

УДК 691.075.5:549.385

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МОДИФИЦИ- РОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ К МИКРОБИОЛО- ГИЧЕСКОМУ РАЗРУШЕНИЮ

Ю. В. Цапко

Кандидат технических наук, старший  
научный сотрудникЛаборатория криминалистических  
видов исследований,Киевский научно-исследовательский  
институт судебных экспертиз МЮ Украины  
ул. Смоленская, 6, г. Киев, Украина, 03680

E-mail: Alekslion77777@bigmir.net

*Виявлення пошкоджень деревини в будівельних конструкціях на ранніх стадіях, а також прогнозування, дозволить оцінити умови експлуатації виробів, визначити ефективність застосування методів і засобів захисту. Проаналізовано кінетика біологічних популяцій в органічній масі, яка залежить від концентрації компонентів середовища, а також моделі, що описують ці процеси. Проведено моделювання біологічного руйнування деревини*

*Ключові слова: просочення, деревина, антисептики, ефективність модифікування, біологічне руйнування, біологічна стійкість деревини*

*Выявление повреждений древесины в строительных конструкциях на ранних стадиях, а также прогнозирования, позволит оценить условия эксплуатации изделий, определить эффективность применения методов и средств защиты. Проанализирована кинетика биологических популяций в органической массе, которая зависит от концентрации компонентов среды, а также модели, описывающие эти процессы. Проведено моделирование биологического разрушения древесины*

*Ключевые слова: пропитка, древесина, антисептики, эффективность модифицирования, биологическое разрушение, биологическая стойкость древесины*

## 1. Введение

Выявление повреждений древесины в строительных конструкциях на ранних стадиях, а также предсказание их развития и прогнозирование, позволят оценить условия и сроки эксплуатации изделий, определить эффективность применения методов и средств защиты и принять решение об их совершенствовании.

## 2. Литературный обзор

Микроорганизмы (грибы), которые образуются на поверхности древесины, выделяют ферменты, которые со временем превращают составляющие материала в более доступные органические соединения [1]. Питательной средой для грибов служит целлюлоза древесины. Грибы выделяют особый фермент – цитазу, который переводит нерастворимую в воде целлюлозу ( $C_6H_{10}O_5$ )<sub>n</sub> в растворимое вещество – глюкозу ( $C_6H_{12}O_6$ ), в теле гриба глюкоза окисляется кислородом воздуха, образуя углекислый газ и воду. Процесс полного разрушения древесины при условиях, благоприятных для грибов (влажность выше 25 %, температура воздуха 18–40 °C), может произойти за 1–1,5 года.

Принципиальной особенностью кинетики биологических популяций в органической массе зависимость скорости роста бактерий от концентрации одного или нескольких наиболее важных компонентов

среды, которые обеспечивают их жизнедеятельность. Одной из причин ограничения роста может быть недостаток пищи (лимитирование по субстрату). Из микробиологических исследований известно, что в условиях лимитирования по субстрату скорость роста растет пропорционально концентрации субстрата, а при избытке субстрата выходит на постоянную величину, определяемую генетическими возможностями популяции. В течение некоторого времени численность популяции растет экспоненциально, пока скорость роста не начинает лимитироваться какими-либо другими факторами [2].

В основе математического описания популяционных систем лежат элементарные модели, описывающие взаимодействия их компонентов между собой и с факторами внешней среды и поддающиеся качественному анализу. Методы качественного исследования позволяют определить такие важные характеристики, как устойчивость и наличие колебаний численности популяции. В качестве динамических переменных выступает число клеток (особей) в единице объема или концентрация биомассы клеток, а также концентрация субстратов, метаболитов и других веществ, оказывающих влияние на жизненные процессы в популяции. Качественный анализ кинетических свойств модели, построенной с учетом этих предположений, сводится к исследованию системы дифференциальных уравнений, описывающей скорость изменения концентрации компонентов. Все эти свойства можно продемонстри-

ровать на сравнительно простых нелинейных динамических моделях, которые и выступают в роли базовых моделей математической биологии [3 – 5].

### 3. Цель и задачи исследования

На основе защиты древесины антисептиками провести исследование интенсивности биологического разрушения древесины при ее модифицировании.

### 4. Моделирование процесса биологического разрушения древесины и влияние поверхностной модификации на биодеструкцию

Принимаем, что интенсивность биоразрушений объема материала в процессе биохимического обмена активными микроорганизмами растительного сырья пропорциональна размерам (численности) их популяции ( $N$ ) в части объема материала ( $X$ ), а именно

$$I = \psi_0 \cdot \frac{N}{V} \cdot X, \quad (1)$$

где  $\psi_0$  - мощность изменения удельной массы материала в результате жизнедеятельности отдельного микроорганизма, кг/сутки;

$N$  - численность популяции микроорганизмов в объеме материала;

$V$  - объем материала, м<sup>3</sup>;

$X$  - доля объема материала, участвующего в биохимическом процессе.

Динамика изменения концентрации микроорганизмов в древесине определяется удельной скоростью роста [6] и численности и в общем случае описывается следующей зависимостью

$$\frac{dN}{dt} = \mu \cdot N, \quad (2)$$

где  $\mu$  - удельная скорость роста микроорганизмов.

В большинстве случаев удельная скорость роста микроорганизмов в материале зависит от концентрации лимитирующего субстрата, функционально зависит от биоразрушения и может быть приведена следующим уравнением

$$\mu = \alpha - \beta \cdot R, \quad (3)$$

где  $\alpha$  - предельно максимальная удельная скорость роста микроорганизмов,

$\beta$  - удельная скорость уменьшения численности микроорганизмов,

$R$  - функция биоразрушающих веществ.

В свою очередь, функция биоразрушений, значение которой равно доле микроорганизмов, прекративших жизнедеятельность в результате неблагоприятных условий (накопление продуктов разложения ферментной деятельности, применение биозащитных препаратов, повышение температуры), описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dR}{dt} = \gamma \cdot N, \quad (4)$$

где  $\gamma$  - коэффициент уменьшения популяции.

Количество органического вещества  $X$ , т. е. доли объема материала, участвующего в биохимическом обменном процессе, описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dX}{dt} = k \cdot (a - X) \cdot N, \quad (5)$$

где  $k$  - коэффициент проницаемости микроорганизмов в материал;

$a$  - общая доля органического вещества.

В результате решения приведенной системы полученных зависимости динамики популяции микроорганизмов в объеме растительного сырья [7, 8]

$$N = \frac{N_m}{\text{ch}^2 \left[ \left( 1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot \frac{\Delta}{2} \right]}, \quad (6)$$

где  $N_m$  – максимальное количество микроорганизмов,  $t_m$  – начальный момент времени образования микроорганизмов,

$t$ , – длительность процесса биоразрушения,

$\Delta/2$  – параметр инкубационного периода.

Определенное количество органического вещества  $X$ , принимающего участие в процессе разложения, описывается зависимостью [7]

$$X = 1 - e^{-2kN_m \frac{t}{\Delta} \left\{ \text{th} \frac{\Delta}{2} - \text{th} \left[ \left( 1 - \frac{t}{t_m} \right) \frac{\Delta}{2} \right] \right\}}. \quad (7)$$

Процесс биологического разрушения целлюлозосодержащих материала характеризуется инкубационным периодом - продолжительностью периода времени, после которого начинается интенсивное разрушение материала. В наших исследованиях допускается, что продолжительность этого периода совпадает с промежутком времени  $t_m$ , при котором популяция микроорганизмов достигнет критического размера  $N_m$ .

Подставим в выражение для функции биоразрушений (1) формулу (6), полученную для расчета размеров популяции. Долю объема материала, участвующих в обменном процессе (7), принимаем равной 1, а функцию гиперболического косинуса заменяем на функцию гиперболического тангенса, согласно известной тригонометрической формуле [8]. При этом интенсивность биоразрушения преобразуется в следующий вид

$$I = \frac{\Psi \cdot t_m \cdot v}{x \cdot h} \cdot \left\{ \text{th}x - \text{th} \left[ \left( 1 - \frac{t}{t_m} \right) \cdot x \right] \right\}, \quad (8)$$

где  $\Psi$  - объемная скорость биоразрушения, кг/(сутки·м<sup>3</sup>);  $\Psi = \Psi_0 \cdot N_m / V$ ;  $v$  - скорость биообращения, м/сутки;  $h$  - глубина проникновения, м;  $x = \Delta/2$  - относительная величина инкубационного периода.

**5. Апробация результатов исследований**

Определение динамики популяции микроорганизмов в объеме растительного сырья довольно сложно, поэтому ограничиваются количеством разрушенного вещества, которое определяется экспериментально. Динамика, в свою очередь, может быть определена как изменение массы во времени.

Проведены исследования по определению биостойкости древесины к воздействию микрофлоры лесной почвы, пораженной культурами грибов рода *Seraticystus*, *Sporodemiam*, *Penicilliam* согласно [10] в условиях лаборатории. Образцы древесины сосны размером 30x30x15 мм пропитывали биопрепаратом полигексаметилен-гуанидинфосфат. Контрольные и обработанные образцы в условиях испытаний по [10] выдерживали в течение двух календарных месяцев. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты влияния полигексаметиленгуанидина на стойкость древесины к биоразрушению

Объект испытаний	№ исп.	Кол-во образцов	Средняя масса образцов, г	
			до испытаний	после испытаний
Необработанные образцы древесины	1	5	6,5	4,0
	2	5	6,8	4,3
	3	5	6,5	4,0
	4	5	6,6	4,1
	5	5	6,6	4,1
Обработанные образцы древесины	6	15	6,7	6,67
	7	15	6,8	6,76
	8	15	6,8	6,77
	9	15	6,8	6,75
	10	15	6,7	6,67

По данным таблицы рассчитана скорость биоразрушения по уравнению

$$\psi = \frac{\Delta m}{\tau \cdot V}, \tag{9}$$

где  $\Delta m$  – потеря массы образца, г;  $\tau$  – время испытания, сутки;  $V$  – объем образца, м<sup>3</sup>.

Анализ результатов показал, что поверхностное биообрастание необработанных образцов проходило со скоростью около 0,00045 м/сутки, максимальная потеря массы в случае биоразрушений составила 38 %, глубина проникновения бактерий составляла по всей толщине (0,015 м). Для образцов, обработанных антисептиком, биообрастание проходило со скоростью около 0,3•10<sup>-7</sup> м/сутки, глубина проникновения до 1,2 мм, а потеря массы образцов древесины, которые были обработаны, была менее 1,9 %, что значительно меньше, чем регламентировано нормами [5].

Для данной серии образцов массовая скорость биоразрушений составляет 3,08 кг/(м<sup>3</sup>•сутки) для необработанных и 0,25 кг/(м<sup>3</sup>•сутки) для обработанных соответственно. На рис. 1 представлены результаты обработки данных о продолжительности периода биоразрушения древесины и ее скорости.

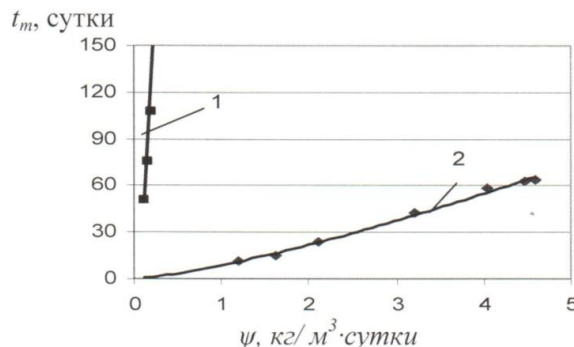


Рис. 1. Зависимость скорости биоразрушения древесины от времени: 1 – обработанная; 2 – необработанная

Данные обрабатывались в Microsoft Excel степенной функцией

$$t_m = a \cdot \psi^b, \tag{10}$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы, сут и м<sup>3</sup>•сутки/кг.

Экспериментальные данные обрабатывали методом наименьших квадратов. Минимизировалась дисперсия

$$D = [m(\tau_i) - m_i]^2, \tag{11}$$

где  $\tau_i$  – время проведения измерений, с;  $m(\tau_i)$  – значение скорости биоразрушения за (10);  $m_i$  – экспериментальное значение скорости биоразрушения.

Максимальное расхождение между экспериментальными и расчетными значениями не превышает 17 %.

В соответствии с условием  $t = t_m$  и  $I=1$  на основе выражения (8) получаем для параметров разрушения  $t_m$  и  $x=\Delta/2$

$$\text{th}x = \frac{\chi}{t} \cdot x, \tag{12}$$

где  $\chi$  – параметр, характеризующий промежуток времени, при котором под действием биоразрушений с единицы объема теряется единица массы материала.

Основываясь на уравнении (12), переходим к определению второго параметра обменного процесса  $x$ .

Задача решается в следующем порядке. Сначала вычисляется биоразрушающая характеристика материала  $\chi$ . Согласно рис. 1, интенсивное биоразрушение необработанной древесины начинается на 15 сутках и удельная плотность образца уменьшается до 300 кг/м<sup>3</sup> при массовой скорости биоразрушений  $\psi=3,08$  кг/(м<sup>3</sup>•сутки). Согласно этому, значение параметра  $\chi$  ( $\chi = \Delta\rho/\psi$ ) составляет 48,7 суток.

Из графика (рис. 2) аппроксимация для необработанной древесины дает значение,  $a = 8,009$ ;  $b = 1,795$ ,

тогда по уравнению (10) значения параметра  $t_m$  составляет 60,32 суток соответственно.

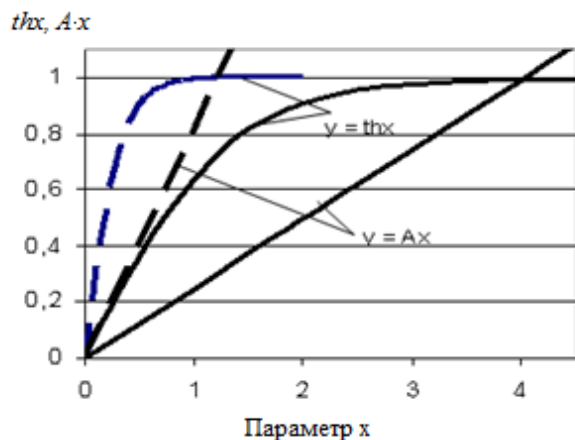


Рис. 2. Определение параметров биоразрушений  $x$  для древесины (пунктиром - необработанная)

Рассчитаем параметр  $A$ :

$$A = \frac{\chi}{t_m}, \tag{13}$$

и решаем графически уравнение (12) – при этом получаем значение  $x = \Delta/2 = 1,3$  (рис. 2).

Для обработанной древесины интенсивное биоразрушение необработанной древесины начинается на 56

сутках и удельная плотность образца уменьшается до  $440 \text{ кг/м}^3$ , значение параметра  $\chi$  ( $\chi = \Delta\rho/\psi$ ) составляет 40,0 суток, аппроксимация для необработанной древесины  $a = 1655,4$ ;  $\theta = 1,6838$ ,  $t_m$  составляет 161,2 суток. Значение  $x = \Delta/2 = 4,0$ .

Рассчитанная интенсивность биоразрушений необработанной древесины составляет  $0,94 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}$ , а для биозащищенной древесины соответственно составляет  $0,002 \text{ кг/(м}^3 \cdot \text{сут)}$ .

Таким образом, в результате проведенных исследований определена зависимость, учитывающая продолжительность инкубационного периода и влияние биозащитных веществ, и проведено моделирование динамики биоразрушений материала.

## 6. Выводы

Поверхностная модификация древесины приводит к снижению глубины проникновения бактерий в объем, а соответственно и скорости биологического разрушения, с образованием поверхностной структуры древесины, способной противостоять микробиологическому воздействию.

Установлено, что эта структура представляет собой композиционный слой древесины, капилляры и поры которой заполнены антисептиком, и характеризуется сопротивляемостью к воздействию микробиологических источников, что свидетельствует о защитном характере модификаторов на поверхности древесины. Устойчивость модифицированной древесины к микробиологическому воздействию, оцениваемая по экспериментальным данным, в среднем в 12 раз выше по сравнению с необработанной.

## Литература

1. Шевченко, С. В. Лесная Фитопатология [Текст] / С. В. Шевченко, А. В. Цилюрик. – К.: Вища школа, 1986.- 384 с.
2. Резниченко, Г. Ю. Математические модели в биофизике и экологии [Текст] / Г. Ю. Резниченко. – Москва-Ижевск: Ин-т компютер. исследований, 2003.- 184 с.
3. Романовский, Ю. М. Математическая биофизика [Текст] / Ю. М. Романовский, Н. В. Степанова, Д. С. Чернавский. – М.: Наука, 1984.- 304 с.
4. Базыкин, А. Д. Математическая биофизика взаимодействующих популяций [Текст] / А. Д. Базыкин. – М.: Наука, 1985. – 180 с.
5. Пилькевич, И. Математическое моделирование динамики популяций [Текст] / Игорь Пилькевич, Александр Маевский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2010. – Т. 3, N 6(45). – С. 50-53.
6. Жданова, Г. В. Математическая модель влияния динамики роста микроорганизмов на ресурс работы ионообменных фильтров [Текст] / Г. В. Жданова, О. И. Куржеевская // Сб. науч. тр. Севастопольского военно-морского института им. П.С. Нахимова. – Севастополь: СВМИ, 2008. – Вып. 1(14). – С. 28-37.
7. Откидач, Д. М. Математическая модель источников тепловыделения в насыпи растительного сырья [Текст] / Д.М. Откидач, Ю.В. Цапко // 36. наук. праць.- Львів: ЛДУ БЖД.- 2007.- Вып. 10.- С. 48-52.
8. Игнатъева, А. В. Курс высшей математики [Текст] / А. В. Игнатъева, Т. И. Краснощёкова, В. Ф. Смирнов. – М.: Высшая школа, 1964. – 684 с.
9. Бронштейн И. Н., Семендяев К.А. Справочник по математике [Текст] / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Гос. изд. физ.-мат. лит-ры, 1959. – 608 с.
10. ГОСТ 26603-1985 Полотна нетканые (подоснова) антисептированные из волокон всех видов для теплозвукоизоляционного линолеума. Метод определения биостойкости. - [Введен 01.01.86]. - М.: Изд-во стандартов, 1986. – 12 с.