 28 сут $R = 0,51 \dots 0,81$ МПа. Учитывая низкую прочность известковых составов, при разработке их рецептуры применялась золь-гель-технология. В рецептуру известкового состава вводился золь ортокремниевой кислоты.

Для получения золя ортокремниевой кислоты применяли раствор натриевого жидкого стекла Na_2SiO_3 с плотностью $1,46 \text{ г/см}^3$ по ГОСТ 13078–81, который пропускали через катионитовую колонку. Установлено, что увеличение концентрации дисперсной фазы (жидкого стекла) приводило к появлению коагуляционных контактов между частицами и началу структурирования — гелеобразования в колонке, поэтому применяли разбавленный раствор жидкого стекла и получали золь SiO_2 с pH 3,0–4,0.

Полученный 2%-й золь SiO_2 вводили вместе с водой затворения в растворную смесь, отношение И:Золь составляло 1:0,25; 1:0,5; 1:1. Результаты испытаний приведены в табл. 3 и на рис. 2, 3.

Установлено, что при введении добавки золя в известковую смесь наблюдается ускорение набора пластической прочности. Так, спустя 48 ч

Таблица 3

Прочность при сжатии известковых составов, МПа			
Время твердения, сут	Контрольный состав	Отношение из- весть:золь SiO_2	
		1:0,5	1:1
7	0,25	0,35	0,43
14	0,31	0,44	0,56
28	0,51	0,57	0,71

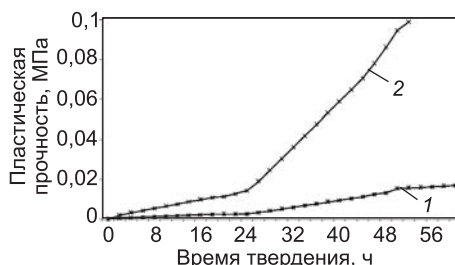


Рис. 2. Влияние добавки золя SiO_2 (возраст 1 ч) на пластическую прочность смеси. Состав И:П = 1:3, В/И = 2 (песок молотый)

1 — контрольный состав; 2 — отношение И:Золь = 1:1

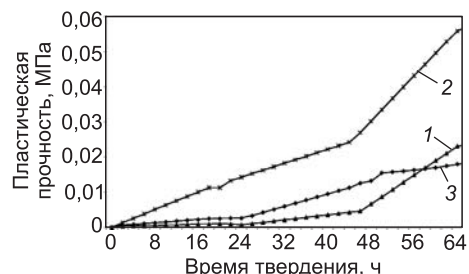


Рис. 3. Влияние добавки золя SiO_2 (возраст 11 сут) на пластическую прочность смеси И:П = 1:3, В/И = 2 (песок молотый)

1 — отношение И:Золь = 1:0,25; 2 — отношение И:Золь = 1:1; 3 — контрольный состав

= 1:1) была 0,03 МПа, в то время как у состава с добавкой золя (возраст 1 ч) при отношении И:Золь = 1:1 — 0,09 МПа (см. рис. 2).

Введение добавки золя (возраст золя 1 ч) способствует повышению прочности при сжатии известковых растворов. Прочность при сжатии состава с отношением компонентов И:П = 1:3, В/И = 2 (молотый песок удельной поверхности $S_{уд} = 5065 \text{ см}^2/\text{г}$) с добавкой золя при отношении И:Золь = 1:0,5 в возрасте 7 сут составила $R_{сж} = 0,68 \text{ МПа}$ и в возрасте 56 сут $R_{сж} = 0,95 \text{ МПа}$, в то время как у контрольного состава $R_{сж} = 0,25$ и 0,61 МПа соответственно.

Увеличение возраста золя до 11 сут, как отмечалось выше, снижает эффективность действия добавки и вызывает меньшее повышение прочности при сжатии в возрасте 28 сут воздушно-сухого твердения, составляющее при отношении И:Золь = 1:1 39% (см. табл. 3).

Различная активность золя в зависимости от его возраста, на наш взгляд, объясняется изменением размеров его частиц. Размер частиц золя определялся турбидиметрическим методом [2]. При этом учитывалось, что если радиус частиц дисперсионной среды не превышает $1/10$ – $1/20$ длины волны λ падающего света, то его определение может проводиться в соответствии с уравнением Рэлея, а если размер частиц дисперсионной среды составляет от $1/10$ до $1/3$ длины световой волны λ и показатели преломления частиц и среды не сильно различаются, то для описания светорассеяния в системе можно воспользоваться эмпирическим уравнением Геллера [2].

Измеряли оптическую плотность зольей различного возраста с различной объемной концентрацией c , при этом использовали кюветы длиной 3 см и светофильтр № 9 ($\lambda_{\text{вак}} = 625 \text{ нм}$).

Мутность τ рассчитывалась по формуле

$$2,3D = \tau \cdot l, \quad (1)$$

где D — оптическая плотность;

l — толщина слоя системы.

Строили графики в координатах $\tau/c - c$ (рис. 4). По этим графикам экстраполяцией находили величину τ/c при $c = 0$. Полученное значение τ/c при $c = 0$ использовали для расчета радиуса r частицы золя в соответствии с законом Рэлея по формуле

$$r = \left(\frac{3\tau\lambda^4}{4\pi c F} \right)^{1/3}, \quad (2)$$

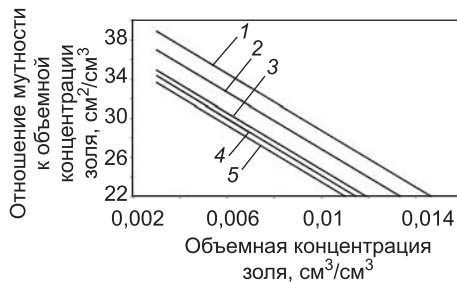


Рис. 4. Зависимость $\tau/c - c$

Возраст золя: 1 — 5 сут; 2 — 3 сут; 3 — 1 сут; 4 — 1 ч; 5 — 7 сут

где τ — мутность системы;

λ — длина волны падающего света;

c — объемная концентрация золя;

F — функция показателей преломления.

При расчете функции F принимали, что показатель преломления дисперсионной среды (воды) $n_0 = 1,333$, а частиц золя $n_1 = 1,55$. Длину волны в данной среде находили как $\lambda = \lambda_{\text{вак}}/n_0$.

$$F = 24\pi^3 \left(\frac{n_1^2 - n_0^2}{n_1^2 + 2n_0^2} \right)^2,$$

$$F = 24 \cdot 3,14^3 \left(\frac{1,55^2 - 1,333^2}{1,55^2 + 2 \cdot 1,333^2} \right)^2 = 24 \cdot 3,14^3 \left(\frac{2,4025 - 1,7769}{2,4025 + 3,5538} \right)^2 = 8,197.$$

Установлено, что спустя 7 сут визуально наблюдается помутнение золя. Определение размера частиц золя в более позднем возрасте, начиная с 7 сут, проводили в соответствии с уравнением Геллера

$$D = k\lambda^{-n}, \quad (3)$$

где k — константа, не зависящая от длины волны.

Для определения размера частиц золя по уравнению Геллера измеряли оптическую плотность образца золя при различных длинах волн падающего света (светофильтры № 5...9). Затем строили график в координатах $\lg D - \lg \lambda_{\text{вак}}$ (рис. 5) и определяли показатель степени n в уравнении (3). Зависимость $\lg D$ от $\lg \lambda_{\text{вак}}$ в соответствии с уравнением (3) представляет собой прямую линию, тангенс угла наклона которой равен показателю степени n с минусом.

По значению n находили в соответствующей таблице [2] значение параметра Z , а затем рассчитывали средний радиус частиц золя по формуле

$$Z = 8\pi r / \lambda. \quad (4)$$

При расчете r в уравнение (4) подставляли среднее значение длин волн $\lambda_{\text{ср}}$ в том интервале, в котором определялся показатель степени n . Величину $\lambda_{\text{ср}}$ находили по соотношению

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{вак. max}} + \lambda_{\text{вак. min}}}{2}. \quad (5)$$

В табл. 4 приведены значения радиуса частиц золя в зависимости от возраста.

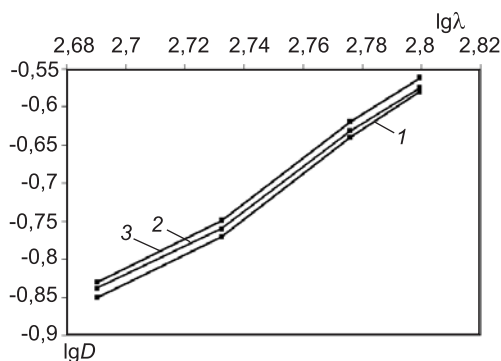


Рис. 5. $\lg D - \lg \lambda_{\text{вак}}$ для частиц дисперсных систем

Возраст золя: 1 — 12 сут; 2 — 15 сут; 3 — 19 сут

Таблица 4

Возраст золя	Радиус частиц золя, нм
1 ч	17,1
1 сут	17,2
3 сут	17,6
5 сут	17,9
7 сут	131,2
12 сут	134,3
15 сут	143,0
19 сут	143,0

Результаты расчета свидетельствуют, что начиная с возраста 7 сут идет укрупнение частиц золя, что приводит к снижению активности взаимодействия с известью. Так, в возрасте 1–5 сут радиус частиц золя составляет 17,1–17,9 нм, а в возрасте 7–19 сут — 131,2–143 нм.

Полученные экспериментальные данные позволяют разработать технологические приемы, способствующие повышению эффективности действия добавки золя в известковых составах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Логанина, В. И. Искусство интерьера. Современные материалы для отделки [Текст]: учеб. пособие / В. И. Логанина, С. Н. Кислицына, С. М. Саденко. — Ростов н/Д: Феникс, 2006.
2. Фролов, Ю. Г. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии [Текст]: учеб. пособие / Ю. Г. Фролов, А. С. Гродский. — М.: Химия, 1986. — 216 с.: ил.

ЛОГАНИНА В. И., д-р техн. наук, проф.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ПРОШИНА Н. А., канд. техн. наук, доц.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ДАВЫДОВА О. А., асп.

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

Получено 12.01.09

Loganina V. I., doctor of technical sciences, professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Proshina N. A., candidate of technical sciences, assistant professor, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

Davydova O. A., post graduate student, Penza State University of Architecture and Construction, Russia

APPLICATION OF SOL SILICON ACID ADDITIVE AT MANUFACTURING OF LIMY FINISHING STRUCTURES

Data of the sol additive influence and his age on properties of lime structures are presented. The sizes of particles sol depending on his age are given...

filler, lime, plastic durability, durability at compression, activity, optical density.

REFERENCES

1. Loganina, V. I. Art of an interior. Modern finishing materials [Text]: the manual / V. I. Loganina, S. N. Kislitsina, S. M. Sadenko. — Rostov na/D: the Phoenix, 2006.
2. Frolov, Ju. G. Laboratory works and tasks on a dispersoidology [Text]: the manual / Ju. G. Frolov, A. S. Grodsky. — М.: Chemistry, 1986. — 216 p.: ill.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМАТИЗАЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА

УДК 624.012.35 : 666.97.015 : 697.329

Н. И. ПОДГОРНОВ, Т. В. АППАРОВИЧ, Д. Д. КОРОТЕЕВ

ТЕРМООБРАБОТКА БЕТОНА В ОПАЛУБОЧНЫХ ФОРМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Произведен анализ низкопотенциальных солнечных нагревателей с опалубочными формами для изготовления сборных железобетонных изделий по конструктивному решению и теплофизическим процессам. Анализируется влияние количества слоев прозрачного покрытия, а также толщины воздушных прослоек между ними на эффективность работы низкопотенциальных коллекторов нагрева воды и опалубочных форм для термообработки бетона...

теплофизические процессы, низкопотенциальные солнечные нагреватели, опалубочные формы, термообработка бетона, прозрачное покрытие.

На современном этапе развития гелиотехники разработаны основы теории, расчета, проектирования и эксплуатации низкопотенциальных систем теплоснабжения с температурой нагрева теплоносителя 60 °С.

Основным элементом таких систем является плоский коллектор, в котором происходит преобразование солнечной энергии в тепловую. Низкопотенциальные солнечные нагреватели конструктивно просты, замещают от 20 до 60 % тепловой нагрузки, имеют высокий коэффициент 0,3–0,75 преобразования солнечной энергии.

Плоский низкопотенциальный нагреватель, коллектор, предназначен для нагрева жидкости и воздуха (рис. 1). Он состоит из теплоизолированного корпуса 1, теплоприемника 2, защищенного от окружающей среды прозрачным ограждением 3.

В коллекторе теплоприемником солнечной энергии служит плоский радиатор, изготовленный как «труба в листе» или «труба в виде змеевика», по которым циркулирует подогретая вода.

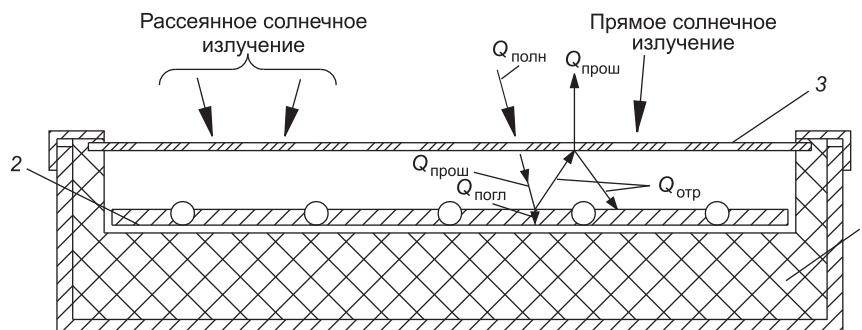


Рис. 1. Принципиальная схема плоского коллектора

1 — теплоизолированный корпус; 2 — теплоприемник; 3 — прозрачное ограждение

Падающая солнечная радиация $Q_{\text{полн}}$ проходит через прозрачное ограждение $Q_{\text{прош}}$, частично задерживается при прохождении загрязненного слоем пыли ограждения $Q_{\text{потери}}$ и поглощается поверхностью теплоприемника $Q_{\text{погл}}$.

Уравнение теплового баланса низкопотенциального солнечного нагревателя (1) запишем в виде

$$Q_{\text{полн}} = F_R^1 [\varepsilon_{\beta} (\tau \alpha) - U_L (T_{\tau} - T_{\alpha})], \quad (1)$$

где $Q_{\text{полн}}$ — полезная тепловая мощность коллектора, Вт/м²;

ε_{β} — плотность потока суммарной (прямой и рассеянной) солнечной радиации в плоскости коллектора, Вт/м²;

τ — пропускательная способность прозрачного ограждения;

α — поглощательная способность теплоприемника;

U_L — общий коэффициент тепловых потерь, Вт/(м²·К);

T_{τ} — средняя температура теплоносителя в коллекторе, К;

T_{α} — температура окружающего воздуха, К;

F_R^1 — коэффициент эффективности поглощающей поверхности теплоприемника.

Часть солнечной радиации поглощается поверхностью теплоприемника и преобразуется в тепло, а также расходуется на нагрев конструкции коллектора и получение полезной энергии.

Часть излучения, прошедшая через систему прозрачного ограждения и достигшая тепловоспринимаемой поверхности, отражается снова к ограждению. Отражение от поглощающей поверхности представляет диффузное излучение, которое в виде определенной доли энергии снова возвращается к поглощающей поверхности.

Теплообмен излучением в замкнутом пространстве между двумя параллельными пластинами достаточно изучен и подробно изложен в работах отечественных и зарубежных гелиотехников (В. Т. Тайсаева, И. В. Харченко, Р. Р. Авезов, Х. Багберт и др.).

Радиационный теплообмен в плоском солнечном коллекторе между двумя поверхностями может быть описан формулой

$$Q = \frac{\sigma (T_2^4 - T_1^4)}{(1 - \varepsilon_1) \varepsilon_1 A_1 + 1 / A_1 F_{1,2} + 1 + \varepsilon_2 / \varepsilon_2 A_2}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ — степень черноты тепловоспринимаемой поверхности;

A_1, A_2 — площади этих поверхностей;

T_1, T_2 — температуры;

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К) — постоянная Стефана—Больцмана;

$F_{1,2}$ — угловые коэффициенты.

Эффективность работы солнечного нагревателя зависит преимущественно от коэффициента прозрачности ограждения, поглощательной способности поверхности теплоприемника, теплоемкости материала, из которого он изготовлен, а также оптимальной ориентации плоскости солнечного коллектора и других теплофизических параметров.

Тепловые потери плоского солнечного коллектора складываются из потерь через прозрачное ограждение, боковые стенки и днище.

Конвективный теплообмен в плоской воздушной прослойке зависит от ее толщины. По данным авторов работы [1], увеличение толщины воздушной прослойки с 1,6 до 5 см приводит к росту теплового КПД коллектора с одним остеклением на 4–8%, с двумя — на 2%. При конструировании коллекторов зазоры между прозрачными пластинами ограждения следует назначать в пределах 1–3 см [1].

На рис. 2 даны характеристики солнечного коллектора, в частности эффективный оптический КПД и эффективный коэффициент теплотер [2].

По уточненным расчетным и экспериментальным данным (рис. 2), в табл. 1 приведены сведения эффективности солнечных коллекторов различной конструкции.

Из графических данных следует, что при $T^* < 0,013 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ плоский коллектор без остекления имеет наибольший КПД, а в диапазоне значений T^* до $0,045 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ коллектор с однослойным остеклением более эффективен, чем коллектор с двумя слоями стекла, при $T^* > 0,025 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ самым эффективным является вакуумированный коллектор.

Теплотехнические расчеты гелиотехников разных стран [1, 2 и др.] свидетельствуют, что применение двух прозрачных слоев в ограждении коллектора снижает тепловые потери, но уменьшает поступление солнечной энергии на теплоприемник; однослойное прозрачное ограждение коллектора наиболее эффективно.

К числу низкопотенциальных процессов, выполняемых на предприятиях стройиндустрии, относится прямой нагрев бетона солнечной энергией в опалубочных формах.

Опалубочные формы по своему конструктивному решению и теплофизическим процессам, протекающим в них, схожи с низкопотенциальными солнечными нагревателями с той лишь разницей, что вместо теплоприемника коллектора «труба в листе» или «труба в виде змеевика» теплоприемником в опалубочных формах служит твердеющий бетон.

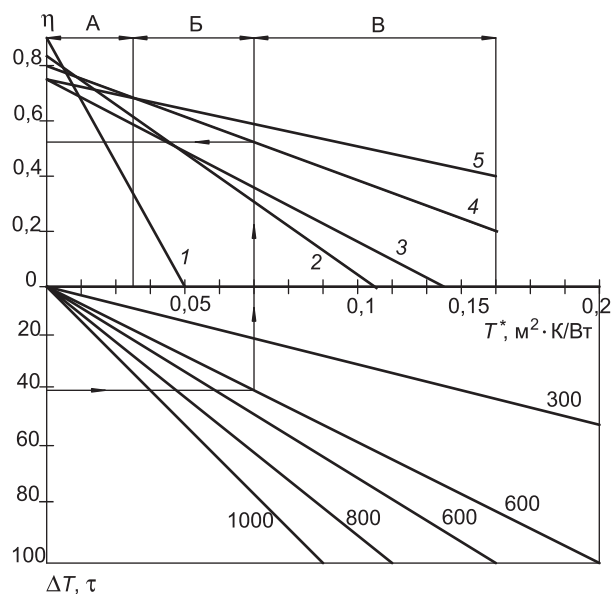


Рис. 2. Характеристика коллекторов солнечной энергии 1 — без остекления; 2 — с однослойным остеклением; 3 — с двухслойным остеклением; 4 — селективный плоский с однослойным остеклением; 5 — вакуумированный солнечный стеклянный трубчатый

Таблица 1
Значение коэффициента теплотехнической эффективности солнечных коллекторов

Тип конструкции коллектора	$F_R (\tau\alpha)$	$F_R U_L$, Вт/(м ² ·К)
1. Неселективный плоский солнечный коллектор без остекления	0,95	15
2. То же с однослойным остеклением	0,85	7
3. То же с двухслойным остеклением	0,75	5
4. Селективный плоский солнечный коллектор с однослойным ограждением	0,8	3,5
5. Вакуумированный солнечный стеклянный трубчатый коллектор	0,75	2,0
6. Плоский солнечный коллектор с селективным покрытием поглощающей панели НПО «Машиностроение»	0,81	4,1
7. То же НПО «Конкурент»	0,78	4,12

Коллекторы стационарно устанавливаются на открытой площадке или монтируются на стенах и крышах зданий, прозрачное покрытие в них выполняется преимущественно из силикатного или органического стекла. Опалубочные формы непрерывно перемещают вдоль фронта работ, выполняемых при производстве сборных железобетонных изделий. При этом производятся следующие технологические операции:

- снятие штатной инвентарной рамы с прозрачным ограждением после тепловой обработки бетона;
- транспортирование железобетонных плит к месту их складирования;
- чистка и смазка опалубочных форм;
- укладка и уплотнение бетонной смеси в опалубочных формах;
- отделка бетонной поверхности вновь забетонированных изделий;
- установка штатной инвентарной рамы с прозрачным покрытием на опалубочную форму и перемещение ее краном на открытую площадку заводской территории для экспонирования.

По эксплуатационным причинам использование хрупких прозрачных покрытий в опалубочных формах нецелесообразно, для этих целей более практично применение прозрачных пленок, выпускаемых отечественной промышленностью из различных классов полимеров [3].

В результате опалубочная форма, дополнительно оснащенная штатной инвентарной съемной рамой с прозрачным покрытием, представляет собой простейший плоский низкопотенциальный нагреватель, в котором свежееотформованный бетон одновременно является теплоприемником и аккумулятором солнечной энергии. Степень черноты тепловоспринимаемой поверхности теплоприемника составляет 0,9–0,96. Прозрачное покрытие инвентарной рамы изготавливают из полимерных пленок с максимальным коэффициентом пропускания 0,7–0,94.

Независимо друг от друга ЦНИИОМТП, МГАКХиС (1974–1987 гг.), НИИЖБ совместно с ВНИПИТеплопроектом (с 1981 г.) проводят исследования по использованию солнечной энергии для термообработки бетона.

ЦНИИОМТП экспериментальные исследования проведены на устройстве типа плоского коллектора, штатная инвентарная рама которого имеет однослойное прозрачное покрытие. Экспериментально установлена оптимальная толщина воздушной прослойки между бетоном и прозрачным однослойным покрытием, равная 15 мм [4].

Исследования НИИЖБ совместно с ВНИПИТеплопроектом выполнены на аналогичном плоском коллекторе, но штатная инвентарная рама имеет двухслойное прозрачное ограждение.

По данным исследований НИИЖБ воздушный зазор между бетоном и нижним слоем двухслойного прозрачного покрытия равен 20–25 мм; толщина воздушной прослойки между двумя параллельными пленками составляет 15–20 мм. Авторы называли такое двухслойное покрытие СВИТАП (светопрозрачное теплоизолированное покрытие)¹.

Нагретый в опалубочных формах бетон в ночное время становится источником инфракрасного излучения, и от прозрачности пленки в этой области зависит скорость остывания аккумулятивной в дневное время солнечной энергии. Поэтому для гелиотехнических устройств, в которых процесс теплообмена излучением протекает с некоторой периодичностью поступления солнечной энергии на Землю, наиболее правильным будет название «прозрачность покрытия», в которой в полной мере представлены все спектры солнечного излучения.

¹ Абдуллаев М. М. Ускорение твердения бетона сборных изделий в гелиоформах со светопрозрачными теплоизолирующими покрытиями: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. М., 1984. 121 с.

Таблица 2

Данные исследования температурного режима и кинетики роста прочности бетона при прямом нагреве его в опалубочной форме

Показатели		Данные экспериментальных исследований			
		ЦНИИОМТП, МГАКХиС		НИИЖБ, ВНИПИТеплопроект	
		Способ укрытия поверхности свежееотформованного бетона			
		однослойное прозрачное покрытие, рис. 3	обработка бетона пленкообразующим составом, битумной эмульсией	двухслойное прозрачное покрытие (СВИТАП), рис. 4	обработка бетона пленкообразующим составом, разжиженный битум
Максимальная температура нагрева бетона, °С		70–72,5	40–65	60–70	55
Максимальный температурный градиент по сечению бетона, °С/см		1,9–2,1	1,3	1,7–1,8	1,2
Максимальная скорость подъема температуры, °С		12–15	10,5	5–7	4–5
Остывание бетона, °С		1–5	1,5	1,5–3,4	1,0
Прочность бетона на сжатие в суточном возрасте, % R_{28}	Класс В-15	56–69	53	45–55	52
	Класс В-25	65–74	62	55–65	58
	Класс В-30 и выше	74–81	67	65–70	66

В табл. 2 приведены данные экспериментальных исследований при прямом нагреве бетона в опалубочной форме под однослойным и двухслойным прозрачным покрытием, а также при нанесении на свежееотформованный бетон пленкообразующей жидкости на основе битума. Экспериментальные данные температурного режима и кинетики роста прочности бетона, покрытого жидкостью на основе битума, полученные ЦНИИОМТП и НИИЖБ, имеют близкую сходимость.

Следует обратить внимание на твердение бетона под однослойным и двухслойным прозрачным покрытием. Исследование температурного режима твердения бетона под однослойным и двухслойным покрытием в обоих случаях имеет значения 60–70 °С.

Однако возможность получения такой температуры нагрева бетона под двухслойным покрытием вызывает сомнение, так как расчет поступления солнечной энергии на поверхность бетона, из условия величины солнечной постоянной в спектральной области, равной 1353 Вт/м², и доли энергии солнечного излучения в видимой области спектра — 0,5429 %, инфракрасной — 0,4571 %, этого не подтверждает. Спектральный коэффициент пропускания солнечного излучения, перпендикулярного солнечным лучам, в видимой и инфракрасной области соответственно составляет для полиэтилентерефталатной пленки — 0,80 и 0,86; полиэтиленовой прозрачной — 0,72 и 0,80; полиэтиленхлоридной марки В (ПВХ) — 0,72 и 0,52.

Суммарное количество энергии излучения, прошедшее через однослойное прозрачное покрытие на бетонную поверхность, для полиэтилентерефталатной пленки составляет 1162,9 Вт/м²; полиэтиленовой прозрачной — 1023,6; полиэтиленхлоридной марки В — 850,4 Вт/м². Прошедшая на тепловоспринимаемую поверхность бетона лучистая энергия определяет основные теплофизические процессы и кинетику роста прочности бетона. При большей плотности потока солнечной энергии, падающей на поверхность бетона, должна быть более высокая температура его нагрева и при меньшей плотности потока солнечной энергии более низкая температура нагрева и, как следствие этого, интенсификация или замедление процесса структурообразования цементного камня [4].

Таблица 3

Данные исследований В. П. Рыбасова и И. В. Быковой (НИИЖБ)

Вид пленкообразующего состава	Цвет состава	Максимальная температура гелиопрогрева, °С	Степень зрелости бетона в возрасте 22 ч, °С/ч	Прочность бетона, МПа в суточном возрасте
Помароль ПМ-86	Серебристо-серый	55	942	18,1
Разжиженный битум	Черный	56	950	19,1
Покрытие СВИТАП	Прозрачный	58	961	19,0

Разница в наборе прочности бетона под однослойным и двухслойным прозрачным покрытием, составляющая 9–14 %, свидетельствует об эффективности применения однослойного покрытия.

Исследования, выполненные В. П. Рыбасовым и И. В. Быковой в естественных условиях г. Ташкента на Наримановском гелиополигоне при температуре наружного воздуха 40 °С и приведенные в табл. 3, также не подтверждают преимуществ двухслойного покрытия (СВИТАП)².

При исследовании прогрева монолитного бетона под прозрачным термовлагоизоляционным покрытием, выполненным из одного, двух и трех слоев полиэтиленовой пленки толщиной 100 мкм, выявлено, что толщина воздушной прослойки между бетоном и пленкой составляет 50–10 мм. На основе выполненных исследований авторы³ рекомендуют к применению однослойное прозрачное покрытие, которое эффективно использует прямую солнечную энергию, имеет меньшую стоимость и материалоемкость. Технология производства работ по обеспечению процесса ухода за бетоном достаточно проста.

Теоретический расчет и экспериментальные исследования влияния количества прозрачных пленок на температуру нагрева бетона [4] показали,

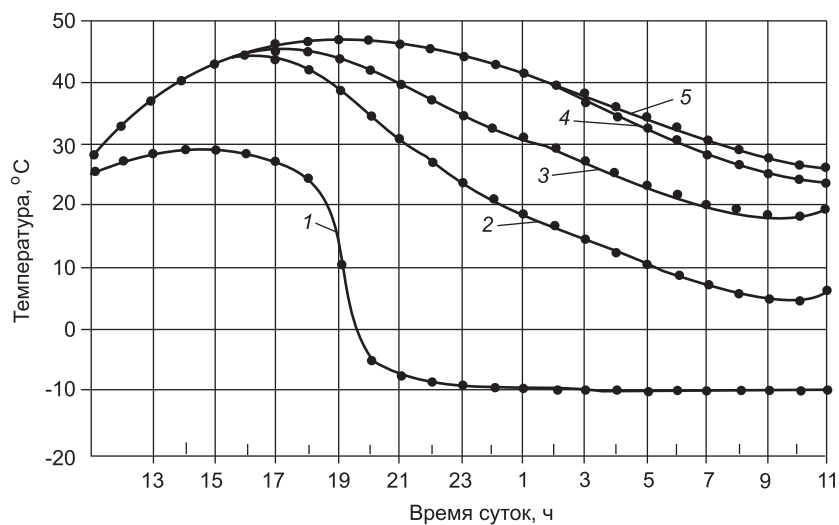


Рис. 3. Влияние замкнутых воздушных прослоек на температуру в бетоне, твердеющем при знакопеременных температурах наружного воздуха

1 — температура наружного воздуха; 2 — в бетоне при укладке на него полимерной пленки; 3 — укрытом одной полимерной пленкой с воздушным зазором между бетоном и пленкой 20 мм; 4 — укрытом двумя пленками с воздушным зазором между ними 20 мм; 5 — укрытом тремя пленками с воздушным зазором 20 мм

² Рыбасов В. П., Быкова И. В. Гелиотермообработка железобетона с применением пленкообразующих составов // Бетон и железобетон. 1988. № 5. С. 22–23.

³ Вахитов М. М., Эгамбедиев М. С. Разработка способа ухода за бетоном с применением однослойных светопрозрачных термовлагоизолирующих покрытий // Материалы международной научно-технической конференции по проблеме гелиотехнологии и долговечности бетона. М., 1992. С. 69–80.

что на темп роста прочности преимущество двухслойного прозрачного покрытия для горизонтальных поверхностей при температуре наружного воздуха 15°C и выше не проявляется. Однако число воздушных прослоек оказывает влияние на термическое сопротивление при знакопеременных температурах наружного воздуха (рис. 3). При температуре до -10°C наиболее эффективно двухслойное покрытие, увеличение числа замкнутых воздушных прослоек более двух не сказывается на температурном режиме бетона.

Значения замкнутых воздушных прослоек на их термическое сопротивление при толщине слоя 1, 2, 3, 5, 10, 15, 20, 30 см приведены в табл. 4. Они свидетельствуют, что при высоких температурах наружного воздуха увеличение числа замкнутых воздушных прослоек незначительно влияет на подъем температуры в бетоне и может сказаться только при отрицательных температурах среды.

Теоретические и экспериментальные исследования подтвердили выводы об эффективности однослойного прозрачного покрытия при эксплуатации низкопотенциальных коллекторов нагрева воды, а также опалубочных форм для термообработки бетона.

Полученные закономерности при твердении бетона в опалубочных формах под однослойным прозрачным покрытием в полной мере согласуются с основами теплообмена излучением в замкнутых воздушных прослойках малых величин.

Эффективность применения воздушных прослоек на температуру нагрева бетона при температуре наружного воздуха $+15^{\circ}\text{C}$ и выше рациональна при устройстве однослойного, при температуре до -10°C — двухслойного покрытия.

Установлено, что увеличение числа прозрачных покрытий до двух, трех с образованием между ними воздушного зазора уменьшает отвод тепла с поверхности теплоприемника, но одновременно повышает оптические потери при прохождении лучистой энергии на тепловоспринимаемую поверхность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Багберт, Х. Естественная конвекция в замкнутом пространстве. Обзор применения для создания коллекторов солнечной энергии [Текст]/Х. Багберт, Н. Кэттон, Л. К. Эдвардс//Тр. амер. об-ва инженеров-механиков. Серия С. Теплопередача, 98.— 1976.— № 2.— С. 34.
2. Харченко, Н. В. Индивидуальные солнечные установки [Текст]/Н. В. Харченко.— М.: Энергоиздат, 1991.— 208 с.
3. Руководство по применению полимерных пленок для ухода за твердеющим бетоном в условиях сухого жаркого климата [Текст].— М.: Стройиздат, 1981.— 17 с.
4. Подгорнов, Н. И. Использование солнечной энергии при изготовлении бетонных изделий [Текст]/Н. И. Подгорнов.— М.: Стройиздат, 1989.— 145 с.

Таблица 4

Термическое сопротивление замкнутых воздушных прослоек

Толщина воздушной прослойки, м	Термическое сопротивление замкнутой воздушной прослойки, $R_{в.п.}$, м ² · °С/Вт			
	Горизонтальной при потоке теплоты снизу вверх и вертикальной		Горизонтальной при потоке теплоты сверху вниз	
	При температуре воздуха в прослойке			
	положи- тельной	отрица- тельной	положи- тельной	отрица- тельной
0,01	0,13	0,15	0,14	0,15
0,02	0,14	0,15	0,15	0,19
0,03	0,14	0,16	0,16	0,21
0,05	0,14	0,17	0,17	0,22
0,10	0,15	0,18	0,18	0,23
0,15	0,15	0,18	0,19	0,24
0,2–0,3	0,15	0,19	0,19	0,24

ПОДГОРНОВ Н. И., д-р техн. наук, проф.

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства
АППАРОВИЧ Т. В., ст. препод.

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства
КОРОТЕЕВ Д. Д., асп.

Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства

Получено 16.03.09

Podgornov N. I., doctor of technical sciences, professor, Moscow State Academy of Municipal Economy and Building, Russia

Apparovich T. V., senior lecturer, Moscow State Academy of Municipal Economy and Building, Russia

Koroteev D. D., post graduate student, Moscow State Academy of Municipal Economy and Building, Russia

HEAT-PROCESSING OF CONCRETE IN SHUTTERING FORMS WITH EMPLOYMENT OF SOLAR ENERGY

There is held the analogy of low-potential solar heaters with shuttering forms for manufacturing of pre-fabricated reinforced concrete elements by constructive decision and thermo-physical processes taking place in them. The analysis of influence of numbers of layers of transparent cover and of thickness of air layers between them on effectiveness of work of low-potential distribution centre of heating of water and shuttering forms for heat-processing of concrete is given...

thermo-physical processes, low-potential solar heaters, shuttering forms, heat-processing of concrete, transparent cover.

REFERENCES

1. Bagberg, H. Natural convection in secluded space. Survey of employment for creation of solar energy collectors [Text]/H. Bagberg, N. Ketton, L. K. Edwards//Publications of American Mechanical Engineers Company. Series S. Heat-passing, 98.— 1976.— N 2.— P. 34.
2. Harchenko, N. V. Individual solar devices [Text] /N. V. Harchenko.— M.: Energoizdat, 1991.— 208 p.
3. Manual on employment of polymer films for care for hardening concrete in conditions of dry hot climate [Text].— M.: Stroyizdat, 1981.— 17 p.
4. Podgornov, N. I. Employment of solar energy during manufacturing of concrete elements [Text]/N. I. Podgornov.— M.: Stroyizdat, 1989.— 145 p.

САНИТАРНАЯ ТЕХНИКА

УДК 697.1:699.86

О. Д. САМАРИН

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ НАРУЖНОГО КЛИМАТА НА ОКУПАЕМОСТЬ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕРОПРИЯТИЙ

Рассмотрено влияние изменения фактических параметров наружного климата на срок окупаемости инженерных решений по снижению энергопотребления в гражданских зданиях. Приведены результаты вычисления дисконтированного срока окупаемости дополнительной теплоизоляции несветопрозрачных наружных ограждений, а также в целом оптимального комплекса энергосберегающих мероприятий для группы общественных зданий в зависимости от фактического значения градусо-суток отопительного периода. Дан анализ полученной зависимости и предложены рекомендации по учету среднесрочных и долгосрочных прогнозов изменения климатических и стоимостных факторов при технико-экономических обоснованиях проектных решений...

теплоизоляция, энергосберегающие мероприятия, изменение климата, градусо-сутки, окупаемость, прогнозирование.

Как известно, расчеты энергетических и технико-экономических показателей исследуемых объектов обычно ведутся, исходя из детерминированных значений наружных метеорологических параметров. Однако на самом деле при рассмотрении вопроса о прогнозе энергопотребления здания и оценке сроков окупаемости комплекса энергосберегающих мероприятий необходимо иметь в виду следующее. Расчетные климатические условия, на основании которых осуществляется выбор теплозащиты светопрозрачных и несветопрозрачных ограждений, практически фиксированы, поскольку пересмотр соответствующих нормативных документов осуществляется не чаще, чем через 10–15 лет. Поэтому объем теплоизоляционного материала в конструкциях, увеличение стоимости заполнений светопроемов и соответственно дополнительные капитальные затраты на осуществление мероприятий по утеплению также оказываются заданными. Расчетный воздухообмен в здании вообще мало зависит от климатических параметров в районе строительства, а определяется в основном функциональным назначением помещений, их строительным объемом и характером тепло- и влагопоступлений. Следовательно, расходы на устройство утилизации теплоты в системах вентиляции и кондиционирования воздуха, пропорциональные воздухообмену, являются заранее определенными.

В то же время фактическое потребление теплоты системами обеспечения микроклимата в течение отопительного периода, а следовательно, и основная составляющая годовых эксплуатационных издержек, связанная с величиной такого потребления, зависят непосредственно от текущих погодных условий. Таким образом, в условиях постепенного изменения климата, которое стало особенно заметным в последние 20 лет, прогнозирование окупаемости энергосберегающих мероприятий на дос-

таточно длительную перспективу становится весьма затруднительным. Дело здесь, главным образом, в том, что фактическая наружная температура и продолжительность ее стояния все более отклоняются от нормативных значений, рассчитанных по данным метеорологических наблюдений за предыдущие периоды. Причем это отклонение носит систематический характер в сторону сокращения продолжительности отопительного периода и повышения его средней температуры.

На рис. 1 показаны графики среднемесячной температуры наружного воздуха на метеостанции ВВЦ в Москве в течение отопительного сезона 2001/02 и 2006/07 гг. с использованием данных aisori.meteo.ru/climat. Эти интервалы были выбраны как наиболее теплые за последние 10 лет, не считая зимы 2007/08 г., для которой в упомянутом источнике сведения пока отсутствуют. Нетрудно подсчитать, что реальная продолжительность отопительного периода здесь сокращается до 199 и 175 сут, а средняя температура наружного воздуха при этом составит всего $-0,8$ и $-0,5$ °C. Следовательно, количество градусо-суток отопительного периода D_d для рассматриваемых сезонов при средней величине температуры внутреннего воздуха $t_b = +18$ °C будет равно соответственно 3749 и 3245 К · сут, что составляет всего 83 и 72% от нормативной величины 4515, вычисленной по данным [1].

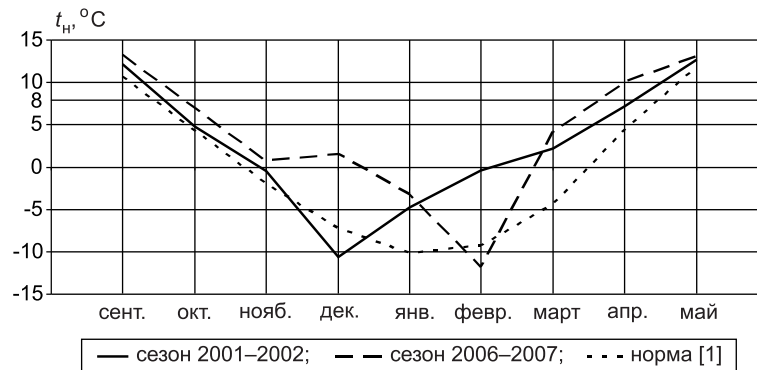


Рис. 1. График изменения среднемесячной температуры наружного воздуха t_n на метеостанции ВВЦ в Москве в течение отопительного сезона 2001/02 и 2006/07 гг. и для сравнения — по данным [1]

Ясно, что в такой же пропорции уменьшатся и годовые затраты на тепловую энергию, а значит, и ее экономия за счет дополнительного утепления и замены остекления, поскольку при фиксированной разнице сопротивлений теплопередаче между сравниваемыми вариантами устройства теплоизоляции эта экономия также будет пропорциональна величине D_d . То же самое относится и к утилизации теплоты вытяжного воздуха в системах механической вентиляции. Поэтому реальная продолжительность срока окупаемости всего комплекса энергосберегающих мероприятий $T_{ок}$ будет увеличиваться.

Это наглядно показывает рис. 2, на котором построена кривая зависимости среднего значения $T_{ок}$ от D_d для 18 общественных зданий различного назначения и размеров при норме дисконта $p = 12\%$ годовых в условиях сопоставления предлагаемой совокупности инженерных решений с результатами реализации требований действующих нормативных документов [2]. Имеется в виду следующий комплекс мероприятий, рассмотренный и обоснованный в [3]:

- утепление несветопрозрачных наружных ограждений до оптимального уровня;

- замена остекления на более энергоэффективное;
- утилизация теплоты вытяжного воздуха. Наименее затратным является применение схемы с промежуточным теплоносителем;
- установка в системах горячего водоснабжения (ГВС) индивидуальных водосчетчиков, смесителей с левым расположением крана горячей воды и кранов с регулируемым напором, а также применение теплонасосных установок (ТНУ) для подогрева воды;
- установка автоматических терморегуляторов у отопительных приборов, позволяющая учесть бытовые тепловыделения, а также теплопоступления от солнечной радиации через окна.

Расчеты выполнялись по разработанной автором программе для ЭВМ, составленной на языке Fortran-6.6 фирмы Compaq и позволяющей использовать различные значения наружных климатических параметров для назначения уровня теплозащиты ограждений и для оценки годового теплопотребления инженерными системами.

В табл. 1 приведены значения $T_{ок}$ для каждого здания из всей рассмотренной совокупности. Некоторое отличие полученных данных при $D_d = 4515$ К·сут от сведений, указанных в табл. 1, объясняется более высоким тарифом на тепловую энергию, использованным при вычислениях, а именно 903,5 р./Гкал (цены 2008 г., ОАО «МОЭК» для нежилых зданий). Конечно, в данном случае срок окупаемости везде остается очень небольшим и не выходит за пределы, характерные для малозатратных и быстроокупаемых мероприятий. Но все же при уменьшении D_d на 28% $T_{ок}$ возрастает уже на 42%, т.е. в полтора раза быстрее, и, судя по поведению кривой на рис. 2, при дальнейшем потеплении этот рост будет ускоряться.

Нули в табл. 1 означают, что в данном случае имеет место абсолютная окупаемость, т.е. предлагаемый альтернативный вариант характеризуется не только более низким энергопотреблением, но и меньшими капитальными затратами. В основном это связано с тем, что экономия на теплоизоляции будет значительно больше, чем дополнительные расходы на замену остекления и на устройство теплоутилизации.

То же самое относится и к окупаемости каждого отдельно взятого энергосберегающего мероприятия. Проведем технико-экономическое сравнение двух вариантов теплозащиты наружных ограждений для характерного здания-представителя — средней школы в г. Москве по типовому проекту 221-1-25-387. В первом варианте возьмем сопротивления теплопередаче по данным табл. 4 [2] для нормативного значения $D_d = 4515$ К·сут, во втором — с допустимым снижением в соответствии с п. 5.13 [2], т.е. на 37%

Таблица 1

Дисконтированный срок окупаемости комплекса энергосберегающих мероприятий $T_{ок}$ для 18 общественных зданий

D_d , К·сут	Срок окупаемости $T_{ок}$, г., для зданий								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
4515	0,99	1,22	0,79	0	0	0,88	0,02	0,51	0,91
3749	1,21	1,49	0,95	0	0	1,07	0,03	0,61	1,11
3245	1,42	1,75	1,10	0	0	1,25	0,03	0,70	1,30

(продолжение таблицы)

Срок окупаемости $T_{ок}$, г., для зданий									
10	11	12	13	14	15	16	17	18	Среднее
0,38	0,08	0,87	0,69	0,49	0,88	0,68	0,68	0,59	0,59
0,46	0,10	1,04	0,83	0,59	1,07	0,82	0,82	0,72	0,72
0,53	0,11	1,22	0,97	0,68	1,25	0,95	0,95	0,83	0,84

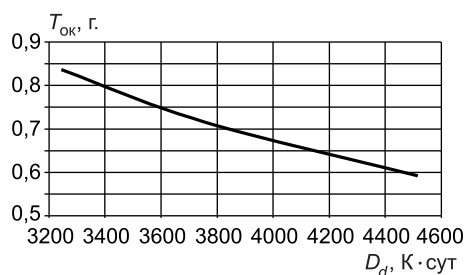


Рис. 2. Зависимость дисконтированного срока окупаемости комплекса энергосберегающих мероприятий $T_{ок}$ от фактической величины D_d

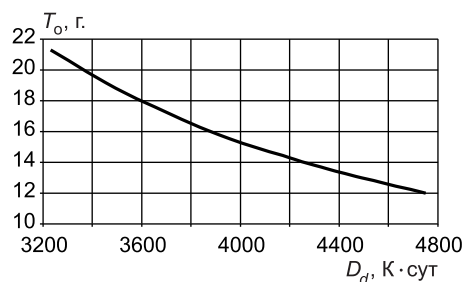


Рис. 3. Зависимость бездисконтного срока окупаемости T_0 дополнительной теплоизоляции нестепрозрачных ограждений от фактической величины D_d

для наружной стены и на 20% — для покрытия и перекрытия над техподпольем. В качестве теплоизоляционного материала используем плиты минераловатные П-125 со стоимостью $C_{ти} = 1550 \text{ р./м}^3$ по среднерыночным ценам 2008 г. и теплопроводностью $\lambda_{ти} = 0,064 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ для условий эксплуатации «Б» по прил. Д [4]. Принимаем коэффициенты теплотехнической однородности для стены $r_{нс} = 0,7$, для покрытия и перекрытия над техподпольем $r_{пт} = r_{пл} = 0,95$. Стоимость тепловой энергии по данным ОАО «МОЭК» в 2008 г. для нежилых зданий $C_t = 903,5 \text{ р./Гкал}$. Считаем добавочные коэффициенты к основным теплопотерям $\beta_1 = 1,10$ и $\beta_2 = 1,13$ как для общественного протяженного здания [2]. Расчетный срок эксплуатации $T_{ам} = 50$ лет. В данном случае разницей в расходе электроэнергии на системы отопления и в заработной плате рабочих можно пренебречь, поэтому годовые эксплуатационные затраты $\mathcal{E} = \mathcal{E}_{ам} + \mathcal{E}_{т.от}$ (на амортизацию и тепловую энергию). Вычисления даны в табл. 2, 3, где $R_i, \text{м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ — сопротивление теплопередаче i -й ограждающей конструкции оболочки здания; n_i — коэффициент, принимаемый в зависимости от положения наружной поверхности ограждающих конструкций по отношению к наружному воздуху по табл. 6 [2]; $V_{ти,i}, \text{м}^3$ — объем теплоизоляционного материала в i -й конструкции ограждений; $K_{ти}$ — капитальные затраты на теплоизоляцию; $\Sigma Q_{от}$ — суммарная мощность системы отопления здания, т.е. его расчетные теплопотери, необходимые для определения годовых затрат на теплоту $\mathcal{E}_{т.от}$.

Кривая зависимости бездисконтного срока окупаемости T_0 от D_d для данного примера построена на рис. 3. Легко видеть, что график имеет вид, аналогичный рис. 2. Заметим, однако, что при учете дисконтирова-

Таблица 2
Технико-экономические показатели здания средней школы (вариант 1)

Ограждение	$F_i, \text{м}^2$	R_i	r_i	n_i	$V_{ти,i} = 0,8 \cdot \lambda_{ти} R_i F_i / r_i$	$n_i F_i / R_i, \text{Вт/К}$
Наружная стена	1014	2,98	0,70	1,00	221	340
Бесчердачное покрытие	1397	4,46	0,95	1,00	336	313
Пол над техподпольем	1397	3,93	0,95	0,60	296	213
Окна	464	0,52	1,00	1,00	—	892
					$\Sigma V_{ти} = 853 \text{ м}^3$	$\Sigma n_i F_i / R_i = 1758 \text{ Вт/К}$
						$\Sigma Q_{от} = 100,58 \text{ кВт}$
					$K_{ти} = 853 \cdot 1550 = 1321700 \text{ р.}$	$\mathcal{E}_{т.от} = 183944 \text{ р./г.}$
					$\mathcal{E}_{ам} = 1,5 \cdot 1321700 / 50 = 39651 \text{ р./г.}$	$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{ам} + \mathcal{E}_{т.от} = 223595 \text{ р./г.}$

Таблица 3

Технико-экономические показатели здания средней школы (вариант 2)

Ограждение	$F_i, \text{ м}^2$	R_i	r_i	n_i	$V_{\text{ти},i} = 0,8 \cdot \lambda_{\text{ти}} R_i F_i / r_i$	$n_i F_i / R_i, \text{ Вт/К}$
Наружная стена	1014	1,88	0,70	1,00	139	540
Бесчердачное покрытие	1397	3,57	0,95	1,00	269	392
Пол над техподпольем	1397	3,15	0,95	0,60	237	266
Окна	464	0,52	1,00	1,00	—	892
					$\Sigma V_{\text{ти}} = 645 \text{ м}^3$	$\Sigma n_i F_i / R_i = 2090 \text{ Вт/К}$
						$\Sigma Q_{\text{от}} = 119,53 \text{ кВт}$
					$K_{\text{ти}} = 645 \cdot 1550 = 999114 \text{ р.}$	$\Theta_{\text{т.от}} = 218603 \text{ р./г.}$
					$\Theta_{\text{ам}} = 1,5 \cdot 999114 / 50 = 29973 \text{ р./г.}$	$\Theta = \Theta_{\text{ам}} + \Theta_{\text{т.от}} = 248577 \text{ р./г.}$

ния затрат во всей приведенной здесь области изменения параметров окупаемость вообще не имеет места, но поведение бездисконтного срока тоже представляет интерес, поскольку в других случаях окупаемость в подобных условиях может наблюдаться.

Следует также учитывать, что наблюдаемая в последнее время тенденция к потеплению климата осуществляется в основном за счет повышения среднемесячных температур и сокращения продолжительности отопительного сезона. В то же время расчетные значения, например, средней температуры наиболее холодной пятидневки пока реально остаются на прежнем уровне, что наглядно показала зима 2005/06 г., когда по сведениям meteo.ru/climate_var в период 17–21 января 2006 г. в Москве были действительно достигнуты условия, соответствующие данным [1].

Поэтому особое значение приобретает технико-экономическое обоснование принимаемых решений с учетом среднесрочных и долгосрочных прогнозов изменения климатических и стоимостных факторов. Помимо этого представляется целесообразной более оперативная корректировка нормативных и справочных документов типа [1] с использованием рядов метеорологических наблюдений за последние годы. В этом случае рассмотренная проблема, вызванная рассогласованием расчетных и фактических параметров наружного климата, будет в большей степени решена, что приведет к значительной экономии материальных и энергетических ресурсов как при строительстве, так и при эксплуатации зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-01-99*. Строительная климатология [Текст].— М.: ГУП ЦПП, 2004.
2. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий [Текст].— М.: ГУП ЦПП, 2003.
3. Самарин, О. Д. Теплофизические и технико-экономические основы теплотехнической безопасности и энергосбережения в здании [Текст]/О. Д. Самарин.— М.: МГСУ.— Тисо-принт, 2007.— 160 с.
4. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий [Текст].— М.: ГУП ЦПП, 2004.

САМАРИН О. Д., канд. техн. наук, доц.
Московский государственный строительный университет

Получено 26.03.09

Samarin O. D., candidate of technical sciences, assistant professor, Moscow State University of Civil Engineering, Russia

INFLUENCING OF CHANGE OF OUTSIDE CLIMATIC PARAMETERS ON PAYBACK OF ENERGY SAVING MEASURES

Influencing of change of actual outside climatic parameters for the term of payback of engineering decisions on a decrease of energy consumption in civil buildings is reviewed. The observational data on a meteorological station in All-Russian Exhibition Centre (Moscow) during heating seasons 2001–2002 and 2006–2007 years in confrontation with Russian Design Code 23-01 are shown. The computed results of discounted payback time of a padding thermal insulation of non-transparent outside enclosures, and also as a whole of optimum complex of energy saving measures for group of public buildings are adduced depending on actual value of degree-days of the heating season. The analysis of the obtained relations is given, and the guidelines under account of intermediate term both long-range forecastings of change of the climatic and cost factors also are offered at the feasibility report of the design solutions...

thermal insulation, energy saving measures, change of a climate, degree-day, payback, forecasting.

REFERENCES

1. Design code (SNIIP) 23-01–99*. Building climatology [Text]. — M.: State Committee of Civil Engineering, 2004.
2. Design code (SNIIP) 23-02–2003. Thermal protection of buildings [Text].— M.: State Committee of Civil Engineering, 2003.
3. Samarin, O. D. Thermal, technical and economic foundations of thermal safety and energy saving in building [Text]/O. D. Samarin.— M.: Moscow State University of Civil Engineering — Tiso-Print, 2007.— 160 p.
4. Design recommendations (SP) 23-101–2004. Thermal performance design of buildings [Text].— M.: State Committee of Civil Engineering, 2004.

СТРОИТЕЛЬСТВО АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

УДК 625.855.3

С. К. ИЛИОПолов, С. А. Чернов, И. В. Мардиросова

МОДИФИЦИРОВАННАЯ ХОЛОДНАЯ АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ ДЛЯ РЕМОНТА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

Статья посвящена научно-исследовательской работе, связанной с получением холодных асфальтобетонных смесей с повышенными прочностными характеристиками, более водоустойчивых, с улучшенным сцеплением с влажными минеральными материалами как основных, так и кислых пород, увеличенным сроком хранения смеси за счет повышения показателя слеживаемости...

холодные смеси, водоустойчивость, разжиженный битум, слеживаемость смесей.

Дорожные покрытия из холодного асфальтобетона устраивают, главным образом, при строительстве дорог местной сети с небольшой интенсивностью движения, а также при ремонте асфальтобетонных покрытий всех типов, включая районы Севера и Сибири.

Применение холодных асфальтобетонов — один из путей снижения энергозатрат в дорожном строительстве. Их можно готовить на одной базе и перевозить на расстояния без риска потери или изменения потребительских свойств. Использование холодных смесей позволяет проводить строительные и ремонтные работы при более низких температурах воздуха, чем это допускается при применении горячих асфальтобетонных смесей. Ремонтный сезон может быть продлен до температуры -20°C , при этом обеспечиваются высокая оперативность, стабильность работ и возможность круглогодичного проведения и повышения их долговечности.

Важность решения вопросов использования холодных смесей определяется тем, что преобладающим типом покрытий автомобильных дорог, рассчитанных на современное повышение скоростей движения транспортных средств, рост интенсивности и грузоподъемности, являются асфальтобетонные покрытия. Такие дороги составляют основу дорожной сети нашей страны, выдерживая основной объем автотранспортных перевозок. Классические холодные асфальтобетонные смеси — это разновидность горячего асфальтобетона, приготовляемого в горячем виде, но укладываемого в холодном состоянии. Актуальность использования для ремонтных целей материалов, подобных холодному асфальтобетону, в последнее время сильно возросла [1–3].

Однако следует отметить, что холодные асфальтобетоны в России и странах СНГ начиная с 50-х гг. прошлого столетия применяются недостаточно и опыт работы с ними утерян. В странах же Европы, США, Канаде появились высокотехнологические и качественные холодные смеси.

Задача настоящего исследования — расширение использования холодного асфальтобетона путем разработки смесей с повышенными проч-

ностными характеристиками, более водоустойчивых, с улучшенным сцеплением с влажными минеральными материалами как основных, так и кислых пород, увеличенным сроком хранения смеси за счет показателя слеживаемости.

Наиболее перспективными и экономически выгодными материалами для холодных смесей при проведении ямочного ремонта асфальтобетонных покрытий являются минеральные материалы подобранного зернового состава и жидкие органические вяжущие. Смесь приготавливается на асфальтобетонном заводе, складировается и укладывается в холодном состоянии. Лучшие качественные показатели смесей обеспечиваются при использовании минеральных материалов карбонатных пород с максимальной величиной зерен 20 мм.

Для осуществления поставленных задач особое внимание в работе уделено созданию битумной композиции, которая могла бы обеспечить их выполнение.

В качестве жидких вяжущих в холодных смесях применяют нефтяные остаточные битумы (гудроны) или используют средне- и медленногустеющие битумы марок СГ 70/130 или МГ 70/130, которые получают в основном путем разжижения вязких битумов дизельным топливом, керосином или маслами. Вязкость вяжущих для проведения работ в летнее время принимается в пределах 60–100 с, для работ весной или осенью — в пределах 20–60 с.

В настоящей работе для приготовления вяжущего использовался вязкий дорожный битум марки БНД 60/90, физико-механические показатели которого приведены в табл. 1. В качестве разжижителя применялось дизельное топливо.

Таблица 1

Физико-механические показатели битума

Глубина проникания иглы, 0,1 мм, при		Растяжимость, см, при		Температура, °С			Интервал пластичности, °С	Прилипаемость по контрольному образцу	
25 °С	0 °С	25 °С	0 °С	размягчения	хрупкости	вспышки		к песку	к мрамору
73	25	≥100	4,5	48	–17,0	257	65	№ 3	№ 2

Особое внимание в работе уделено проблеме повышения сцепления битумного вяжущего с минеральными материалами. Наибольшее значение в качестве адгезивов имеют катионактивные ПАВ, которые улучшают сцепление вяжущего с минеральным материалом как основного характера, так и особенно кислого. К числу катионактивных ПАВ в первую очередь следует отнести соединения различных аминов. В нашей стране широкое применение подобных адгезионных добавок сдерживается очень узким спектром отечественных ПАВ, по качественным показателям уступающим зарубежным.

В качестве адгезионной присадки для разжиженного вяжущего использовалось новое аминное соединение КАДЭМ-ВТ (катионный адгезив — эмульгатор высокотемпературный) отечественного производства. Выпускается он в соответствии с техническими требованиями стандарта ТУ 2482-009-0470 6205-03. Реагент КАДЭМ-ВТ в воде нерастворим, хорошо растворяется в ароматических углеводородах, керосине, в нефтепродуктах (табл. 2). Представлена добавка смесью алкиламидополиаминов и алкилимидазолинполиаминов, получаемых на основе кислот C_{16} – C_{20} растительного или животного происхождения, например олеиновой.

Исследования, проведенные в ДорТрансНИИ РГСУ, показали, что адгезионная добавка КАДЭМ-ВТ при введении в разогретый битум раство-

Таблица 2

Физико-механические показатели поверхностно-активной добавки КАДЭМ-ВТ

Наименование показателя	Норма	Значения показателя
Внешний вид при 20 °С	Однородная паста без посторонних включений	Однородная паста без посторонних включений
Температура застывания, °С	Не более 30	28
Плотность при 20 °С, г/см ³	0,94–0,96	0,94
Аминное число, мг HCl/г	100–50	81
Потери массы продукта при выдерживании в пенетрационной чашке слоем ½ чашки в течение 5 ч при 170 °С, %	Не более 8	5
Кислотное число, мг КОН/г	Не более 10	6,0
Температура вспышки в закрытом тигле, °С	185–195	193

ряется в нем, равномерно распределяясь при перемешивании, создавая особые условия повышения прилипаемости вяжущего к минеральным материалам, особенно кислых пород. При этом сохраняются реологические свойства битумов и замедляются процессы старения вяжущего за счет образования химических связей азота функциональных групп NH_2^+ аминного соединения с высокомолекулярными радикалами асфальтенов. Эффективно использование КАДЭМ-ВТ в составе битумного вяжущего при работе в зимних и осенне-весенних условиях.

Полученная композиция, состоящая из вязкого битума БНД 60/90, разжижителя и адгезива КАДЭМ-ВТ, обладает повышенным сцеплением с минеральными материалами кислых и основных пород и соответствует требованиям ГОСТ 11955–82 «Битумы нефтяные дорожные жидкие», битумам марки СГ 70/130. Указанные составы битумной композиции были использованы при разработке составов смесей холодного асфальтобетона.

С целью повышения прочностных показателей и водостойкости холодного асфальтобетона в работе использовалась гранулированная полимерная дисперсно-армирующая добавка — РТЭП (резиновый термоэластопласт). Введение полимерно-армирующих добавок в асфальтобетонные смеси повышает вязкость асфальтобетона, увеличивает его трещиностойкость и долговечность в условиях значительных растягивающих усилий и длительных динамических нагрузок. Подобные добавки способствуют возрастанию упругости и эластичности битумной массы, обеспечивают более эффективное сопротивление сжатию и особенно изгибу. Выпускается РТЭП научно-производственным предприятием ООО «ЮжДорНИИ» в соответствии с ТУ 5718-001-79259416–2006 и представляет собой гранулы темного цвета произвольной формы размером 2–6 мм с насыпной плотностью 0,3–0,4 г/см³. В табл. 3 представлены физико-механические показатели резинового термоэластопласта.

Результаты проведенных исследований показали, что при выдерживании РТЭП в нагретом битуме при температурах до 120 °С и интенсивном перемешивании в лабораторной мешалке основная масса добавки (до 80%) расплавляется и равномерно распределяется уже по истечении 15 мин. В этих условиях расплавляется, главным образом, полимерная составляющая гранул, образуя с высокомолекулярными соединениями битума полимерно-битумное вяжущее. Присутствующие же в добавке нерасплавленные каучуковые частицы резиновой крошки, частично подвергнутые набуханию и деструкции уже в процессе приготовления гранул, находясь во взвешенном состоянии в образующемся ПВБ, при объединении с коллоидной структурой вяжущего, образуют новую струк-

Таблица 3

Физико-механические показатели резинового термоэластопласта

Наименование показателя	Норма	Значения показателя
Цвет	Черный	
Температура размягчения добавки, °С	Не выше 140	138
Увеличение температуры размягчения битума БНД 60/90 с 5%-м содержанием добавки, %	Не менее 15	16
Эластичность битума с 5%-м содержанием добавки при температуре 25 °С, %	Не менее 40	65

туру из каучуковых фрагментов резиновой крошки и активных групп высокомолекулярных компонентов полимерно-битумного вяжущего.

При выборе для исследования минерального материала взят более сложный вариант приготовления холодных смесей с применением каменного материала кислого характера: гранитного щебня фракции 5–10 мм и отсева дробления гранитного щебня фракции 0–5 мм. В качестве минерального порошка использовался активированный известняковый порошок. Зерновые составы минеральной части смесей подбирали по принципу плотной смеси, при этом ориентировочное содержание частиц мельче 0,071 мм находится в пределах 3–12%. Была подобрана плотная асфальтобетонная смесь типа Б_х по ГОСТ 9128–97.

Для достижения эффективной работы РТЭП в составе холодной смеси необходимо обеспечить ее хорошее перемешивание с битумом и гомогенизацию смеси. Однако на битумных базах, как правило, специальное перемешивающее оборудование отсутствует, установка насосов-смесителей для многих баз тоже в настоящий момент затруднена. Поэтому авторами предложен более простой способ модификации асфальтобетонов путем введения гранулированной добавки РТЭП непосредственно в асфальтосмеситель на разогретые до требуемой температуры материалы. После их перемешивания с добавкой в течение 15–30 с осуществляется подача минерального порошка и разжиженного вяжущего, содержащего битум БНД 69/90, разжижитель и добавку КАДЭМ-ВТ, после чего производится «мокрое» перемешивание в течение 15–20 с.

Приготовление холодной асфальтобетонной смеси в лабораторных условиях производилось следующим образом. Минеральные материалы в количестве 95–97% подобранного состава (гранитный щебень фракции 5–10 мм, отсев дробления щебня фракции 0–5 мм, минеральный порошок) нагревались в лабораторной мешалке до температуры 90–110 °С, после чего на нагретые минеральные материалы вводилась полимерно-армирующая добавка термоэластопласта резинового. Смесь перемешивалась при указанной температуре в течение 3 мин до равномерного распределения РТЭП на поверхности минеральных материалов.

На подготовленный таким образом минеральный материал подавался в количестве 3–5% от массы смеси вязкий битум БНД 60/90, разжиженный дизельным топливом и модифицированный добавкой адгезива КАДЭМ-ВТ.

Необходимое количество разжижителя для получения жидкого битума марки СГ 70/130 подбиралось опытным путем и в настоящей работе составляло от массы смеси 0,4–0,7%, содержание КАДЭМ соответственно 0,015–0,025%.

Компоненты этой смеси вновь перемешивались в течение 40 с до полного обволакивания данной битумной композицией поверхности минерального материала. Образцы полученной холодной смеси Б_х изготавливались

Таблица 4

**Физико-механические показатели разработанной холодной
асфальтобетонной смеси**

Наименование показателя	Содержание вяжущего, мас.%, и физико-механические показатели смеси			Требования ГОСТ 9128–97 к смесям типа Б _х марки 1
	3	4	5	
Предел прочности при сжатии при температуре 20 °С, МПа, не менее				
до прогрева:				
сухих	1,42	2,63	2,39	1,5
водонасыщенных	1,02	2,27	2,51	1,1
после прогрева:				
сухих	1,7	2,81	3,66	1,8
водонасыщенных	1,3	2,49	3,19	1,6
Коэффициент водостойкости:				Не нормируется
до прогрева	0,71	0,88	0,90	
после прогрева	0,77	0,94	0,92	
Набухание, об.%, не более	0,38	0,32	0,31	
Водонасыщение, об.%	9,30	5,70	5,03	5–9
Слеживаемость смеси, число ударов, не более	4	5	13	10
Плотность образцов, г/см ³	2,363	2,383	2,360	Не нормируется

и испытывались по ГОСТ 12801–98 в прогретом и непрогретом состоянии. По истечении 1 сут после изготовления часть образцов испытывали в непрогретом состоянии, а другую нагревали в сушильном шкафу при температуре 90 ± 2 °С. Продолжительность прогрева составляла 2 ч. Образцы испытывали на следующий день после прогрева. Согласно представленным в табл. 4 результатам испытаний, оптимальное содержание вяжущего в смеси составляет 4 %. Все физико-механические показатели этого состава соответствуют требованиям ГОСТ 9128–97 — холодным асфальтобетонам типа Б_х марки 1.

Выводы. Разработанная холодная смесь указанного состава отличается значительным повышением прочности сухих и водонасыщенных образцов при температурах 20 и 50 °С, коэффициента водостойкости, а также значительным снижением показателя слеживаемости. В составе данной смеси до прогрева наблюдается повышение предела прочности при сжатии при температуре 20 °С для сухих образцов по сравнению с требованиями на 75 %, водонасыщенных — более 100 %. После прогрева эти показатели соответствуют значениям для сухих и водонасыщенных образцов в пределах 56 %. Слеживаемость смеси составляет 5 ударов. Водонасыщение рассматриваемых образцов соответствует предъявляемым требованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Руденский, А. В. Холодный асфальтобетон. Возможности продления сезона строительных и ремонтных работ [Текст]/А. В. Руденский // Автомоб. дороги: науч.-техн. информ. сб.— 2006.— № 4.— С. 11–42.
2. Бусел, А. В. Ремонт автомобильных дорог [Текст]/А. В. Бусел.— Минск: Арт-дизайн, 2004.— 208 с.
3. Руденский, А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия [Текст]/А. В. Руденский.— М.: Транспорт, 1992.— 254 с.

4. Печеный, Б. Г. Битумы и битумные композиции [Текст]/Б. Г. Печеный.— М.: Химия, 1990.— 256 с.

*ИЛИОПОЛОВ С. К., д-р техн. наук, проф.
Ростовский государственный строительный университет
ЧЕРНОВ С. А., мл. науч. сотр.
Ростовский государственный строительный университет
МАРДИРОСОВА И. В., канд. хим. наук, доц.
Ростовский государственный строительный университет*

Получено после доработки 17.02.09

Iliopolov S. K., doctor of technical sciences, professor, Rostov State Building University, Russia

Chernov S. A., junior scientist, Rostov State Building University, Russia

Mardirosova I. V., candidate of chemical sciences, assistant professor, Rostov State Building University, Russia

MODIFIED COLD ROAD CONCRETE MIX FOR REPAIR ASPHALT PAVEMENT

The article is devoted to the research work connected with reception of asphalt cold mixtures with raised strength properties characteristics, more waterproof with improve adhesion with damp mineral material, as the basic and sour breeds, the increased period of storage of a mixture at the expense of indicator increase of a parameter of blocking property...

cold mixtures, waterproof, cutback bitumen, blocking of mixtures.

REFERENCES

1. Rudenskiy, A. V. Cold asphalt concrete. The Opportunity of prolongation of a season building and repair work [Text]/A. V. Rudenskiy//Highways: The sci.-techn. coll.— 2006.— N 4.— P. 11–42.
 2. Busel, A. V. Repair of highways [Text]/A. V. Busel.— Minsk: Art-design, 2004.— 208 p.
 3. Rudenskiy, A. V. Road asphalt concrete covering [Text]/A. V. Rudenskiy.— М.: Transport, 1992.— 254 p.
 4. Pecheniy, B. G. Bitumen and Bitumen composition [Text]/B. G. Pecheniy.— М.: Chemistry, 1990.— 256 p.
-

НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ РАЗДЕЛ

УДК 62–34.001

В. П. ГИЛЕТА, Б. В. ЮДИН

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЗМОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЯДА ТЕЙЛОРА

Используя ряд Тейлора для связи переносной и относительной систем координат, связанных со звеньями рычажного механизма, получен усовершенствованный матричный метод, позволяющий выполнять анализ открытых рычажных механизмов с переменной длиной звеньев и синтез кинематических параметров по заданному закону движения конечного звена...

матричный метод кинематического анализа, ряд Тейлора, тензор поворота.

В матричном методе кинематического анализа механизмов [1–3] рассматривается последовательность переносов и поворотов систем координат, связанных с каждым из звеньев, в виде последовательных умножений матриц. Матрица является математической абстракцией, так как содержит объекты разной природы и размерности — векторы размерности [м] и скаляры размерности [0]. В отличие от операций с матрицами, в ряде Тейлора операции производятся с векторами и тензорами, которые имеют совершенно четкий физический смысл.

Сформулируем перенос систем координат с помощью ряда Тейлора. Применительно к переносному движению в рычажных механизмах ряд Тейлора отражает последовательную связь двух кинематических пар, каждая из которых является началом системы координат, связанной с соответствующим звеном. Используя метрику Минковского для описания четырехмерного пространства (три пространственные и одна временная координаты), как это было сделано в [4] с очевидными упрощениями для нерелятивистской механики, получим компактную форму записи.

Со стойкой — звеном 0 связана нулевая, она же глобальная, система координат. Первая кинематическая пара — место присоединения первого звена к стойке — является началом первой системы координат. Ось x первой системы координат параллельна первому звену. Переход от нулевой к первой и каждый последующий переход от предыдущей кинематической пары к последующей и поворот звеньев описываются рядом Тейлора:

$$\bar{X}_B = \bar{L}_B + \bar{T}_{BA} \otimes \bar{X}_A + 0\ldots,$$

раскрывая, запишем

$$\sum_{i=1}^4 X_{iB} = \sum_{i=1}^4 L_{iB} + \sum_{i,j=1}^4 \frac{\partial X_{iB}}{\partial X_{jA}} \cdot X_{jA} + 0\ldots, \quad (1)$$

где X_A — вектор, отражающий координаты анализируемой точки A в системе координат предыдущего звена;

$\frac{\partial x_{iB}}{\partial x_{jA}}$ — тензор поворота от предыдущей A к последующей B системам

координат;

L_{iB} — смещение кинематических пар, измеряемое в системе B ;

X_B — координаты анализируемой точки в системе координат B ;

0 — последним членом уравнения пренебрегаем в силу малости вторых производных.

Тензор поворота $T_{iBjA} = \left\{ \frac{\partial x_{iB}}{\partial x_{jA}} \right\}$ с учетом базисных векторов этих двух

систем имеет вид

$$\left\{ \begin{array}{cccc} \frac{\partial x_{B1}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial x_{B1}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial x_{B1}}{\partial x_{A3}} & \frac{\partial x_{B1}}{\partial x_{A4}} \\ \frac{\partial x_{B2}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial x_{B2}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial x_{B2}}{\partial x_{A3}} & \frac{\partial x_{B2}}{\partial x_{A4}} \\ \frac{\partial x_{B3}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial x_{B3}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial x_{B3}}{\partial x_{A3}} & \frac{\partial x_{B3}}{\partial x_{A4}} \\ \frac{\partial x_{B4}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial x_{B4}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial x_{B4}}{\partial x_{A3}} & \frac{\partial x_{B4}}{\partial x_{A4}} \end{array} \right\}. \quad (2)$$

В этом тензоре члены вида $\frac{\partial x_{Bi}}{\partial x_{Aj}}$ с индексами до 3 — направляющие ко-

синусы. Например, $\frac{\partial x_{B3}}{\partial x_{A1}}$ — это проекция единичного вектора, лежащего

на оси 3 системы координат, связанной с точкой B , на ось 1 системы координат, связанной с точкой A , т. е. является *направляющим косинусом*.

Результаты произведения тензора на вектор для удобства анализа представим в виде таблицы, каждая строка которой — компонента X_B вектора в последующей системе координат

$$\left\{ \begin{array}{cccc} \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A4}} \Delta X_{A4} \\ \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A4}} \Delta X_{A4} \\ \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A4}} \Delta X_{A4} \\ \frac{\partial \vec{x}_{B4}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B4}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B4}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \frac{\partial \vec{x}_{B4}}{\partial x_{A4}} \Delta X_{A4} \end{array} \right\}. \quad (3)$$

Каждый член в нижней строке вида $\frac{\partial x_{B4}}{\partial x_{Aj}} \approx \frac{c \cdot t - c \cdot t}{\Delta x_{Aj}}$ отражает измене-

ние времени при смещении в новую точку пространства. Здесь в числите-
ле $c \cdot t$ — временная координата в точке $x = 0$; $c \cdot t$ — временная координата в точке $x = x$.

та в точке $x = x$. В механике скоростей, много меньших скорости света $v \ll c$, допускается понятие «одновременность событий», т.е. эти величины равны, и соответственно разность между ними равна 0. Для релятивистской физики это невозможно, понятие «одновременность событий» там не существует. В результате получаем, что все числители в нижней строке и соответственно вся нижняя строка равны нулю.

Члены в правом столбце вида $\frac{\partial x_{B1}}{\partial x_{A4}} \Delta X_{A4}$ для временной координатной оси, размерность которой $[м/с] \times [с] = [м]$, имеют полную запись — $\frac{\partial x_{B1}}{\partial t} \Delta t \cdot c$, применив сокращение констант, получим $\frac{\partial x_{B1}}{\partial t} \Delta t$ — это не что иное, как скорость удаления начала новой системы координат от старой вдоль оси x_{B1} , помноженная на время Δt :

$$\frac{\partial x_{B1}}{\partial t} \Delta t \cdot c = \frac{\partial x_{B1}}{\partial t} \Delta t = \vec{v}_{B1} \cdot \Delta t.$$

С учетом проделанного представим свертку тензора по вектору в виде таблицы

$$\left\{ \begin{array}{cccc} \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_{B1} \cdot \Delta t \\ \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_{B2} \cdot \Delta t \\ \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_{B3} \cdot \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right\}. \quad (4)$$

Для удобства расчета приведем в соответствие полученные результаты матричному методу.

В матричном методе первые члены ряда Тейлора (1), соответствующие переносу начала новой системы координат, включаются в объект (4), увеличивая его размер до величины 5×5 :

$$\left\{ \begin{array}{c} X_{B1} \\ X_{B2} \\ X_{B3} \\ \Delta t \\ 1 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{ccccc} \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_1 \cdot \Delta t & \vec{L}_1 \\ \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_2 \cdot \Delta t & \vec{L}_2 \\ \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A1}} \Delta X_{A1} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A2}} \Delta X_{A2} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A3}} \Delta X_{A3} & \vec{v}_3 \cdot \Delta t & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right\}. \quad (5)$$

Объект в правой части равенства, каждая строка которого есть радиус-вектор точки в новой системе координат, может быть разбит на две части: матрицу размером 5×5 и матрицу-столбец (вектор) 5×1 , получаем матричное представление

$$\left| \begin{array}{c} X_{B1} \\ X_{B2} \\ X_{B3} \\ \Delta t \\ 1 \end{array} \right| = \left| \begin{array}{ccc} \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial \vec{x}_{B1}}{\partial x_{A3}} \\ \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial \vec{x}_{B2}}{\partial x_{A3}} \\ \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A1}} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A2}} & \frac{\partial \vec{x}_{B3}}{\partial x_{A3}} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right| \times \left| \begin{array}{c} \Delta X_{A1} \\ \Delta X_{A2} \\ \Delta X_{A3} \\ \Delta t \\ 1 \end{array} \right|. \quad (6)$$

Здесь последний столбец матрицы 5×5 — вектор начального смещения систем координат (фактическая длина звеньев механизма — это первый член в ряде Тейлора), предпоследний столбец — скорость переносного движения, если длина звеньев меняется (скорость выноса стрелы экскаватора).

В отличие от представления в виде ряда Тейлора (1)–(4), в уравнении (6) идут операции с объектами разной природы, например, справа матрица-столбец 5×1 содержит в себе объекты размерности [м], [с] и скалярную единицу.

Запись матрицы (6) отличается от принятой в матричном методе [2] по форме, но по сути там тоже можно включить условие скорости смещения начала координат в длину вектора L , в данном случае форма записи (6) наглядно отражает вклад каждого из начальных условий.

Визуально вклад компонентов ряда Тейлора, имеющих разную природу, можно изобразить в виде схемы, представленной на рис. 1.

Для решения задачи достаточно корректно сформулировать три математические величины и совершить последовательность операций:

1. X_A — радиус-вектор начального звена в связанной с ним системе координат это всегда $X_{A\text{fin}} = \{0, 0, 0, t, 1\}$;

2. T_{BA} — тензоры поворота-скорости смещения, для плоского случая это просто \cos и \sin угла поворота последующей системы координат относительно предыдущей и скорости изменения длин звеньев, если таковые существуют, для первого звена тензор поворота можно представить в виде матрицы (для случая, когда ось x параллельна звену):

$$\begin{vmatrix} \cos(\varphi_1) & \sin(\varphi_1) & 0 & \bar{v}_1 & \bar{L}_1 \\ -\sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{vmatrix}; \quad (7)$$

3. L_B — длины звеньев в начальный момент времени.

Последовательно выполняя операцию (7) от одной кинематической пары к другой: $A \rightarrow B, B \rightarrow C \dots$, приходим к последней кинематической паре, связанной с рукой манипулятора.

Таким образом, решается задача расчета всех радиус-векторов механизма. Далее кинематический анализ заключается в дифференцировании

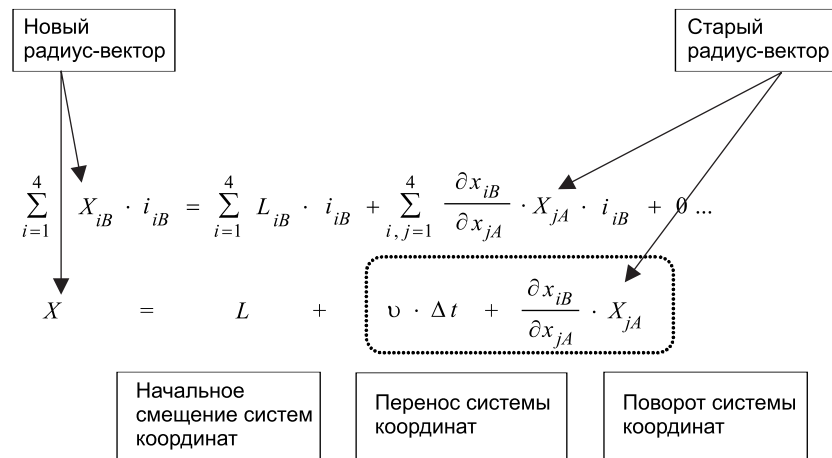


Рис. 1. Объектное представление составных частей ряда Тейлора для кинематического анализа манипуляторов со звеньями переменной длины

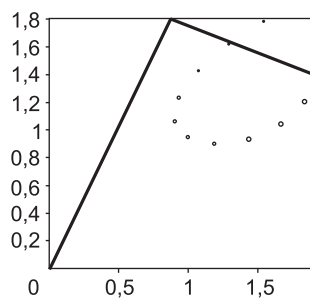


Рис. 2. Рычажный механизм для обработки плоской поверхности

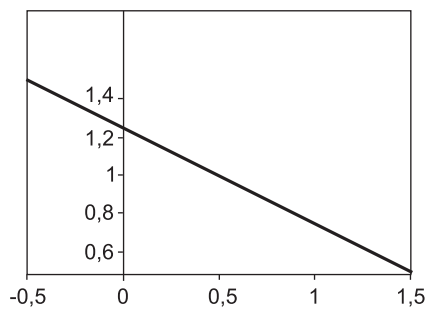


Рис. 3. Траектория конечного звена, соединяющая две произвольные точки на плоскости

радиус-векторов, например, в соответствии с методом, изложенным в [4]. Предложенный метод реализован программно.

Определение законов изменения обобщенных координат двухрычажного механизма. Для описания произвольной траектории в плоскости (x, y) достаточно двух обобщенных координат, т.е. механизм должен иметь два независимых привода. Самый простой механизм, конечное звено которого движется в плоскости по заданной траектории, — трехзвенный открытый двухподвижный механизм, содержащий стойку и два рычага.

Механизм на рис. 2 может быть использован для синтеза любой плоской траектории. Предположим, задача этого механизма — обработка плоской поверхности, конечное звено содержит либо лопатку смесителя, либо шлифовальный круг. Для тестирования метода зададим движение выходного звена в виде:

- прямой, соединяющей две произвольные точки на плоскости;
- равномерного вращения конечной точки конечного звена по окружности;
- фигуры Лиссажу.

В результате синтеза параметров движения звеньев по описанному методу получены плоские кривые, изображенные на рис. 3–5.

На рис. 4 аналитическое представление траектории:

$$\begin{aligned} > x: = c \cos(t), \\ > y: = c \sin(t). \end{aligned}$$

На рис. 5 аналитическое представление траектории — фигура Лиссажу:

$$\begin{aligned} > xc: = c \cos(at), \\ > yc: = c \sin(bt), \end{aligned}$$

где a — число петель по y ; b — число петель по x ; c — масштаб.

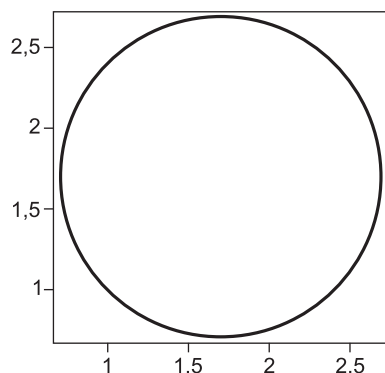


Рис. 4. Траектория конечного звена двухподвижного трехзвенного рычажного механизма в виде окружности, полученная в результате кинематического синтеза

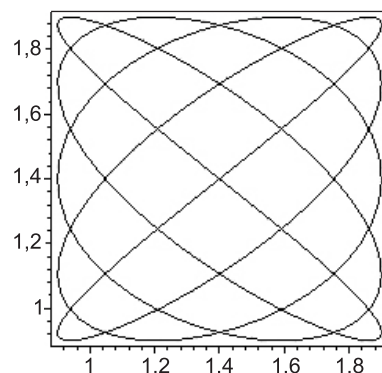


Рис. 5. Траектория конечного звена двухподвижного трехзвенного рычажного механизма для обработки плоского квадрата

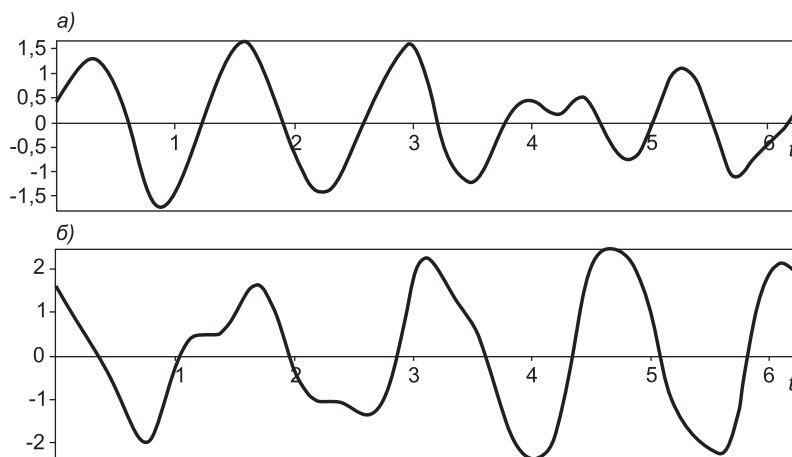


Рис. 6. Законы движения в кинематических парах трехзвенного открытого рычажного механизма с подвижностью 2, обеспечивающие равномерное покрытие поверхности квадрата

а — угловая скорость в кинематической паре стойка — первое звено; б — угловая скорость в кинематической паре между звеньями 1 и 2

Последний пример может быть использован в механизме для обработки емкости с квадратным дном. Видно, что конечное звено механизма с высокой плотностью покрывает застойные зоны емкости — в углах и вдоль ребер, и с равной плотностью покрывает середину дна емкости. Причем скорость движения скребка в застойных зонах минимальна, что позволяет поднимать тяжелый осадок, прикладывая большее усилие, а в центре увеличить скорость, что интенсифицирует смешивание.

Законы изменения углов в приводах каждого из двух плеч манипулятора (см. рис. 2) получаются в результате синтеза. Если в кинематических парах механизма установлены движители с регулируемой скоростью вращения, то закон управления движителями, полученный в результате синтеза, примет вид, представленный на рис. 6.

Выводы. 1. Для открытых механизмов сформулирован метод, описывающий переход от одной системы координат к другой в виде первых двух членов ряда Тейлора: вектора переноса и свертки тензора поворота, в которую входит свертка по времени скорости изменения длины звена.

2. Метод позволяет выполнять анализ и синтез открытых пространственных механизмов по заданной траектории конечного звена, в том числе механизмов с переменной длиной звеньев.

3. Предложенный метод является расширением матричного метода с размером матриц 5×5 .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. В у л ь ф с о н, И. И. Механика машин [Текст]/И. И. Вульфсон, М. Л. Ерахов, М. З. Ковловский и др.: учеб. пособие для вузов.— М.: Высш. шк., 1996.
2. К р а с к о в с к и й, Е. А. Расчет и конструирование приборов и вычислительных систем [Текст]/Е. А. Красковский, Ю. А. Дружинин, Е. М. Филатова.— М.: Высш. шк., 1991.
3. М а ш н е в, М. М. Теория механизмов и машин [Текст]/М. М. Машнев, Е. А. Красковский, П. А. Лебедев: учеб. пособие для студ. машиностроит. специальностей вузов.— Л.: Машиностроение, 1980.
4. Ю д и н, Б. В. Применение тензорного исчисления при анализе механических систем [Текст] / Б. В. Юдин//Механика техн. систем: сб. тр.— Новосибирск: НГТУ, 2008.

ГИЛЕТА В. П., д-р техн. наук, проф.

Новосибирский государственный технический университет

*ЮДИН Б. В., канд техн. наук
Новосибирский государственный технический университет*

Получено 20.03.09

Gileta V. P., doctor of technical sciences, professor, Novosibirsk State Technical University, Russia

Yudin B. V., candidate of technical sciences, Novosibirsk State Technical University, Russia

THE KINEMATIC ANALYSIS OF MECHANISMS WITH HELP OF TAYLOR SERIES

Using Taylor series for transformations of the transfer and relative coordinate systems connected to parts of the lever mechanism, the advanced matrix method is received, allowing to analyze open lever mechanisms with variable length of parts and synthesis of kinematic parameters under the set law of movement of a final link...

the kinematic analysis of mechanisms, matrix method, Taylor series.

REFERENCES

1. Vul'fson, I. I. Mechanics of machines [Text]/I. I. Vul'fson, M. L. Erahov, M. Z. Kolovskij, et al.: The manual for technical colleges.— M.: High. sch., 1996.
2. Kraskovskij, E. A. Calculation and designing of devices and computing systems [Text]/E. A. Kraskovskij, J. A. Druzhinin, E. M. Philatova.— M.: High. sch., 1991.
3. Mashnev, M. M. Theory of mechanisms and machines [Text]/M. M. Mashnev, E. A. Kraskovskij, P. A. Lebedev: the Manual for students of machine-building specialities of high schools.— L.: Mechanical engineering, 1980.
4. Yudin, B. V. Tensor application at the analysis of mechanical systems [Text]/B. V. Yudin // Mechanics of techn. systems: coll. proc.— Novosibirsk: NSTU, 2008.

УДК 691.31:678.06:620.191.33

П. А. ГОЛОВИНСКИЙ, И. И. УШАКОВ, С. И. УШАКОВ

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРБЕТОНОВ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

Установлена связь образования и роста трещин при сжатии эпоксидного полимербетона с характеристиками потока сигналов акустической эмиссии. Найдены критерии, позволяющие определять смену статистических закономерностей трещинообразования в масштабе реального времени на основе анализа накопительной зависимости сигналов акустической эмиссии...

полимербетон, акустическая эмиссия, трещинообразование.

Эпоксидные полимербетоны обладают таким комплексом свойств, который во многих случаях делает их незаменимыми в качестве несущих строительных конструкций [1]. К настоящему времени эпоксидные полимербетоны нашли широкое применение при изготовлении защитных покрытий, плиточных материалов, наливных полов, устройстве стыков сборных элементов. Эпоксидный полимербетон является химически стойким, быстротвердеющим строительным материалом, что позволяет использовать его в химически агрессивных средах в качестве быстротвердеющего ремонтного состава. Он, как и другие каменные материалы, склонен к хрупкому разрушению, т.е. к разрушению путем образования и распространения дефектов типа трещин. Процесс разрушения в таких материалах не происходит мгновенно, от момента образования трещины и до начала ее критического роста проходит некоторое время [2]. Если в эпоксидном полимербетоне своевременно обнаружить растущий дефект, определить его местоположение, скорость развития и размеры, то на основе полученной информации можно предотвратить не только разрушение конструкции в целом, но и образование в ней трещин значительных размеров. В настоящее время применение эпоксидных полимербетонов при изготовлении несущих конструкций сдерживается из-за недостаточной их изученности в плане трещиностойкости. Учитывая специфическое назначение конструкций из полимербетонов для эксплуатации в сильно агрессивных средах, изучение трещиностойкости приобретает особенно важное значение.

Известно, что при деформировании каменных материалов в их структуре возникают трещины, являющиеся источниками акустического шума. Явление излучения материалами акустических шумов получило название «акустическая эмиссия». В физическом смысле акустическая эмиссия — это распространение упругих колебаний (акустических волн), генерируемых внезапной деформацией напряженного материала [4].

Акустико-эмиссионный метод контроля заключается в регистрации волн упругих колебаний специальными приборами с последующей обработкой и интерпретацией полученных данных. Существенное преимущество метода акустической эмиссии — возможность контролировать состояние всего объема материала. Акустико-эмиссионный метод испытаний — весьма эффективный пассивный метод контроля образования и роста трещин. Он позволяет установить различие между опасными и

безопасными дефектами в структуре материала строительных конструкций, находящихся под нагрузкой. Современные приборы акустической эмиссии регистрируют образование микротрещин с размерами вплоть до 0,001 мм, что значительно превосходит по точности традиционные ультразвуковые и иные методы неразрушающего контроля.

В первую очередь необходимо обратить внимание на процессы трещинообразования в полимербетоне при сжатии, поскольку несущие конструкции проектируются таким образом, чтобы исключить работу полимербетона на растяжение и передать растягивающие усилия на арматуру. Цель данной работы — изучение таких процессов с применением методов регистрации сигналов акустической эмиссии.

В ходе исследований для получения опытных элементов изготавливался полимербетонный состав на основе эпоксидной смолы. Размеры опытных образцов были 40 × 40 × 160 мм. Соотношение компонентов полимербетонной смеси по массе составляло: смола ЭД-20 — 16 %, андезитовая мука — 11, щебень фракции 5...7 мм — 50, песок кварцевый — 20, отвердитель ПЭПА — 3 %.

В соответствии с программой экспериментальных исследований при определении прочностных и деформационных характеристик полимербетона на сжатие за основу была принята методика ГОСТ 10180–78 [3]. Созданные экспериментальные условия соответствовали одноосному сжатию кратковременной равномерно распределенной нагрузкой.

Наиболее полную информацию о сигналах акустической эмиссии удалось получить с помощью двухканальной системы регистрации акустической эмиссии PCI-2 (Physics Acoustic Corporation) при проведении совместных исследований с сотрудниками Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. По результатам испытания 15 полимербетонных призм напряжение разрушения при сжатии кратковременной нагрузкой составило величину $R = 75$ МПа. Полное разрушение наступало при достижении скоростью акустической эмиссии величины в среднем 400 1/с. С ростом уровня нагружения при постоянном его темпе отмечен рост скорости излучения сигналов трещинообразования.

В соответствии с современными представлениями о механике разрушения в бетонах можно выделить четыре стадии разрушения [4]:

- 1) уплотнение (0...0,2) R ;
- 2) появление микротрещин (0,2...0,75) R ;
- 3) появление макротрещин (0,75...0,96) R ;
- 4) активное разрушение (0,96 и выше) R .

Кривая нагружения позволяет четко выделить из всех характерных стадий разрушения только начало 4-й стадии, соответствующей исчерпанию прочности. В то же время для оценки состояния несущих строительных конструкций из эпоксидного полимербетона, работающих под нагрузкой, необходима более детальная информация о разрушениях.

Существенным недостатком применения кривой нагружения к оценке разрушения является также невозможность ее построения в режиме реального времени при контроле технического состояния несущей конструкции, уже эксплуатируемой под нагрузкой. С этой точки зрения изучение скорости трещинообразования по величине акустической эмиссии позволяет получить больше информации для определения безопасного уровня нагружения конструкции.

На рис. 1 приведен вид кривой скорости излучения сигналов акустической эмиссии.

Анализ зависимости скорости акустической эмиссии как функции нагружения показал, что она может быть описана единой зависимостью вида

$$V = 0,005 \times e^{4,307 \times (\sigma / R)}$$

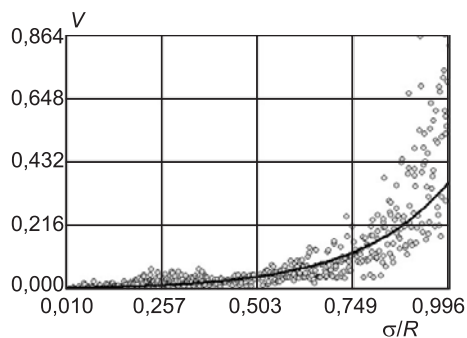


Рис. 1. График зависимости скорости акустической эмиссии от нагрузки при кратковременных испытаниях в относительных координатах

V — относительная скорость акустической эмиссии; σ/R — относительное напряжение в материале

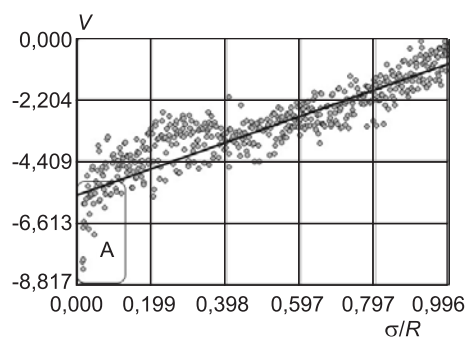


Рис. 2. Зависимость логарифма скорости акустической эмиссии от величины нагружения

точки — экспериментальные данные; А — начальная область нагружения

с коэффициентом корреляции $r = 0,874$. Соответствующая зависимость в логарифмическом масштабе по оси скорости показана на рис. 2. Начальная область А выпадает из общей зависимости, поскольку отражает начальный период времени, когда происходит разрушение мелких случайных дефектов. В то же время непосредственно кривая скорости акустической эмиссии не позволяет уверенно распознавать различные стадии разрушения.

Из этого следует, что наряду с контролем изменения скорости акустической эмиссии необходимо использовать альтернативные критерии, позволяющие точнее определить наступление очередной стадии трещинообразования.

В качестве основы для установления таких критериев контроля процесса трещинообразования в эпоксидном полимербетоне может выступать накопительная кривая сигналов акустической эмиссии. Эта кривая монотонно возрастает в течение всего процесса нагружения образца. Накопительный график акустической эмиссии более удобен для анализа, на нем отсутствует резко выраженный разброс экспериментальных данных (рис. 3).

При визуальном анализе накопительного графика сигналов акустической эмиссии можно выделить три характерных участка, показанных на рис. 3. Корреляционный и регрессионный анализ накопительной кривой акустической эмиссии показал, что каждый из этих участков имеет свою регрессионную зависимость суммарного счета сигналов эмиссии от нагрузки.

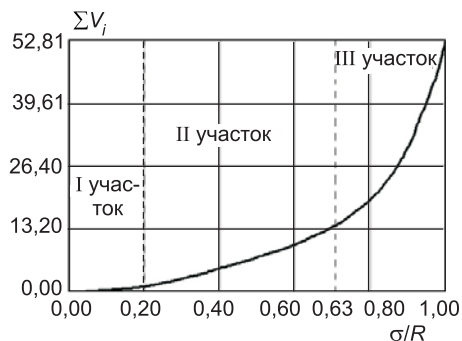


Рис. 3. Накопительный график акустической эмиссии

ΣV_i — суммарный счет АЭ; σ/R — относительный уровень нагрузки

1. На участке I происходит уплотнение материала, и он характеризуется линейной зависимостью суммарного счета сигналов эмиссии от нагрузки с коэффициентом корреляции $r \approx 0,9$ (рис. 4, а).

2. На участке II идет образование и развитие микротрещин, и он характеризуется степенной зависимостью суммарного счета сигналов эмиссии от нагрузки с коэффициентом корреляции $r \approx 0,9$ (рис. 4, б).

3. На участке III происходят образование и рост макротрещин, что

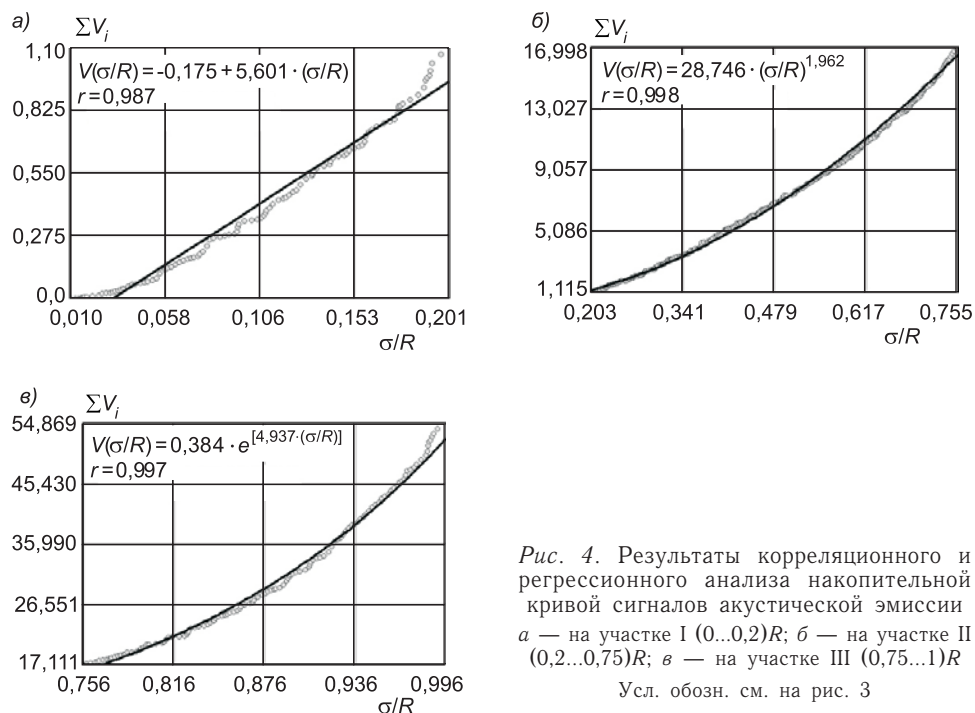


Рис. 4. Результаты корреляционного и регрессионного анализа накопительной кривой сигналов акустической эмиссии
 а — на участке I (0...0,2)R; б — на участке II (0,2...0,75)R; в — на участке III (0,75...1)R
 Усл. обозн. см. на рис. 3

характеризуется экспоненциальной зависимостью с коэффициентом корреляции $r \approx 0,9$ (рис. 4, в).

Очевидным достоинством применения накопительного графика является высокая корреляция ($r \geq 0,9$) всех трех регрессионных функций с экспериментальными данными.

Таким образом, определение опасного уровня нагружения конструкции из эпоксидного полимербетона при действии кратковременной сжимающей нагрузки в реальном масштабе времени можно осуществлять по смене функциональной зависимости скорости трещинообразования. Момент смены функциональной зависимости может быть определен при сопоставлении результатов регрессионного анализа накопительной зависимости сигналов акустической эмиссии. В момент перехода 1–2 линейная зависимость сменяется степенной, а при переходе 2–3 степенная зависимость сменяется экспоненциальной, что отражает постепенный рост темпа разрушения по мере увеличения нагружения. Однако и накопительный график скорости АЭ не дает точного момента, в который происходит смена вида зависимости скорости от уровня нагрузки.

Наличие трех различных по функциональной зависимости участков более наглядно проявляется при построении накопительной зависимости сигналов акустической эмиссии в логарифмическом масштабе (рис. 5), где отчетливо видно наличие точки перегиба.

Это позволяет построить единую аппроксимацию зависимости кубическим полиномом

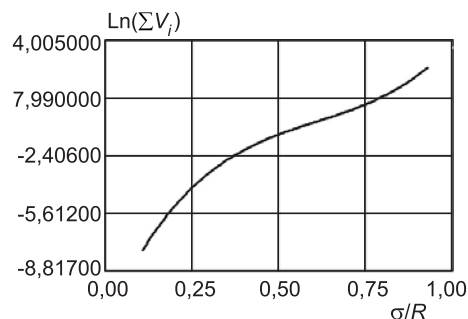


Рис. 5. Приближение логарифма зависимости накопительной эмиссии от времени кубическим полиномом
 Усл. обозн. см. на рис. 3

$$\ln \sum_i V_i = -3,0561 + 20,8288 \cdot (\sigma / R) - 28,8314 \cdot (\sigma / R)^2 + 15,2336 \cdot (\sigma / R)^3$$

с коэффициентом корреляции $r = 0,974$, а также определить точку перегиба

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dt^2} [-3,0561 + 20,8288 \cdot (\sigma / R) - 28,8314 \cdot (\sigma / R)^2 + 15,2336 \cdot (\sigma / R)^3] = \\ = 91,4016 \cdot (\sigma / R) - 57,6628 = 0, \\ (\sigma / R) = 0,631. \end{aligned}$$

К этому моменту, по всей видимости, следует отнести начало объединения ранее равномерно рассеянных по объему микротрещин в некие локализованные ансамбли.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод о некотором безопасном уровне напряжений $\sigma = 0,63 \cdot R$, при котором происходит изменение вида зависимости накопительной акустической эмиссии. В испытаниях реальных конструкций пробной нагрузкой смена зависимости скорости эмиссии должна являться указанием для немедленного прекращения испытаний, так как при дальнейшем увеличении нагрузки велик риск формирования магистральных трещин разрушения.

Проведенные исследования позволяют в режиме реального времени контролировать уровень безопасной нагрузки, определять наступление критического состояния конструкции, предшествующего ее полному разрушению, а также сделать выводы об особенностях трещинообразования в эпоксидном полимербетоне на различных стадиях деформирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Корнеев, А. Д. Эпоксидные полимербетоны [Текст]: монография / А. Д. Корнеев, Ю. Б. Потапов, В. И. Соломатов. — Липецк: ЛГТУ, 2001. — 181 с.
2. Андрейкив, А. Е. Метод акустической эмиссии в исследовании процессов разрушения [Текст] / А. Е. Андрейкив, Н. В. Лысак; отв. ред. В. В. Панасюк; АН УССР. Физ.-мех. ин-т. — Киев: Наук. думка, 1989. — 176 с.
3. Методические рекомендации по определению основных механических характеристик бетонов при кратковременном и длительном нагружении [Текст]. — М.: НИИЖБ, 1984. — 53 с.
4. Лужин, О. В. Неразрушающие методы испытания бетона [Текст] / О. В. Лужин, В. А. Волохов, Г. Б. Шамаков и др.; совм. изд. СССР-ГДР; под ред. О. В. Лужина. — М.: Стройиздат, 1985. — 236 с.

ГОЛОВИНСКИЙ П. А., д-р физ.-мат. наук, проф.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

УШАКОВ И. И., канд. техн. наук, доц.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

УШАКОВ С. И., асп.

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

Получено после доработки 16.03.09

Golovinski P. A., doctor of physical and mathematical sciences, professor, Voronezh State University of Architecture and Construction, Russia

Ushakhov I. I., candidate of technical sciences, assistant professor, Voronezh State University of Architecture and Construction, Russia

Ushakhov S. I., post graduate student, Voronezh State University of Architecture and Construction, Russia

ACOUSTIC EMISSION ANALYSIS OF CRACK GROWTH RESISTANCE IN EPOXY POLYMERIC CONCRETE

Correlation of the cracks formation and growth inside the epoxy concrete test pieces with the characteristics of a signal stream of acoustic emission has been established. The criteria have been found, allowing to determine the moment of transition from micro to macro cracks formation in the scale of real time on the basis of the analysis of sum dependence of signals of acoustic emission...

polymer concrete, acoustic emission, crack formation.

REFERENCES

1. Korneev, A. D. Epoxy polymer concrete [Text]: Monography/A. D. Korneev, J. B. Potapov, V. I. Solomatov.— Lipetsk: LGTU, 2001.— 181 p.
2. Andreykiv, A. E. Method of acoustic emission in estimation process of destruction [Text]/A. E. Andreykiv, H. V. Lisak; red. resp. V. V. Panasyk; AN USSR. The institute of physics and mechanics.— Kiev: Nauk. Dumka, 1989.— 176 p.
3. Recommendation for testing of main mechanical characteristic of concrete under instantaneous and continuous compression [Text].— M.: NIIZB, 1984.— 53 p.
4. Luzhin, O. V. Nondestructive method tests of concrete [Text]/O. V. Luzhin, V. A. Volohov, G. B. Shmakov et al.: Join publishing SSSR—GDR; under the direction of O. V. Luzhin.— M.: Stroyizdat, 1985.— 236 p.