

DOI:

УДК 620.22

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РИФЛЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

доктор технических наук, доцент **В. В. Абразумов**¹

доктор технических наук, профессор **В. Д. Котенко**¹

Э. Н. Ганиева¹

1 – Мытищинский филиал «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана» г. Мытищи, Российская Федерация

Из древесно-полимерных композитов в настоящее время изготавливается, в основном, террасная доска, обладающая более низким коэффициентом трения по сравнению с деревянной доской. Чтобы минимизировать скольжение и, тем самым, повысить безопасность поверхности террасных досок необходимо подвергать рифлению, которое может быть осуществлено накаткой фигурным роликом поверхности доски, нагретой до вязко-текучего состояния поверхности доски. Предложена математическая модель процесса рифления изделий из древесно-полимерных композитов, основанная на решении уравнения теплопроводности с использованием эффективных характеристик теплопроводности и удельной теплоёмкости композитов с различными типами полимерных матриц. При построении математической модели использовалась характерная особенность террасных досок, заключающаяся в том, что их линейные размеры значительно больше толщины. Эта особенность позволила предполагать, что при нагреве доски в тепловой камере с инфракрасным излучателем изменение температуры будет происходить только в направлении, перпендикулярном поверхности доски. Предприятиями производятся террасные доски из древесно-полимерных композитов с массовой долей древесных частиц 0,4...0,8. Для проведения теплотехнических расчётов в статье приводятся расчётные значения эффективных коэффициентов теплопроводности и удельной теплоёмкости для древесно-полимерных композитов с различными полимерными матрицами в указанном диапазоне содержания древесных частиц. По модели могут быть рассчитаны основные технологические параметры процесса: продолжительность нагрева поверхности рифления до заданной температуры, мощность источника нагрева, скорость перемещения заготовки при рифлении, габариты камеры нагрева. В качестве примера приводятся результаты расчёта технологических параметров при рифлении древесно-полимерного композита с полимерной матрицей из полиэтилена низкой плотности (ПЭНП).

Ключевые слова: древесно-полимерный композит, рифление, эффективные характеристики теплопроводности и удельной теплоёмкости, плотность, массовая (объёмная) доля древесных частиц, полиэтилен низкой плотности (ПЭНП)

MODELING THE PROCESS OF SURFACE RIBBING OF THE ARTICLES MADE FROM WOOD-POLYMER COMPOSITES

DSc in Engineering, Associate Professor **V. V. Abrazumov**¹

DSc in Engineering, Professor **V. D. Kotenko**¹

E. N. Ganieva¹

1 – Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Mytishchi, Russian Federation

Abstract

Nowadays mainly a decking board that has a lower frictional coefficient comparing with wooden board is made from wood-polymer composites. In order to minimize sliding motion and this way to increase the safety, wood-polymer composite board's surface should be subjected to corrugation, that can be done by knurling the surface of the board, heated till state of viscous flow, with a profiled roller. Here a mathematical model of the process of surface ribbing of pieces made of wood-polymer composites based on solution of an equation of thermal conductivity using effective characteristics of thermal conductivity and thermal capacity of composites with different types of polymer matrixes is offered. A characteristic feature of wood-polymer

composite boards, that their linear dimension is bigger than their thickness, was used in creating a mathematical model. This feature provides an opportunity to suppose that while heating the wood-polymer composite board in the thermal environment chamber with infrared heating element, the change of the temperature will proceed only in the direction which is perpendicular to the surface of the board. Enterprises produce wood-polymer composite boards with weight content of wooden particles of 0.4...0.8. In order to make thermal and technological, this article gives calculation values of effective coefficients of heat conductivity and specific thermal capacity for wood-polymer composites with different polymer matrixes in indicated range of the content of wooden particles. Critical process parameters of the process can be determined according to the model: period of heating the surface of ribbing up to the predetermined temperature, heating source intensity, and displacement speed of the workspace while ribbing, size of the heating chamber. As an example here we give the results of technological parameter calculations of ribbing wood-polymer composites with polymer matrix made of low-density polyethylene (LDPE).

Keywords: wood-polymer composites, surface ribbing, effective characteristics of thermal conductivity and thermal capacity, density, weight percentage of wood particles, low-density polyethylene (LDPE).

Область применения сравнительно недавно созданных древесно-полимерных композитов (ДПК) на термопластичном связующем постоянно расширяется, а их производство ежегодно увеличивается. Эти материалы являются экологически чистыми и перерабатываются в изделия различной формы экструзией [1] с высокой производительностью. Форсайт-исследования показывают, что в строительстве объектов разного назначения большое будущее за экологически безопасными композиционными материалами на основе древесины и изделиями из них [15].

Анализ рынка изделий из (ДПК) показал [3], что в настоящее время в России из этих материалов изготавливается в основном (до 80 %) декинг (террасная доска). По сравнению с древесиной ДПК обладают лучшими показателями в отношении водопоглощения, микробной деструкции и долговечности [6]. В целях безопасности террасные доски должны обладать коэффициентом трения не менее 0,5. Для сухой деревянной доски коэффициент трения составляет 0,55, а террасных досок из различных ДПК – 0,28-0,48. Чтобы минимизировать скольжение и тем самым повысить безопасность поверхности террасных досок необходимо подвергать рифлению. Кроме того, при использовании элементов из ДПК в интерьере салона автомобиля или ограждающих конструкциях (например, террасы) рифлением можно наносить художественный рисунок, что делает их более привлекательными [2].

Для нанесения рельефа на поверхность заготовки разработана и изготовлена экспериментальная установка, в которой реализован принцип накатки нагретой до вязко-текучего состояния поверхности заготовки фигурным роликом. Нагрев поверхности заготовки на

требуемую глубину производится в тепловой камере с инфракрасным излучателем.

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки. Заготовка 3 по рольгангу 1 подается с заданной скоростью V в камеру нагрева 5 с помощью подающего вала 4, вращающегося с частотой n , где производится нагрев заготовки с помощью инфракрасных излучателей 6. На выходе из камеры на поверхность нагретой заготовки наносится рельефный рисунок роликом 7. Ролик прижимается к материалу с усилием P , которое обеспечивает нанесение рельефного рисунка на заданную глубину.

Для реализации технологического процесса нанесения рельефного рисунка на заготовки из ДПК необходимо рассчитать: время нагрева поверхности рифления до заданной температуры, мощность нагревателя, скорость перемещения заготовки, а также габариты камеры нагрева (длину камеры, т.к. ширина камеры определяется габаритами заготовки).

Расположение координат и схема нагрева заготовки в камере инфракрасными излучателями показаны на рис. 2. Процесс нагрева заготовки может быть описан дифференциальным уравнением теплопроводности [9, 12]

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура, К;

α – коэффициент температуропроводности, м²/с, определяемый из соотношения

$$\alpha = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}, \quad (2)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

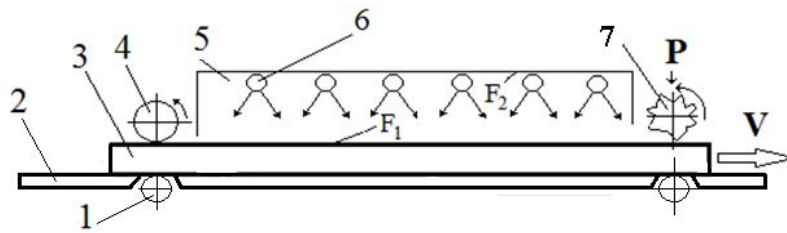


Рис. 1. Схема камеры нагрева: 1 – рольганг; 2 – стол; 3 – нагреваемая заготовка; 4 – подающий вал; 5 – камера нагрева; 6 – инфракрасные излучатели; 7 – вал с рельефным рисунком; F1, F2 – плоскопараллельные поверхности лучистого теплообмена; V – скорость перемещения материала в камере нагрева

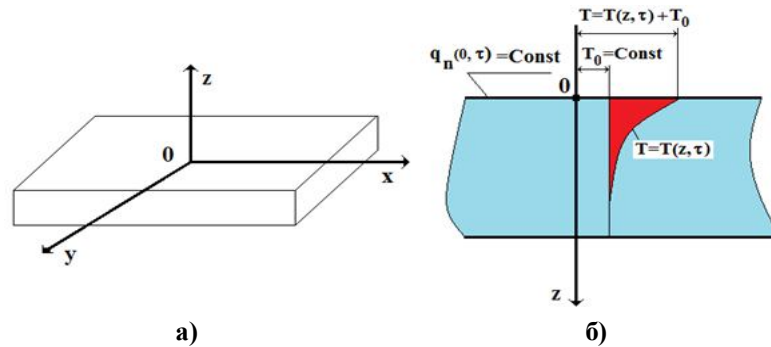


Рис. 2. Расположение координат (а) и расчётная схема (б)

c – удельная теплоёмкость, Дж/кг·К,
 ρ – плотность, кг/м³.

Характерной особенностью террасных досок является то, что их линейные размеры значительно больше толщины, поэтому при нагреве изменение температуры будет происходить только в направлении, перпендикулярном поверхности доски (рис. 2, б), т.е. температурное поле будет одномерным и изменяться только по координате z , в этом случае $\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$ и уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2}. \quad (3)$$

Чтобы найти распределение температуры по направлению z в любой момент времени, надо знать распределение температуры внутри тела в начальный момент времени (начальное условие) и закон взаимодействия между окружающей средой и поверхностью тела (граничное условие).

Для решения задачи принимаем следующие допущения:

1) температура по поперечному сечению доски в начальный момент времени распределена равномерно, т.е.

$$T_{(z, \tau=0)} = T_0 = const; \quad (4)$$

2) продолжительность нагрева поверхности рифления до требуемой температуры такова, что температура противоположной поверхности заготовки за это время не изменяется, т.е.

$$T_{(\infty, \tau)} = T_0; \quad (5)$$

3) теплопроводность и удельная теплоёмкость не зависят от температуры.

Допущение 2 позволяет свести поставленную задачу к решению уравнения теплопроводности для полуограниченного тела с граничными условиями второго рода при постоянной плотности теплового потока на поверхности нагрева.

При лучистом теплообмене в системе тел с плоскопараллельными поверхностями (полагаем $F_1 = F_2$) количество энергии (Q , Вт), переданное заготовке определится из уравнения

$$Q = c_0 \cdot \xi_{1-2} \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 + \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \cdot F_1, \quad (6)$$

где $c_0 = 5,67$ – коэффициент излучения абсолютно чёрного тела, Вт/м² · К⁴;

ξ_{1-2} – приведенная степень черноты, равная

$$\xi_{1-2} = \frac{1}{\frac{1}{\xi_1} + \frac{1}{\xi_2} + 1},$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – излучательная способность или степень черноты тел 1 и 2 соответственно.

Плотность теплового потока на поверхности материала составит ($g_n, \text{Вт/м}^2$)

$$g_n = \frac{Q}{F_1} \quad (7)$$

Таким образом, требуется решить уравнение (3) с начальными (4) и граничными условиями (7), что позволит найти распределение температуры по данному направлению в любой момент времени, т.е. решить задачу

$$\frac{\partial T(z, \tau)}{\partial \tau} = \alpha \cdot \frac{\partial^2 T(z, \tau)}{\partial z^2}, \quad (\tau > 0; 0 < z < \infty)$$

$$T_{(z, \tau=0)} = T_0 = const$$

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial z} + g_n = 0 \quad (8)$$

$$T_{(\infty, \tau)} = T_0, \quad \frac{\partial T(\infty, \tau)}{\partial z} = 0$$

Задача (8) имеет следующее решение

$$T_{(z, \tau)} = T_0 + \frac{2 \cdot g_n}{\lambda} \cdot \sqrt{\alpha \cdot \tau} \cdot \text{ierfc} \frac{z}{2\sqrt{\alpha \tau}}, \quad (9)$$

где ierfc – дополнительная функция ошибок, равная

$$\text{ierfc}(u) = 1 - \text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_u^\infty e^{-u^2} du, \quad (10)$$

где $\text{erf}(x)$ – Гауссов интеграл ошибок (функция Крампа).

Значения интеграла ошибок Гаусса (9) табулированы и приводятся в справочной литературе [4,13,18]. Функция $\text{erf}(u)$ изменяется от 0 (при $u = 0$) до 1 (при $u \rightarrow \infty$) (практически равна 1, так как при $u > 2,7$. $\text{erf}(2,7) = 0,9999$).

При численных расчётах по уравнению (9) удобнее пользоваться не табличными значениями интеграла ошибок, а их расчётными значениями. Предложено несколько формул для расчёта функции ошибок Гаусса, обеспечивающих определение интеграла ошибок с различной погрешностью. Ниже из источника [1] приводится приближённая формула для расчёта функции ошибок Гаусса, обеспечивающая минимальную погрешность $p \leq 0,52\%$ в интервале $0 \leq t \leq 3,75$

$$\text{erf}(t) = \sqrt{1 - \exp(-1,26 \cdot t^2)} \quad (11)$$

Расход теплоты на единицу площади тепловоспринимающей поверхности составит, Дж/м^2

$$q = g_n \cdot \tau \quad (12)$$

При расчётах по уравнению (9) необходимо знание технических характеристик ДПК: плотности ρ , удельной теплоёмкости c и коэффициента теплопроводности λ . Некоторые из этих характеристик приводятся в сопроводительной документации при поставке материала. Не указанные в документации характеристики могут быть определены экспериментально. Каждая поставляемая партия материала имеет свои характеристики, которые могут отличаться. В связи с этим удобнее пользоваться так называемыми эффективными характеристиками, которые могут быть определены расчётным путем.

ДПК состоят из наполнителя (древесная мука и другие минеральные наполнители) и связующего (различные полимеры). Чтобы рассчитать указанные выше характеристики композиционного материала необходимо знать аналогичные характеристики его компонентов и их объёмные (массовые) доли, которые можно найти в справочной литературе.

Удельная теплоёмкость и плотность материала являются величинами аддитивными, поэтому их значения могут быть определены по правилу смесей:

$$c = m_1 \cdot c_1 + c_2 \cdot m_2, \quad (13)$$

где m_1, m_2 – массовая доля соответственно наполнителя и связующего ($m_1 + m_2 = 1$);

c_1, c_2 – удельная теплоёмкость соответственно наполнителя и связующего, $\text{Дж/кг}\cdot\text{К}$;

– плотность материала

$$\rho = v_1 \cdot \rho_1 + v_2 \cdot \rho_2 = v_1 \cdot \rho_1 + (1 - v_1) \cdot \rho_2, \quad (14)$$

где v_1, v_2 – объёмная доля соответственно наполнителя и связующего, 1;

ρ_1, ρ_2 – плотность соответственно наполнителя [14] и связующего, кг/м^3 .

Пересчёт массовой доли в объёмную можно произвести по формуле

$$v_1 = \frac{m_1 \cdot \rho_2}{m_1 \cdot \rho_2 + m_2 \cdot \rho_1} \quad (15)$$

Теплопроводность является величиной не аддитивной и не может определяться по правилу смесей. В рассматриваемом материале наполнитель состоит из мелких (дисперсных) частиц. Как известно, композиционные материалы с дисперсными наполнителями являются изотропными, т.е. их

свойства по различным направлениям одинаковы. Для композиционных материалов с изотропными свойствами коэффициент теплопроводности определяется из уравнения [8]

$$\lambda_1 = \lambda_2 \cdot \left[1 + \frac{\nu_1}{\frac{1-\nu_1}{3} + \frac{\lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2}} \right], \quad (16)$$

где λ_1, λ_2 – коэффициенты теплопроводности соответственно наполнителя и связующего, Вт/м·К.

Уравнение 9 совместно с уравнениями 12, 13, 14, 16 позволяет рассчитать время нагрева поверхности рифления до заданной температуры. Очевидно, что длительность пребывания в камере нагрева каждой точки на поверхности материала должно быть равно этому времени. Это условие позволяет рассчитать скорость перемещения заготовки и частоту вращения вала подачи, длину камеры обогрева, а также количество энергии, передаваемой заготовке в процессе нагрева.

В настоящее время при производстве ДПК применяются, в основном, следующие термопласты: полиэтилен низкой плотности (ПЭНП), полиэтилен высокой плотности (ПЭВП), полипропилен (ПП) и поливинилхлорид (ПВХ). Характеристики этих термопластов и древесных частиц представлены в табл. 1 [5, 7, 10, 16].

Уравнения (13-16) позволяют рассчитать коэффициент теплопроводности и удельную теплоёмкость ДПК при любой массовой доле компонентов в композите. Промышленностью производятся ДПК с массовой долей древесных частиц 0,4-0,8. В связи с этим при проведении теплотехнических расчётов необходимо знать эти характеристики ДПК в указанном диапазоне содержания древесных частиц.

В табл. 2 приведены результаты расчётов значений этих характеристик для ДПК с различными полимерными матрицами.

Таблица 1

Характеристики компонентов ДПК

Показатели	Термопласт				Древесные частицы
	ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПВХ	
Теплопроводность λ , Вт/м·К	0,33-0,36	0,42-0,52	0,16-0,22	0,16-0,19	0,15-0,25
Удельная теплоёмкость c , Дж/кг·К	2090-2850	2300-2700	1675-2095	1050-2140	1760
Плотность ρ , кг/м ³	913-930	910-968	900-920	1350-1430	1300-1600

Таблица 2

Расчетные значения коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости и плотности ДПК с различными полимерными матрицами с массовой долей древесных частиц от 0,4 до 0,8.

Матричный полимер в ДПК		ПЭНП	ПЭВП	ПП	ПВХ	
Массовая доля древесных частиц в ДПК, %	0,4	λ , Вт/м·К	0,264-0,327	0,319-0,431	0,157-0,228	0,156-0,211
		c , Дж/кг·К	1958-2414	2084-2324	1709-1961	1334-1988
		ρ , кг/м ³	1036-1117	1034-1150	1026-1108	1330-1493
	0,5	λ , Вт/м·К	0,247-0,317	0,293-0,406	0,156-0,231	0,155-0,217
		c , Дж/кг·К	1925-2305	2030-2230	1718-1928	1405-1950
		ρ , кг/м ³	1073-1176	1071-1206	1064-1168	1325-1510
	0,6	λ , Вт/м·К	0,229-0,306	0,266-0,379	0,155-0,234	0,154-0,291
		c , Дж/кг·К	1892-2196	1976-2136	1726-1894	1476-1912
		ρ , кг/м ³	1112-1242	1110-1269	1104-1235	1320-1527
	0,7	λ , Вт/м·К	0,210-0,294	0,238-0,350	0,154-0,237	0,153-0,229
		c , Дж/кг·К	1859-2087	1922-2042	1734-1861	1547-1874
		ρ , кг/м ³	1153-1316	1152-1338	1147-1310	1315-1545
0,8	λ , Вт/м·К	0,191-0,281	0,209-0,319	0,153-0,241	0,152-0,236	
	c , Дж/кг·К	1826-1978	1868-1948	1743-1827	1618-1836	
	ρ , кг/м ³	1198-1398	1197-1415	1194-1394	1310-1563	

Используя данные табл. 2, можно рассчитать основные параметры установки для рифления ДПК с любым матричным полимером: количество передаваемой энергии заготовке в процессе нагрева (мощность источника нагрева без учёта его КПД), время нагрева, скорость перемещения заготовки. Причём, основные параметры могут быть рассчитаны как для установки рифления ДПК с заданной полимерной матрицей и массовой долей древесных частиц, так и для установки рифления одного или всех типов ДПК. В производстве ДПК используются термопласты с температурой плавления не выше 180 °С, так как при более высокой температуре происходит термодеструкция древесных частиц, что недопустимо.

ПЭНП и ПЭВП, по сравнению с ПП и ПВХ, обладают лучшими механическими и экологическими свойствами, поэтому они являются самыми распространёнными полимерами, используемыми в производстве ДПК. Температура плавления этих полимеров находится в интервале 106...130 °С, температура размягчения 103 °С. Рассчитаем параметры установки для рифления заготовок из ДПК с полимерной матрицей ПЭНП и массовой долей древесных частиц $m_l = 0,4$ и

$m_l = 0,8$ (размеры заготовки: $b \times l \times z = 0,1 \times 1,1 \times 0,015$ м).

При расчёте длину камеры принимали равной длине заготовки, следовательно, скорость перемещения заготовки в камере нагрева составляла V , м/мин

$$V = \frac{60 \cdot l}{\tau}, \quad (17)$$

а частота вращения подающего вала (n , мин⁻¹) при $d_6 = 50$ мм составит

$$n = \frac{1000 \cdot V}{\pi \cdot d_6}. \quad (18)$$

Результаты расчётов распределения температуры по толщине заготовки по уравнению 9 представлены на рис. 3.

При расчёте начальная температура заготовки принималась равной $T_0 = 293$ К. Как видно из графика температура на поверхности, противоположной поверхности рифления, мало отличается от начальной, что соответствует принятому допущению. Расчётные технологические параметры рифления приведены в табл. 3.

Из табл. 3 следует, что количество энергии передаваемой заготовке в процессе нагрева для достижения заданной температуры на поверхности рифления

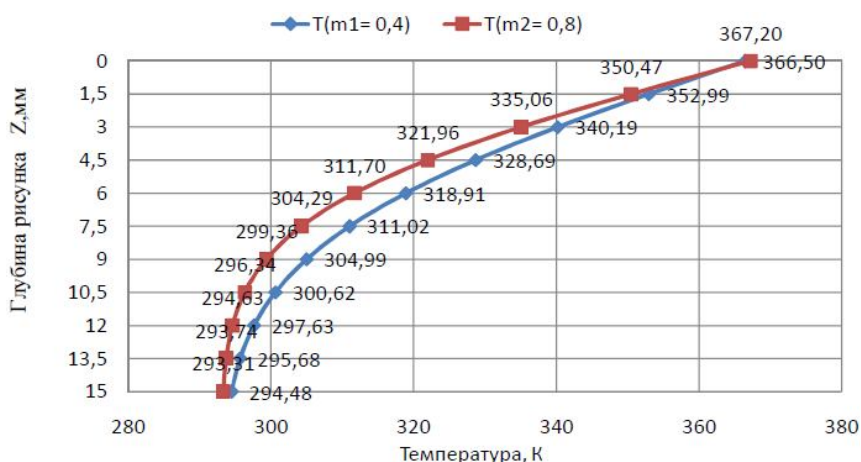


Рис. 3. Распределение температуры в ДПК с полимерной матрицей ПЭНП в момент рифления

Таблица 3

Технологические параметры процесса рифления

Массовая доля древесных частиц, m_l	Параметр				
	Продолжительность нагрева поверхности рифления до заданной температуры τ , с	Температура на поверхности источника нагрева T_2 , К	Плотность теплового потока g_w , Вт/м ²	Количество энергии, передаваемой заготовке в процессе нагрева, Вт	Частота вращения подающего вала n , мин ⁻¹
0,4	160	553	2126	234	2,7
0,8	135	585	2815	310	3,1

для одного и того же типа ДПК зависит от содержания в нем древесных частиц. Следовательно, установка должна иметь устройство регулирования температуры на поверхности источника нагрева. Продолжительность нагрева поверхности рифления до заданной температуры также разная. В рассмотренном варианте разность в продолжительности нагрева составила 25 с, но для других типов ДПК она может быть более существенной. В связи с этим, в установке должна быть предусмотрена возможность регулирования частоты

вращения подающего вала.

Заключение

Разработана математическая модель процесса рифления ДПК с различными типами полимерных матриц. Численные расчёты по модели позволяют для различных типов ДПК определять основные технологические параметры рифления: продолжительность нагрева поверхности рифления до заданной температуры, мощность источника нагрева, размеры камеры нагрева, скорость подачи заготовки.

Библиографический список

1. Clemons, C. Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries [Текст] / Crag Clemons // Forest Product Journal. – 2002. – Vol. 52. – № 6. – pp.10-18.
2. Yu, G. Reliability analysis of wood-plastic planks based on predicted modulus of rupture [Текст] / Guiwen Yu, Yingcheng Hu, Jiyou Gu, Qingwen Wang // BioResources. – 2012. – Vol. 7. – № 4. – pp.5710-5718.
3. Ганиева, Э.Н. Обзор рынка изделий из древесно-полимерных композитов [Текст] / Э.Н. Ганиева // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2015. – №10. – С. 41-43.
4. Гутер, Р.С. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта [Текст] / Р.С. Гутер, Б.В. Овчинский. – М.: Наука, 1970. – 432 с.
5. Зефилов, Н.С. Химическая энциклопедия [Текст]: в 5 т. Т.4: Полимерные материалы – Трипсин / Н. С. Зефилов. – М.: Сов. энцикл.; Большая Рос. энцикл., 1995. – С. 19, С. 44.
6. Клёсов, А.А. Древесно-полимерные композиты [Текст] / А.А. Клёсов. – СПб.: Научные основы и технологии, 2010. – 736 с.
7. Кнунянц, И.Л. Химическая энциклопедия [Текст]: в 5 т. Т.3: Меди сульфиды – Полимерные красители / И. Л. Кнунянц. – М.: Сов. энцикл.; Большая Рос. энцикл., 1992. – С. 621.
8. Кристенсен, Р. Введение в механику полимеров. [Текст] / Р. Кристенсен. – Мир, 1962. – 334 с.
9. Лыков, А.В. Теория теплопроводности [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Высшая школа, 1967.– 600 с.
10. Описание и марки полимеров – поливинилхлорид [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/6.html&viewinfo=2>
11. Основные физические свойства наполнителей, используемых в полимерных материалах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kaprolon-alvis.ru/info/info6.html/>
12. Романенко, П.Н. Теплопередача [Текст] / П.Н. Романенко, А.Н. Обливин, Ю.П. Семенов. – М.: Лесная промышленность, 1969. – 432 с.
13. Справочник по математике для научных работников и инженеров [Текст] : справочное издание / Г. Корн, Т. Корн; под ред. И.Г. Арамановича. – М.: Наука, 1984. – 832 с.
14. Справочник по древесине [Текст]: справочное издание / А.М. Боровиков; под ред. Б.Н. Уголева. – Москва : Лесная промышленность, 1989. – 296 с.
15. Страхов, В.В. Форсайт в лесном секторе стран Европейского союза [Текст] / В.В. Страхов // Форсайт. – 2008. – Т. 7. – №3. – С. 10-15.
16. Теплопроводность пластиков и пластмасс, физические свойства полимеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svoystva-polimero>.
17. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики [Текст] / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Главиздат, 1953. – 679 с.
18. Янченко, Г.А. Приближённые методы расчёта функции ошибок Гаусса и интегралов [Текст] / Г.А. Янченко, Е.В. Гринь, А.В. Жаровкин // Неделя горняка. – 2002.– № 5. – С. 3.

References

1. Clemons C. Wood-plastic composites in the United States: the interfacing of two industries ; Forest Product Journal, 2002, Vol. 52, no. 6, pp.10-18.
2. Yu G., Hu Y., Gu J., Wang Q. Reliability analysis of wood-plastic planks based on predicted modulus of rupture; BioResources, 2012, no.7(4), pp.5710-5718.
3. Ganieva E.N. *Obzor rynka izdelij iz drevesno-polimernyh kompozitov* [A review of the market of products made of wood-plastic composites], Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya [Repair, restoration, modernization], 2015, no. 10, pp.41-43. (In Russian).
4. Guter R.S., Ovchinskij B.V. *Elementy chislennogo analiza i matematicheskoy obrabotki rezul'tatov opyta* [Elements of numerical analysis and mathematical processing of the results of experience], Moscow, 1970, 432 p. (In Russian).
5. Zefirov N.S. *Himicheskaja jenciklopedija v 5 tomah, T.4: Polimernye materialy – Tripsin* [Chemical encyclopedia in 5 volumes, V.4: Polymer materials-Trypsin], Moscow, 1995, pp. 19, pp. 44. (In Russian).
6. Klesov A.A. *Drevesno-polimernye kompozity* [Wood-polymer composites], Saint-Petersburg, 2010, 736 p. (In Russian).
7. Knunjanc I.L. *Himicheskaja jenciklopedija v 5 tomah, T3: Medi sul'fidy – Polimernye krasiteli* [Chemical encyclopedia in 5 volumes, V 3: Copper sulphides - polymeric dyes], Moscow, 1992. pp. 621. (In Russian).
8. Kristensen R. *Vvedenie v mehaniku polimerov* [Introduction to mechanics of polymers], Moscow, 1962, 334 p. (In Russian).
9. Lykov A.V. *Teorija teploprovodnosti* [Theory of thermal conductivity], Moscow, 1967, 600 p. (In Russian).
10. *Opisanie i marki polimerov – polivinilkhlорid* [Description and brand polymers – polyvinylchloride] Available at: [http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/6.html &viewinfo=2](http://www.polymerbranch.com/catalogp/view/6.html&viewinfo=2). (In Russian).
11. *Osnovnye fizicheskie svoystva napolniteley, ispol'zuemykh v polimernykh materialakh* [The basic physical properties of the fillers used in polymer materials] Available at: <http://www.kaprolon-alvis.ru/info/info6.html/>(In Russian).
12. Romanenko P.N., Oblivin A.N., Semenov Ju.P. *Teploperedacha* [Heat transfer], Moscow, 1969, 432 p. (In Russian).
13. *Spravochnik po matematike dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov* [Mathematical Handbook for Scientists and Engineers]. G. Korn, T. Korn; pod red. I.G. Aramanovicha. Moscow, 1984, 832 p. (In Russian).
14. *Spravochnik po drevesine* [Handbook of wood]. A.M. Borovikov; pod red. B.N. Ugoleva. Moscow, 1989, 296 p. (In Russian).
15. Strakhov V.V. *Forsayt v lesnom sektore stran Evropeyskogo soyuza* [Foresight in the forest sector of the European Union countries]. 2008, Vol. 7, no. 3, pp.10-15. (In Russian).
16. *Teploprovodnost' plastikov i plastmass, fizicheskie svoystva polimerov* [The thermal conductivity of plastics and plastics, the physical properties of polymers]. Available at: <http://thermalinfo.ru/svoystva-materialov/plastmassa-i-plastik/teploprovodnost-plastikov-i-plastmass-fizicheskie-svoystva-polimero>. (In Russian).
17. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uraveniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics] Moscow, 1953, 679 p. (In Russian).
18. Yanchenko G.A., Grin E.V., Zharovkin A.V. *Priblizhennyye metody rascheta funktsii oshibok Gaussa i integralov* [Approximate methods of calculation of the Gauss error function and integrals]. *Nedelya gornyaka* [Week of the miner]. 2002, no. 5, pp. 3. (In Russian).

Сведения об авторах

Абразимов Владимир Владимирович – профессор кафедры технологии машиностроения Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», доктор технических наук, доцент, г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: abrazimov@mgul.ac.ru

Котенко Владимир Дмитриевич – профессор кафедры технологии машиностроения Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», доктор технических наук, профессор, академик РАЕН, академик Российской академии Космонавтики им. К. Э. Циолковского, лауреат государственной премии, заслуженный деятель науки и техники, г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: kotenko@mgul.ac.ru

Ганиева Эльвира Назиповна – аспирант кафедры технологии машиностроения Мытищинского филиала ФГБОУ ВО «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», г. Мытищи, Российская Федерация; e-mail: ganieva@mgul.ac.ru

Information about authors

Abrazumov Vladimir Vladimirovich – Professor in «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», DSc in Engineering, Associate Professor, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: abrazumov@mgul.ac.ru

Kotenko Vladimir Dmitrievich – Professor in «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», DSc in Engineering, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Academician of the Russian Academy of Cosmonautics named after K.E. Tsiolkovsky, Laureate of State prize, Honoured master of sciences and engineering, Mytishchi, Russian Federation; e-mail: kotenko@mgul.ac.ru

Ganieva Elvira Nazipovna – post-graduate student «Technology of machine building» Mytishchi Branch of Federal State Budget Education Institution of Higher Education «Bauman Moscow State Technical University», Mytishchi, Russian Federation; e-mail: ganieva@mgul.ac.ru

DOI:

УДК 674.047

КИНЕТИКА СУШКИ И УВЛАЖНЕНИЯ ДРЕВЕСИНЫ

кандидат технических наук, доцент **М. Г. Ермоченков**

Мытищинский филиал «Московского государственного технического университета имени Н.Э.Баумана», г. Мытищи, Российская Федерация

Термическое модифицирование древесины широко используется для улучшения ее свойств. Нагрев без доступа окислителя приводит к деструкции материала, которая вызывает изменение состава и структуры и как следствие свойств. Одним из этапов процесса термомодифицирования является сушка. В статье приведены результаты экспериментально-расчетных исследований кинетики сушки различных пород древесины в гелиевой среде. Древесина рассматривается как многокомпонентный композиционный материал, одним из компонентов которого является свободная и связанная влага. Сушка – это сложный многостадийный физико-химический процесс. Рассматривается модель, описывающая удаление связанной влаги, как совокупность прямого (десорбция) и обратного (сорбция) процессов. Предложен экспериментально-расчетный метод определения кинетических параметров сорбции. Они определяются из условия равенства скоростей сорбции и десорбции при равновесной влажности древесины. Сделано допущение, что скорость прямого процесса равна скорости удаления связанной влаги из стружки древесины в осушенном воздухе. Кинетические параметры десорбции определяются по результатам термогравиметрических экспериментов. Для проведения термогравиметрических исследований была разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая проводить исследования в среде с контролируемой влажностью. В качестве образцов использовалась стружка древесины различных пород. Нагрев осуществлялся с постоянным темпом 1 К/мин . Проведены термогравиметрические исследования кинетики сушки древесины березы в осушенном воздухе. Получены постадийные кинетические параметры прямого процесса. Исходя из полученных результатов, были рассчитаны кинетические параметры отдельных стадий сорбции влаги древесиной березы. Эти данные позволяют рассчитывать изменение влажности древесных материалов при удалении связанной влаги в средах с произвольной влажностью. Проведена экспериментальная проверка адекватности предложенной модели.

Ключевые слова: прямые и обратные реакции, кинетические параметры сушки, кинетические параметры увлажнения, удаление связанной влаги, сушка древесины.