

по высоте относительно срединной поверхности жесткого несжимаемого в поперечном направлении заполнителя. На первом этапе постановки задачи материалы слоев считаются линейно упругими. Применив вариационный принцип Гамильтона – Остроградского, используя кинематические гипотезы С. П. Тимошенко для каждого слоя и условия непрерывности перемещений на границах контакта слоев, получены уравнения движения оболочки в перемещениях для малых деформаций.

Демпфирующие свойства материалов слоев трехслойной оболочки учитываются на основе концепции комплексного модуля упругости  $E_k^* = E_k(a_k + ib_k)$ ,  $G_k^* = G_k(a_k + ib_k)$ , где  $E_k$ ,  $G_k$  – модули упругости материала,  $a_k = (4 - \gamma_k^2)/(4 + \gamma_k^2)$ ,  $b_k = 4\gamma_k^2/(4 + \gamma_k^2)$ ,  $\gamma_k$  – коэффициент внутреннего трения материала  $k$ -го слоя ( $k = 1, 2, 3$ ),  $i$  – мнимая единица. Уравнения движения оболочки в этом случае получаются заменой в уравнениях идеально упругой конструкции модулей упругости  $E_k$ ,  $G_k$  на соответствующие операторы  $E_k^*$ ,  $G_k^*$ :

$$[M]\{\ddot{U}\} + [\tilde{L}]\{U\} = \{F\},$$

где  $[M]$  – матрица масс;  $\{U\}^T = \{u, v, w, \psi_1^{(k)}, \psi_2^{(k)}\}$  – искомая вектор-функция перемещений;  $u(x_1, x_2, t)$ ,  $v(x_1, x_2, t)$  – тангенциальные перемещения точек срединной поверхности заполнителя в направлении координатных осей (линий главных кривизн оболочки)  $x_1$  и  $x_2$  соответственно;  $w(x_1, x_2, t)$  – прогиб;  $\psi_1^{(k)}(x_1, x_2, t)$  и  $\psi_2^{(k)}(x_1, x_2, t)$  – полные углы поворота прямолинейного элемента  $k$ -го слоя в координатных плоскостях  $x_1Oz$  и  $x_2Oz$ ;  $[\tilde{L}] = [\tilde{l}_{ij}]$  ( $i, j = 1, \dots, 9$ ) – матрица, элементами которой являются линейные дифференциальные операторы по переменным  $x_1$  и  $x_2$  с постоянными комплексными коэффициентами;  $\{F\}$  – вектор нагрузок.

Рассмотрены следующие модельные задачи: воздействие ударного импульса:  $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(t)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$ ; воздействие сосредоточенной силы  $F_0 \exp(-i\varphi t^2/2)\delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})$  на верхний несущий слой оболочки; стационарные вынужденные колебания оболочки от вибрационной нагрузки  $q_n(x_1, x_2, t) = \delta(x_1 - x_{1p})\delta(x_2 - x_{2p})e^{i\varphi t}$ . Здесь  $F_0$  – амплитуда возмущающей силы,  $\varphi$  – скорость изменения частоты,  $\delta(x)$  – дельта-функция Дирака,  $x_{1p}$  и  $x_{2p}$  – координаты точки воздействия нагрузки. Решение сформулированных начально-краевых задач построено на основе методов Фурье и преобразования Лапласа по времени. Стационарные вынужденные колебания исследовались на основе метода комплексных амплитуд. Специальный выбор координатных функций у компонентов вектора перемещений  $\{U\}$  в следующем виде:

$$u = \sum_{m,n} \tilde{U}_{mn}(t) \cos(m\varphi) \sin(\tilde{n}x), \quad v = \sum_{m,n} \tilde{V}_{mn}(t) \sin(m\varphi) \cos(\tilde{n}x),$$

$$w = \sum_{m,n} \tilde{W}_{mn}(t) \sin(m\varphi) \sin(\tilde{n}x), \quad \psi_1^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{1mn}^{(k)}(t) \cos(m\varphi) \sin(\tilde{n}x),$$

$$\psi_2^{(k)} = \sum_{m,n} \tilde{\Psi}_{2mn}^{(k)}(t) \sin(m\varphi) \cos(\tilde{n}x), \quad \tilde{n} = n\pi/L \quad (k = 1, 2, 3)$$

обеспечивает автоматическое удовлетворение однородных граничных условий свободного опирания кромок на жесткие неподвижные опоры, которые можно представить в перемещениях:  $u_1 = v_2 = w = \psi_1^{(k)}|_{x_1=0} = \psi_2^{(k)}|_{x_2=0} = 0 \quad (k = 1, 2, 3)$ .

УДК 666.972

## ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ДОБАВОК НА ТЕПЛОЫДЕЛЕНИЕ ЦЕМЕНТА

С. В. ГУЩИН, А. А. ДРОЗД, В. В. БАБИЦКИЙ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Современная практика строительства предполагает широкое использование разнообразных химических добавок в бетоне (пластификаторы, ускорители твердения и пр.), способных кардинально

изменять свойства бетонных смесей и бетонов в необходимых направлениях. Производителей различных модификаторов бетона в Республике Беларусь, а также поставщиков добавок из-за рубежа достаточно, что обуславливает и зримую конкуренцию в данной нише технологии бетона. Все добавки широко рекламируются, при этом выделяются именно положительные свойства добавок (если они, конечно, есть), а отрицательные зачастую замалчиваются, что представляется вполне естественным. Закономерен вопрос: как рядовому инженеру-технологу разобраться в действительности той или иной добавки. При этом надо иметь в виду, что эффективность действия добавок не универсальна, а зависит от множества факторов, в первую очередь, от вида и расхода цемента, водоцементного отношения, условий твердения бетона и пр. Методики оценки свойств добавок существуют, но практически все они трудоемки, не оперативны, поскольку обычно привязаны к возрасту бетона 28 суток, требуют достаточно высокой квалификации лица, проводящего испытания. Отсюда следует вывод: строительным лабораториям настоятельно необходима методика, позволяющая оперативно оценить эффективность химической добавки, причем на используемом в настоящее время на данном предприятии цемента.

В связи с изложенным БНТУ была предложена именно такая упрощенная методика, основывающаяся на взаимосвязи свойств химических добавок и кинетики тепловыделения цемента. В течение суток изучается изменение температуры цементного теста с водосодержанием, соответствующим предполагаемому водоцементному отношению бетонной смеси. Затем строится график изменения температуры цементного теста относительно начальной. Анализ его позволяет выявить: стабильность температуры в течение некоторого начального промежутка времени (это так называемый «индукционный период»), что определяет в основном начало схватывания цемента ( $\tau_{инп}$ ); последующий подъем температуры в течение некоторого времени ( $\tau_{tmax}$ ) до некоего экстремума ( $t_{max}$ ), а также скорость подъема температуры ( $V_t$ ). Эти показатели характеризуют интенсивность структурообразования цементного теста, поскольку процесс изменения температуры определяется кинетикой гидратации цемента.

Рассмотрим действенность методики на примере исследования некоторых добавок, представленных, в частности, СООО «СТАХЕМА-М» (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры твердеющего цементного теста

Добавка	Дозировка добавки, % от массы цемента	В/Ц	$\tau_{инп}$ , ч	$\tau_{tmax}$ , ч	$t_{max}$ , °C	$V_t$ , °C/ч
Без добавки	–	0,30	6,0	12,5	40,5	5,3
	–	0,40	6,5	13,5	34,0	4,0
	–	0,50	7,0	14,0	25,5	2,8
Замедлитель Retardal	1,0	0,40	24,5	32,5	34,5	3,6
	1,0	0,50	15,5	23,5	19,0	1,6
Стахемент F	1,0	0,30	6,0	12,5	43,0	5,7
	1,0	0,40	6,5	14,0	36,5	4,1
	1,0	0,50	7,0	16,0	25,0	2,1
Стахемент 2000M	–	0,40	5,5	11,5	38,5	5,4
	0,5	0,40	6,0	10,0	51,5	11,4
	1,0	0,40	7,5	11,0	62,0	16,0
	1,5	0,40	6,5	9,0	46,5	16,2
Стахелюкс	–	0,28	6,0	10,0	31,0	6,3
	1,0	0,28	7,0	11,0	41,0	8,8
	1,5	0,28	8,5	13,0	37,5	7,0
	2,0	0,28	9,5	13,0	41,0	10,0
Стахемент NS	–	0,40	5,5	11,5	39,0	5,5
	1,0	0,40	5,0	11,0	43,5	6,3
	2,0	0,40	4,5	10,0	45,5	7,2
	3,0	0,40	4,5	9,5	43,5	7,5

В опытах использовали цемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марки 500, но различных партий, поскольку испытания проводили не одновременно.

Гидратационные процессы цементного теста без добавок полностью отвечают общепризнанным воззрениям: с увеличением водоцементного отношения с 0,3 до 0,5 возрастают длительность индукционного периода и время наступления температурного максимума, сокращаются сам температурный максимум и, что особенно зримо, скорость подъема температуры. В комплексе всё это сви-

детельствует об интенсификации гидратации цемента со снижением начального водосодержания цементного теста. Данная тенденция сохраняется и при введении различных химических добавок, что особенно ярко выражается для замедлителя процессов твердения Retardal.

Обратимся, например, к прайс-листу СООО «СТАХЕМА-М» в части добавки Стахемент NS: «Ускоритель твердения для бетонов и растворов... Снижает точку замерзания жидкой фазы в бетоне. Действительно, добавка является ускорителем твердения. При этом снижается и температура замерзания цементного теста с данной добавкой (установлено по аналогичной методике).

Таким образом, предложена простая, доступная для строительных лабораторий методика оперативной оценки эффективности химических добавок, что, безусловно, будет способствовать повышению технологической и технико-экономической эффективности от их применения.

УДК 69:697

## К ВОПРОСУ ОБ ОСНАЩЕНИИ ИНЖЕНЕРНЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ДОМОВ

А. С. ДАВИДОВИЧ, Т. Л. ДАВИДОВИЧ, И. Н. БОГОСЛОВСКИЙ

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Республика Беларусь

Интерес к энергоэффективным домам в Беларуси постепенно растет. Это связано с утверждением комплексной программы по проектированию, строительству и реконструкции энергоэффективных жилых домов [1], а также периодически растущими ценами на энергоресурсы. Львиную долю в снижении энергопотребления энергоэффективных зданий занимает энергоэффективное инженерное оборудование, работающее за счет альтернативных источников энергии, поэтому рассмотрим одну из данных установок и целесообразность ее использования в климатических и экономических условиях Беларуси.

На конкретном примере разберем энергопотребление здания и эксплуатационные затраты на его отопление за отопительный период. В статье рассмотрены системы отопления, работающие за счет как традиционных источников энергии (твердое топливо, природный газ, электроэнергия), так и альтернативных (солнечная энергия, тепловая энергия грунта, вода, воздух).

В качестве традиционных источников рассмотрим природный газ и электроэнергию, а в качестве альтернативного источника – тепловую энергию грунта. Твердое топливо не будем учитывать при расчете традиционных систем в связи с неудобством хранения и эксплуатации данного ресурса.

Объектом расчета является одноэтажный жилой дом в г. Бресте. Отапливаемая площадь – 128 м<sup>2</sup>. В доме запроектирована местная система отопления, водяная с чугунными радиаторами. Для максимального приближения к фактическому значению энергопотребления отопительных установок расчет велся не по средним температурам отопительного периода, а по фактическим значениям температур наружного воздуха каждого дня и ночи отопительных периодов трех лет. Для примера на рисунках 1 и 2 предоставлены данные о температурах и соответствующие им теплопотребление здания за отопительный сезон 2009–2010 года по данным [2]. Такой подробный расчет связан не только с фактическим энергопотреблением, но и с разными тарифами на электроэнергию в разное время суток, а также в дальнейшем с возможностью расчета бивалентно-параллельного и бивалентно-альтернативного режима работы теплового насоса.

Вначале подобраны отопительные установки, работающие на природном газе и электроэнергии. Для этого составим тепловой баланс стандартными методами для абсолютной минимальной температуры холодного периода года для г. Бреста. При наружной температуре воздуха  $t_n = -36^\circ\text{C}$  [3] здание будет потреблять 14,6 кВт·ч, следовательно, отопительная установка должна обеспечивать не менее данной нагрузки. Примем газовый и электрический котел с техническими характеристиками, представленными в таблице 1 [4,5].

Имея данные о теплопотреблении и технические характеристики принятых отопительных установок, можно рассчитать годовое потребление энергоресурсов зданием за 3 года.