

УДК 677.08.02.16./022

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ МЯГКИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН

*А.М. Карпеня, Н.Н. Ясинская, Ю.П. Вербицкая, В.И. Ольшанский*

*(Витебский государственный технологический университет, Беларусь)*

В современных экономических условиях проблема энергосбережения в промышленности и строительном секторе экономики Республики Беларусь приобретает все большую актуальность. Решение проблемы повышения энергоэффективности ограждающих конструкций жилых, общественных и производственных зданий достигается применением эффективных теплоизоляционных материалов в конструкциях наружных стен, перекрытиях и перегородках.

Отечественными и зарубежными производителями выпускается огромное количество различных композиционных материалов строительного назначения. Большой интерес представляет использование коротковолокнистых отходов переработки природных и химических волокон в качестве основного сырьевого компонента для производства композиционных строительных материалов. Это позволит значительно расширить область применения волокнистых отходов, кроме того, даст возможность получать данные композиционные материалы и изделия из них с низкой себестоимостью.

В отраслевой научно-исследовательской лаборатории кафедры прядения натуральных и химических волокон Витебского технологического университета разработан новый способ получения изоляционных синтетических волокнистых плит мягких (СВП-М) с использованием химических коротковолокнистых отходов.

Основным технологическим этапом при производстве СВП-М является тепломеханическое воздействие в течение некоторого времени. Термическую обработку проводят с целью образования межмолекулярных связей между связующим материалом и осно-

вой (химическим волокном), а также межмолекулярных связей между самими волокнами.

В качестве связующих добавок применяются малотоксичные смолы с содержанием свободного формальдегида — не более 0.1%; расход смолы — не более 1.3% от абсолютно сухой массы волокна. Для производства СВП-М принята смола фенолформальдегидная жидкая марки СФЖ-3014. Вследствие этого происходит формирование плитного материала необходимой формы и с заданными физико-механическими характеристиками.

Структура и свойства синтетических волокнистых плит зависят от условий проведения процесса термообработки — продолжительности и температуры. Поэтому для выработки практических рекомендаций по определению рациональных режимов и возможности интенсификации процесса термообработки было важно исследовать его общие закономерности и установить зависимость между условиями проведения процесса и свойствами волокнистых плит (количественный и качественный состав, теплофизические и физико-механические свойства).

Нестационарную теплопроводность исследовали на примере однородных синтетических волокнистых плит, различающихся по составу. Задача о распространении тепла в твердом теле рассматривалась многими исследователями как теоретически, так и экспериментально при изучении процессов, протекающих при термообработке различных материалов. При теоретических исследованиях принимается ряд допущений в зависимости от условий теплообмена (стационарный или нестационарный процесс), способа передачи тепла, формы и размеров тела.

Однако термообработка синтетических волокнистых плит имеет ряд особенностей. В ходе термообработки необходимо достичь

Витебский ГТУ: 210035, Беларусь, г. Витебск, Московский пр-т, д. 72.

завершения процессов структурообразования полимерной композиции, которые зависят от температуры, продолжительности обработки и сырьевого состава плит. Для решения поставленной задачи применен аппарат классической теории теплопроводности А.В. Лыкова\*.

Синтетическая волокнистая плита, проходя через пресс горячего прессования, нагревается, а выйдя из него — охлаждается, при этом температурное поле плиты изменяется во времени. Анализ процессов выполнен авторами на основе общих законов теплопередачи исходя из условия, что теплообмен между поверхностями пластины и окружающей средой происходит по закону Ньютона.

В непрерывном технологическом процессе волокнистая плита проходит через пресс горячего прессования в течение заданного времени.

Возникает необходимость определить зависимость между температурой и продолжительностью термообработки, необходимой для прогревания плиты до определенной температуры и завершения процессов структурообразования полимерной композиции.

Сформулируем постановку задачи по нагреву пластины в общем виде.

Дана плита неограниченной длины толщиной  $2R$  при некотором заданном распределении температуры  $T(x, 0) = f(x)$ . В начальный момент времени плита мгновенно нагревается до температуры  $T_c$  ( $T_c$  — температура среды), которая поддерживается постоянной на протяжении всего процесса нагревания. Необходимо найти распределение температуры по толщине пластины.

Дифференциальное уравнение теплопроводности запишется в виде

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} \quad (\tau > 0; -R < x < +R), \quad (1)$$

где  $a = \lambda/c\gamma$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $\partial T/\partial \tau$  — температурное поле;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{град})$ ;  $c$  — удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град})$ ;  $\gamma$  — плотность,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Краевые условия запишутся в виде

$$T(x, 0) = f(x), \quad (2)$$

$$T(+R, \tau) = T_c = \text{const}, \quad (3)$$

$$T(-R, \tau) = T_c = \text{const}. \quad (4)$$

Поставленную задачу решим операционным методом. После ряда преобразований окончательно получим:

$$T_0 - T(x, \tau) = (T_0 - T_c) - (T_0 - T_c) \times \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{\mu_n} (-1)^{n+1} \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp\left(-\mu_n^2 \frac{a\tau}{R^2}\right). \quad (5)$$

Учитывая, что  $a\tau/R^2 = Fo$  (критерий Фурье), получим:

$$\theta = \frac{T(x, \tau) - T_0}{T_c - T_0} = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos \mu_n \frac{x}{R} \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (6)$$

где  $A_n = 2/\mu_n (-1)^{n+1}$  — начальная тепловая амплитуда;  $\mu_n$  — характеристические числа, равные  $(2n-1)\pi/2$ .

Анализируя уравнение (6), для практических расчетов можно ограничиться одним первым числом ряда (сходящийся ряд).

Получим удобную для практических расчетов формулу:

$$T(0, \tau) = T_0 + (T_c - T_0) \cdot 1.27 e^{-1.57a\tau/R^2}, \quad (7)$$

где  $T(0, \tau)$  — температура в центре синтетической волокнистой плиты в момент времени  $\tau$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_c$  — температура пресса,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $T_0$  — исходная температура плиты,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $R$  —  $1/2$  толщины плиты,  $\text{м}$ ;  $\tau$  — продолжительность термообработки,  $\text{с}$ .

Уравнение (7) позволяет для мягких синтетических волокнистых плит любого сырьевого состава и толщины определять как продолжительность прессования для завершения процессов структурообразования при заданной температуре пресса, так и температуру прессования, необходимую для полного прогревания плиты и завершения процессов структурообразования.

Достоверность разработанной математической модели, описывающей процесс прогревания синтетических волокнистых плит и позволяющей использовать ее для расчета температуры и продолжительности термообработки для завершения структурообразования, подтверждена экспериментально. Результаты экспериментальной проверки представлены ниже.

\*Лыков А.В. Теория сушки. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1968. — 472 с.

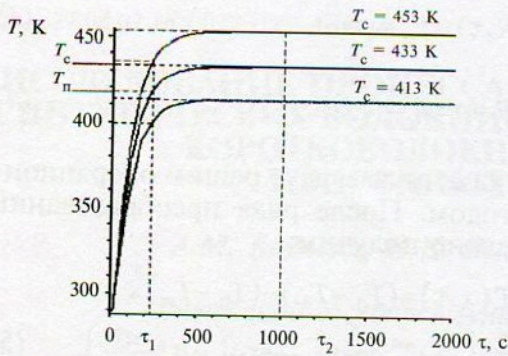


Рис. 1. Графическая зависимость температуры прогревания центральной части плиты от продолжительности прессования.

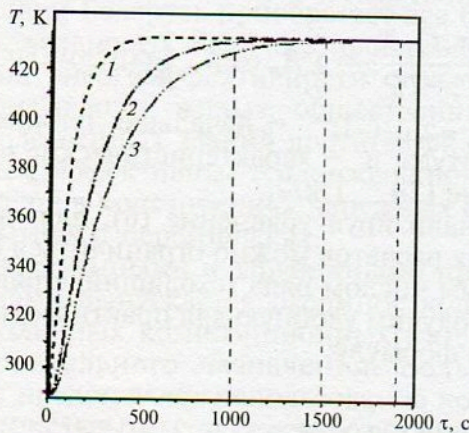


Рис. 2. Теоретическая зависимость температуры прогревания от продолжительности прессования плиты толщиной 18 (1), 24 (2) и 32 (3) мм.

В качестве примера рассмотрим процесс прогревания синтетической волокнистой плиты плотностью 280 кг/м<sup>3</sup> и различным химическим составом. Термические коэффициенты компонентов СВП-М представлены в таблице.

Решим задачу для трех вариантов синтетических волокнистых плит: *вариант 1*: полиакрилонитрил (нитрон) – 100%; *вариант 2*: полиэтилентерефталат (полиэфир) – 100%; *вариант 3*: ковровый кноп (смесь волокон шерсти, нитрона и капрона) – 100%.

Для расчета температуры плиты в интервале времени от 60 до 1500 с была составлена программа на языке Maple 13, а также получена графическая интерпретация рас-

Термические коэффициенты компонентов СВП-М

Компоненты	$\lambda$ , Вт/(м·К)	$c$ , Дж/(кг·К)
Полиакрилонитрил (нитрон)	0.035	$1.8 \cdot 10^3$
Полиэтилентерефталат (полиэфир)	0.039	$1.11 \cdot 10^3$
Ковровый кноп (смесь шерсти, нитрона и капрона)	0.037	$1.15 \cdot 10^3$

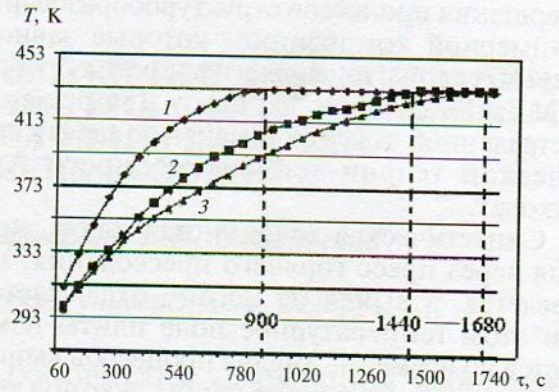


Рис. 3 Экспериментальная зависимость температуры прогревания от продолжительности прессования плиты толщиной 18 (1), 24 (2) и 32 (3) мм.

пределения температуры по толщине плиты в течение 2000 с (рис.1).

На графической зависимости можно выделить два характерных участка. В интервале времени от 0 до  $\tau_1$  происходит прогревание внешней оболочки синтетической волокнистой плиты тепловым потоком, температура верхнего слоя плиты достигает значения температуры пресса  $T_n$ . На участке  $T_n - T_c$  прогревается вся толщина волокнистой плиты. К моменту времени  $\tau$ , температура пресса центральной части СВП-М выравнивается:  $T_n = T_c$ .

Анализ теоретических зависимостей распределения температуры по толщине СВП-М позволяет сделать следующие выводы:

- с повышением температуры нагревательного элемента прессовального оборудования процесс прогревания СВП-М протекает интенсивнее;

- продолжительность прогревания синтетических волокнистых плит зависит от сырьевого состава (различной теплоемкости волокон и толщины материала).

Экспериментальные исследования проводились в условиях центральной заводской лаборатории ОАО «Витебскдрев» на горячем прессе типа 2ПГ-500. Условия проведения эксперимента были следующими: температура пресса устанавливалась по датчику от 140 до 180 °С (данная температура выбрана

исходя из анализа литературных источников, по технологическим регламентам производства волокнистых плит и с учетом свойств применяемых волокнистых материалов); режим работы пресса — установившийся.

Образец размером 500×500 мм помещался в пресс, внутри которого находилась термopара. Показания термopары фиксировались каждые 60 с.

Для проведения сравнительного анализа экспериментальных и теоретических зависимостей выбрана синтетическая волокнистая плита толщиной 24 мм, сырьевой состав — нитрон 100%. Теоретическая и экспериментальная зависимости температуры прогревания СВП-М от продолжительности процесса прессования  $T(R, \tau) = f(\tau)$  приведены на рис.2 и 3.

Расчетные значения температуры прессования СВП-М на основе волокна нитрон

показывают, что центральная часть плиты толщиной 18 мм прогреется до заданной температуры в течение 15-17 мин. Оптимальная продолжительность процесса прессования для полного прогревания материала, полученная экспериментально, равна 15 мин. Для СВП-М толщиной 24 мм расчетное значение температуры прессования равно 25 мин, экспериментальное — 24 мин. Для СВП-М толщиной 32 мм расчетное значение температуры прессования равно 28-30 мин, экспериментальное — 28 мин.

Таким образом, результаты экспериментальных исследований подтверждают возможность практического применения уравнения (7) для описания процесса прессования мягких синтетических волокнистых плит различного сырьевого состава и толщины

#### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕРМООБРАБОТКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СИНТЕТИЧЕСКИХ ВОЛОКНИСТЫХ ПЛИТ МЯГКИХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОРОТКОВОЛОКНИСТЫХ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНЫХ И ХИМИЧЕСКИХ ВОЛОКОН**

*А.М. Карпеня, Н.Н. Ясинская, Ю.П. Вербицкая, В.И. Ольшанский*

*(Витебский государственный технологический университет, Беларусь)*

В отраслевой научно-исследовательской лаборатории кафедры прядения натуральных и химических волокон Витебского технологического университета разработан новый способ получения изоляционных синтетических волокнистых плит мягких (СВП-М) с использованием коротковолокнистых отходов переработки природных и химических волокон. Основным технологическим этапом при производстве СВП-М является тепломеханическое воздействие в течение некоторого времени. В результате экспериментальных исследований подтверждается возможность практического применения полученного уравнения для описания процесса прессования синтетических волокнистых плит мягких различного сырьевого состава и толщины.