

МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.816.2

РАЦИОНАЛЬНЫЕ РЕЖИМЫ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ
ЦЕМЕНТНО-СТРУЖЕЧНЫХ ПЛИТ

А. Н. ОБЛИВИН, А. К. ВОСКРЕСЕНСКИЙ, Б. Л. КАЦ

Московский лесотехнический институт

Одним из современных строительных материалов, сочетающих преимущества древесины и цемента, являются цементно-стружечные плиты (ЦСП). Атмосферо-, огне-, биостойкость, долговечность и нетоксичность в совокупности с достаточно высокой механической прочностью обуславливают широкие возможности их применения в индустриальном малоэтажном домостроении.

Однако технология изготовления ЦСП на сегодняшний день отработана недостаточно. К наиболее сложным, длительным и энергоемким

операциям [7], формирующим структуру материала и, в конечном счете, определяющим качественные показатели ЦСП, можно отнести тепловую обработку спрессованных пакетов древесно-цементной смеси в камере твердения. Поэтому разработка рациональных режимов тепловой обработки ЦСП является актуальной научной задачей.

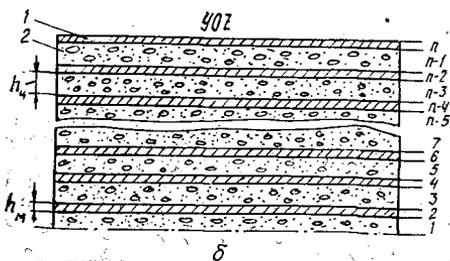
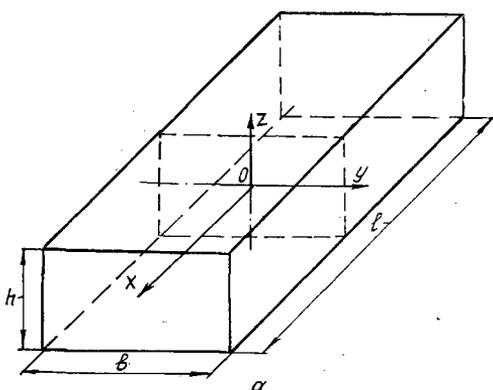


Рис. 1. Условное изображение силовой кассеты с твердеющими цементно-стружечными плитами (а) и ее поперечное сечение (б): 1 — металлический поддон; 2 — древесно-цементная смесь

Для расчета температурных полей и степени гидратации цемента при тепловой обработке ЦСП в силовых кассетах (рис. 1) была разработана физико-математическая модель, включающая ряд уравнений.

Уравнение теплопроводности в ЦСП с учетом внутреннего источника теплоты (теплоты гидратации цемента в плите):

$$c_p \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = \nabla (\lambda_{ц} \nabla T(x, y, z, \tau)) + Ц \frac{\partial Q}{\partial \tau} \quad (1)$$

Уравнение теплопроводности в металлическом поддоне:

$$\frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} = a_m \nabla^2 T(x, y, z, \tau). \quad (2)$$

Условие непрерывности температуры на границе ЦСП — металлический поддон:

$$T_n(x, y, z, \tau) = T_{n+1}(x, y, z, \tau). \quad (3)$$

Равенство тепловых потоков на границе ЦСП — металлический поддон (граничные условия 4-го рода):

$$\lambda_n \frac{\partial T_n(x, y, z, \tau)}{\partial z} = \lambda_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}(x, y, z, \tau)}{\partial z} \quad (4)$$

Начальные условия:

$$T(x, y, z, 0) = \text{const}. \quad (5)$$

Условия симметрии:

$$\frac{\partial T_1(x, y, 0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T_1(x, 0, z, \tau)}{\partial y} = \frac{\partial T_1(0, y, z, \tau)}{\partial z}. \quad (6)$$

Граничные условия на боковых поверхностях кассеты (граничные условия 3-го рода):

$$-\lambda \frac{\partial T(l_1, y, z, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_c - T(l_1, y, z, \tau)] = 0; \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T(x, b_1, z, \tau)}{\partial y} + \alpha [T_c - T(x, b_1, z, \tau)] = 0; \quad (8)$$

$$-\lambda_m \frac{\partial T(x, y, h_1, \tau)}{\partial z} + \alpha [T_c - T(x, y, h_1, \tau)] = 0. \quad (9)$$

В уравнениях (7) и (8) $\lambda = \lambda_{цп}$ для слоя ЦСП и $\lambda = \lambda_m$ для слоя металла.

В уравнениях (1) — (9) приняты следующие обозначения:

c — удельная теплоемкость, Дж/(кг · К);

ρ — плотность, кг/м³;

T — температура, К;

x, y, z — пространственные координаты, м;

τ — время, с;

λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К)

Π — расход цемента на 1 м³ ЦСП, кг;

Q — удельное тепловыделение, Дж/кг;

a — коэффициент температуропроводности, м²/с;

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К);

l_1, b_1, h_1 — половина длины, ширины и высоты силовой кассеты, м;

n — номер слоя от центра кассеты.

Модель записана в трехмерном виде. Однако проведенные в промышленных условиях измерения температурных полей в плоскостях симметрии кассеты при тепловой обработке плит показали, что в любой момент времени распределение температуры в этих плоскостях аппроксимируется уравнением квадратной параболы. С учетом этого, а также исходя из граничных условий (7) и (8), трехмерные уравнения теплопроводности (1) и (2) были приведены к одномерному виду:

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \tau} = & \frac{1}{c\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{цп}(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + 2\alpha (T_c - T) \times \\ & \times \left(\frac{1}{\alpha l_1^2 + 2l_1 \lambda_{цп}(T)} + \frac{1}{\alpha b_1^2 + 2b_1 \lambda_{цп}(T)} \right) \times \\ & \times \frac{\lambda_{цп}(T)}{c\rho} + \frac{\Pi}{c\rho} \frac{\partial Q}{\partial \tau}; \end{aligned} \quad (10)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_m \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2a_m \alpha (T_c - T) \times \\ \times \left(\frac{1}{a l_1^2 + 2l_1 \lambda_m} + \frac{1}{\alpha b_1^2 + 2b_1 \lambda_m} \right). \quad (11)$$

Индексы «ц» и «м» относятся к свойствам, характеризующим ЦСП и металлический поддон; c — обозначает параметр окружающей среды, \perp и \parallel — свойства ЦСП перпендикулярно и параллельно плоскости прессыования.

Приведенная выше система уравнений может быть решена только при известных теплофизических характеристиках ЦСП и наличии замыкающей зависимости, описывающей кинетику тепловыделения древесно-цементной смеси при различных технологических воздействиях на нее.

Для экспериментального определения коэффициентов теплопереноса в ЦСП нами были использованы методы монотонного нагрева и линейного источника теплоты постоянной мощности. Полученные зависимости указанных коэффициентов от различных технологических факторов [2, 5] имели следующий вид:

$$\lambda_{\perp} = 1,097 \cdot 10^{-4} \rho_0^{1,297} [0,206 + 5,248 \cdot 10^{-3} W + \\ + 1,01 \cdot 10^{-4} (T - 273) + 2,111 \cdot 10^{-5} W (T - 273)]; \quad (12)$$

$$\lambda_{\parallel} = 1,22 \lambda_{\perp}; \quad (13)$$

$$c = 741 + 20,83 W + 6,644 W^{0,128} (T - 273), \quad (14)$$

где W — влажность, %.

Для исследования тепловыделения древесно-цементной смеси в целях установления количественных зависимостей, описывающих этот процесс, был выбран дифференциально-калориметрический метод [4].

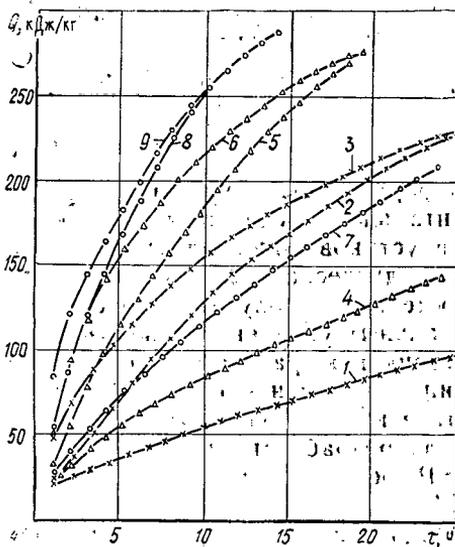
Эксперименты проводили с использованием цемента марок М500 (Воскресенский завод) и М400 (Старооскольский завод) и стружки промышленного изготовления из древесины различных пород (ель, сосна, береза) с содержанием экстрактивных водорастворимых сахаров 0,12...0,69 % от массы древесины. В качестве добавки-минерализатора применяли гель из жидкого стекла и серноокислого алюминия в соотношении 2:1 по сухой массе в количестве 0...12 % по отношению к массе цемента. Соотношение цемента и древесины во всех проведенных экспериментах составляло 2,5:1, а воды и цемента — 1:2. Температуру твердения варьировали в диапазоне от 293 до 353 К.

Как показали результаты экспериментов, повышение температуры древесно-цементной смеси оказывает интенсифицирующее влияние на ее тепловыделение при твердении. Экстрактивные водорастворимые сахара древесины существенно тормозят гидратацию цемента на ранней его стадии, а введение в смесь минерализующих добавок нейтрализует действие сахаров (рис. 2). Для всего диапазона исследованных температур на определенных стадиях процесса наблюдается тенденция к сближению кривых тепловыделения смесей с разным содержанием сахаров в древесине и минерализующих добавок. Это свидетельствует о том, что экстрактивные водорастворимые сахара в совокупности с добавками-минерализаторами оказывают влияние только на кинетические характеристики процесса твердения древесно-цементной смеси.

Для расчета тепловыделения древесно-цементной смеси в зависимости от перечисленных выше технологических факторов получены следующие формулы:

$$Q = Q_0 \frac{f(T)\tau}{\tau'} \quad \text{при} \quad f(T)\tau < \tau'; \quad (15)$$

Рис. 2. Влияние количества минерализующих добавок L и температуры T на тепловыделение древесно-цементной смеси на основе древесины осины: кривые 1, 2, 3 — при $T = 313$ К; кривые 4, 5, 6 — при 333 К; кривые 7, 8, 9 — при 353 К; 1, 4, 7 — при $L = 0,00$; 2, 5, 8 — при $0,06$; 3, 6, 9 — при $0,12$



где $Q = Q_0 + Q_{\max} \{1 - \exp[-k(f(T)\tau - \tau')^n]\}$ при $f(T)\tau \geq \tau'$, (16)
 где $f(T)$ — температурная функция,

$$f(T) = 1,5 \cdot \frac{T - 293}{\epsilon} \quad (17)$$

$\tau' = 3600$ с.

Для определения характерной температурной разности ϵ , получены следующие линейные эмпирические уравнения:

для цемента М500

$$\epsilon = 6,33 + 8,85 \cdot 10^{-2} (T - 293) \quad (18)$$

для цемента М400

$$\epsilon = 5,903 + 0,1096 (T - 293) \quad (19)$$

Значения коэффициентов $\lg k$ и n в зависимости от количества минерализующих добавок в смеси L по отношению к массе цемента для всех исследованных пород древесины с определенным содержанием сахаров были аппроксимированы квадратными параболami:

$$\lg k = a'L^2 + b'L + c'; \quad (20)$$

$$n = a''L^2 + b''L + c'' \quad (21)$$

Соответствующие значения коэффициентов аппроксимации a' , b' , c' , a'' , b'' и c'' приведены в таблице.

Порода древесины	Содержание водорастворимых сахаров, %	a'	b'	c'	a''	b''	c''
Береза	0,69	635,5	-74,4	4,10	-137,7	17,61	0,569
Осина	0,39	403,5	-31,4	-5,55	-90,4	8,44	0,918
Ель	0,12	299,9	-21,0	-5,55	-67,7	5,22	0,961

Величину максимально возможного тепловыделения цементного раствора 28-суточного естественного твердения Q_{\max} рассчитывали согласно закону аддитивности по минералогическому составу цемента [3].

Степень гидратации цемента в ЦСП определяли по формуле

$$\theta = Q/Q_{\max}. \quad (22)$$

Сформулированную в одномерном варианте задачу с учетом экспериментально определенных теплофизических характеристик ЦСП, а также установленной замыкающей зависимости по кинетике тепловыделения древесно-цементной смеси, решали численно методом конечных разностей. Для получения конечно-разностных аппроксимаций дифференциальных уравнений использовали неявную шеститочечную абсолютно устойчивую разностную схему Кранка — Николсона [6, 8]. Систему линейных уравнений с трехдиагональной матрицей, полученную в результате конечно-разностных преобразований, решали методом прогонки. Для разработанной модели составляли алгоритм и программу ТОСРР, реализованную на языке Паскаль для персональной ЭВМ ДВК-3.

По разработанной программе проведены численные эксперименты для определения влияния на процесс тепловой обработки ЦСП различных технологических факторов. В результате нами установлено, что наибольшее влияние на степень гидратации цемента центральной точки центральной плиты кассеты (наиболее слабого звена в ней) оказывают два параметра цементно-стружечной смеси: содержание экстрактивных водорастворимых сахаров в древесном наполнителе (при увеличении его происходит резкое торможение гидратации) и количество минерализующих добавок в смеси (их рост существенно интенсифицирует этот процесс).

При тепловой обработке ЦСП происходит гидратация, твердение и структурообразование в цементном вяжущем, что в конечном счете оказывает решающее влияние на формирование прочностных характеристик данного материала. В целях определения характера зависимости между распалубочной прочностью ЦСП при изгибе $\sigma_{и.отн}$ (прочностью при изгибе плиты после распалубки, отнесенной к изгибной прочности плиты 28-суточного естественного твердения) и степенью гидратации цемента в плите θ проведен ряд лабораторных и промышленных исследований. В результате чего установлена следующая зависимость:

$$\sigma_{и.отн} = 0,55 [1 - \exp(- (4,588\theta)^2)]. \quad (23)$$

Указанная зависимость имеет двухстадийный характер, причем переход от ускоренного роста прочности ЦСП к замедленному происходит при $\theta = 0,154$. Соответствующее значение относительной распалубочной прочности плиты составляет 0,216. Достижение этой величины прочности центральной точкой кассеты может служить достаточно надежным критерием окончания процесса тепловой обработки ЦСП.

Достигнув в процессе тепловой обработки необходимого уровня распалубочной прочности, материал должен как можно меньше потерять в конечной прочности. Поэтому, помимо определения распалубочной прочности, были проведены дополнительные эксперименты по кинетике набора прочности плит после их тепловой обработки в камере твердения при температуре 323...353 К с последующей естественной выдержкой. Как показали проведенные исследования, с ростом температуры воздуха в камере твердения средняя распалубочная прочность плит возрастает. Причем чем ближе плита расположена к поверхности кассеты, т. е. чем лучше она прогревается, тем выше ее распалубочная

прочность (рис. 3). Однако повышение температуры тепловой обработки ЦСП в указанном диапазоне отрицательно сказывается на конечной прочности материала. Поэтому процесс тепловой обработки ЦСП целесообразно проводить при более низких температурах, близких к 323 К, которые вместе с тем обеспечивают достижение необходимой распалубочной прочности.



Рис. 3. Кинетика набора прочности цементно-стружечных плит после тепловой обработки при температуре 333 К (кривые 1, 2, 3) и 353 К (кривые 4, 5, 6) в процессе последующей естественной выдержки: 1, 4 — верхняя плита кассеты; 2, 5 — плита кассеты, расположенная между верхней и центральной плитами; 3, 6 — центральная плита кассеты

Вместе с тем даже при такой низкой температуре среды в материале все же наблюдается небольшой спад прочности (~5%) относительно плит естественного твердения, не прошедших термообработку. Указанный факт, очевидно, объясняется тем, что твердение при повышенных температурах материала, содержащего цемент, ведёт к образованию более крупных закристаллизованных новообразований. Это уменьшает число контактов срастания в сростке и его прочность в целом [1]. При этом увеличение степени гидратации цемента под воздействием температуры на ранней стадии твердения не может компенсировать отрицательное влияние укрупнения структуры новообразований на конечную прочность материала.

Итак, при проведении тепловой обработки ЦСП потери конечной прочности материала неизбежны, но так как они минимальны при более низких (~50 °С) температурах среды, то ее надо поддерживать на этом уровне. В камере твердения при термообработке ЦСП температура необходима не столько для прогрева спрессованных пакетов древесно-цементной смеси, сколько для предотвращения их охлаждения ниже температуры саморазогрева смеси за счет экзотермической реакции гидратации цемента.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1]. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. Минеральные вяжущие вещества: технология и свойства. / Под ред. А. В. Волженского. — М.: Стройиздат, 1979. — 476 с. [2]. Воскресенский А. К., Кац Б. Л. Исследование тепловых процессов в производстве цементно-стружечных плит // Основные направления ускорения науч.-техн. прогресса в деревообраб. пром-сти: Тез. докл. XVI науч.-техн. конф. УкрНПДО. — Киев: УкрНПДО, 1986. — С. 122—123. [3]. Запорожец И. Д., Окороков С. Д., Парийский А. А. Тепловыделение бетона. — М.; Л.: Стройиздат, 1966. — 316 с. [4]. Исследование кинетики тепловыделения в процессе твердения древесно-цементной смеси / И. Б. Заседателев, С. А. Шифрин, А. К. Воскресенский, Б. Л. Кац // Науч. тр. / МЛТИ. — 1987. — Вып. 193. — С. 98—109. [5]. Кац Б. Л. Экспериментальное исследование коэффициента теплопроводности цементно-стружечных плит // Науч. тр. / МЛТИ. — 1988. — Вып. 203. — С. 30—35. [6]. О бли-