

УДК 674.038.182:699.87

ИЗМЕНЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА В ВОЗДУХЕ ПРИ РАЗЛОЖЕНИИ ДРЕВЕСИНЫ ПАМЯТНИКОВ АРХИТЕКТУРЫ

Гаврилов Т.А.

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет», Петрозаводск,
e-mail: gimmo@mail.ru

Статья посвящена проблеме биоразрушения древесины памятников деревянной архитектуры. Одной из основных причин биоразрушения древесины являются дереворазрушающие грибы, которые в процессе своей жизнедеятельности разлагают древесину на воду и углекислый газ. В статье выдвигается гипотеза о возможности идентификации процесса разложения древесины по величине содержания углекислого газа у поверхности древесины. Целью исследования является изучение закономерностей процесса разложения древесины памятников архитектуры. В ходе исследования проводились измерения содержания углекислого газа у поверхности древесины трех групп образцов – не подверженных разложению, находящихся в начальной и развитой стадиях гниения. Для измерения содержания углекислого газа использовались цифровые датчики измерения содержания углекислого газа в воздухе. По результатам исследования выявлено, что у не подверженных разложению образцов содержание углекислого газа у поверхности древесины является постоянной величиной, варьируемой в небольшом интервале и примерно равной содержанию углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений). У образцов, находящихся в начальной и развитой стадиях разложения, содержание углекислого газа у поверхности древесины непрерывно увеличивается, причем по величине значительно превышает содержание углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений). У образцов, находящихся в начальной стадии разложения, содержание углекислого газа увеличивается плавно с постоянной скоростью, равной 5,34 ppm/сутки. У образцов, находящихся в развитой стадии разложения, содержание углекислого газа увеличивается резко. Причем быстрота изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины замедляется и плавность замедления составляет 1,18 ppm/сутки². В ходе исследования получены закономерности изменения содержания углекислого газа с течением времени. Полученные результаты позволяют разработать методы выявления процесса разложения древесины на начальных стадиях и купировать его существующими мероприятиями по защите древесины.

Ключевые слова: биоразрушение древесины, дереворазрушающие грибы, древесина, памятники архитектуры, углеводный гидролиз, углекислый газ

CHANGES IN THE CONTENT OF CARBON DIOXIDE IN THE AIR DURING THE DECOMPOSITION OF WOOD OF ARCHITECTURAL MONUMENTS

Gavrilov T.A.

Petrozavodsk State University, Petrozavodsk, e-mail: gimmo@mail.ru

The article is devoted to the problem of wood biodegradation of monuments of wooden architecture. One of the main reasons for the biodegradation of wood is wood-destroying fungi, which decompose wood into water and carbon dioxide in the course of their life. The article puts forward a hypothesis about the possibility of identifying the process of wood decomposition by the value of carbon dioxide content near the wood surface. The purpose of the study is to study the regularities of the process of decomposition of wood of architectural monuments. In the course of the study, measurements of the carbon dioxide content near the wood surface of three groups of samples were carried out – non-decomposable, in the initial and advanced stages of decay. To measure the content of carbon dioxide, digital sensors were used to measure the content of carbon dioxide in the air. According to the results of the study, it was revealed that in samples that are not subject to decomposition, the content of carbon dioxide at the surface of the wood is a constant value, varied in a small range, and approximately equal to the content of carbon dioxide in the outside air (outdoors). For samples that are in the initial and advanced stages of decomposition, the content of carbon dioxide at the surface of the wood continuously increases, and the value significantly exceeds the content of carbon dioxide in the outside air (outdoors). For samples in the initial stage of decomposition, the carbon dioxide content increases smoothly at a constant rate of 5.34 ppm/day. For samples that are in the advanced stage of decomposition, the content of carbon dioxide increases sharply. Moreover, the rate of change in the carbon dioxide content at the surface of the wood slows down and the smoothness of the slowdown is 1.18 ppm/day². In the course of the study, regularities were obtained for the change in the content of carbon dioxide over time. The results obtained make it possible to develop methods for detecting the process of wood decomposition at the initial stages and stop it with existing measures to protect wood.

Keywords: wood biodegradation, wood-destroying fungi, wood, architectural monuments, carbohydrate hydrolysis, carbon dioxide

Древесина является ценным, возобновляемым и наиболее доступным строительным материалом. Ее стоимость сравнительно ниже, чем у других строительных материалов. В связи с этим древесина широко применяется в строительстве зданий и сооружений.

В ходе эксплуатации зданий и сооружений древесина подвергается биоразрушению, что значительно сокращает срок эксплуатации зданий и сооружений и вызывает большие материальные потери, а также может являться причиной обрушения как относительно новых, так и исторических кон-

струкций [1]. Так, например, известно, что из общего количества заготавливаемой в России деловой древесины 20% расходуется только для того, чтобы восполнить ее потери от биоразрушения [2].

Не менее важной, чем материальные потери, является проблема частичной или полной утраты объектов культурного наследия в процессе биоразрушения древесины памятников архитектуры [3]. Памятники деревянной архитектуры хранят в себе историю, традиции и быт людей предыдущих поколений, являются отражением и документальным подтверждением прошлого, информацию о котором необходимо сохранять и передавать следующим поколениям. Сохранение объектов культурного наследия является важной задачей, которая позволяет сохранить связь прошлого, настоящего и будущего.

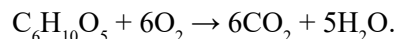
Для защиты древесины зданий и сооружений от биоразрушения применяются конструктивные, антисептические и механические мероприятия [4–6]. К конструктивным относятся мероприятия, направленные на предотвращение благоприятных для развития процесса биоразрушения древесины условий. Например, все деревянные конструкции зданий и сооружений должны быть спроектированы так, чтобы они не могли получать влагу от фундаментов; вентиляция зданий и сооружений должна обеспечить отвод влаги от полов, потолков и др. К антисептическим относятся мероприятия, направленные на химическое уничтожение дереворазрушающих грибов на поверхности и в толще древесины зданий и сооружений путем их пропитки и промазки антисептиками. К механическим относятся мероприятия, направленные на удаление участков древесины, пораженных дереворазрушающими грибами, и их замену.

Комплексное использование описанных мероприятий позволяет обеспечить достаточно надежную защиту древесины зданий и сооружений от биоразрушения. Но весь этот комплекс мероприятий применим только для зданий и сооружений, не относящихся к памятникам деревянной архитектуры. Так, конструктивные мероприятия невозможны ввиду того, что памятники деревянной архитектуры уже имеют определенную конструкцию и внесение в них изменений приведет к утрате статуса объектов культурного наследия. Антисептические мероприятия негативно влияют на физико-механические свойства конструкций памятников деревянной архитектуры, а также имеют ряд других недостатков. Так, например, в работе [7] в ходе исследования состоя-

ния древесины Преображенской церкви (1714 г., остров Кижы, Республика Карелия) было выявлено, что глубокая химическая консервация привела к нарушению целостности древесины, не обеспечила надежную защиту от дереворазрушающих грибов и создала неблагоприятную экологическую обстановку. Механические мероприятия сильно ограничены ввиду того, что при замене более 42% оригинальных конструкций и элементов памятников деревянной архитектуры они утрачивают статус объекта культурного наследия (Федеральный закон «Об объектах культурного наследия (памятниках истории и культуры) народов Российской Федерации» от 25.06.2002 № 73-ФЗ).

Ввиду неприменимости или неэффективности существующих мероприятий по защите конструкций памятников деревянной архитектуры от биоразрушения особую актуальность приобретают исследования, направленные на изучение процесса биоразрушения древесины и разработку путей ее защиты.

Ведущую роль в биоразрушении древесины играют дереворазрушающие грибы [7–9]. Биоразрушение древесины под действием дереворазрушающих грибов происходит постепенно и представляет собой процесс разложения составных частей древесины, приводящий к ее разрушению. В процессе развития дереворазрушающих грибов в древесине происходит углеводный гидролиз, описываемый следующей формулой [10]:



В результате древесина под действием дереворазрушающих грибов разлагается на углекислый газ и воду. Следовательно, процесс разложения древесины сопровождается выделением углекислого газа, причем количество выделяемого углекислого газа зависит от интенсивности процесса разложения и объема пораженной древесины. В связи с чем можно предположить, что изменение содержания углекислого газа у поверхности древесины является маркером процесса разложения древесины. Это и является гипотезой данного исследования. Изучение закономерностей изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины позволит выявлять процесс разложения на начальных стадиях и купировать его существующими мероприятиями по защите древесины.

Цель исследования – изучение закономерностей выделения углекислого газа при разложении древесины памятников архитектуры.

Материалы и методы исследования

Для непрерывного измерения и фиксации содержания углекислого газа у поверхности древесины были разработаны и изготовлены специальные устройства, состоящие из: 1 – цифровых датчиков измерения содержания углекислого газа в воздухе MH-Z19B (диапазон измерения от 0 до 5000 ppm, точность измерений ± 50 ppm), 2 – контроллеров с интегрированным модулем Wi-Fi (ESP32 DevKit V1 30pin), 3 – блоков питания (или аккумуляторных батарей) и ряда вспомогательных элементов (рис. 1). Принцип работы устройств следующий: датчики 1 непрерывно измеряют данные о содержании углекислого газа у поверхности древесины и передают их на контроллеры 2, которые сохраняют эти данные и по локальной сети

Wi-Fi через определенный интервал времени передают их на компьютер.

Принято различать три стадии разложения древесины: начальную, развитую и конечную [3, 11]. В соответствии с этим для изучения процесса выделения углекислого газа при разложении древесины памятников архитектуры были подготовлены образцы элементов конструкций зданий и сооружений из хвойных пород деревьев с разными стадиями разложения древесины (рис. 2): 1) разложение древесины отсутствует (образцы № 1 и 5), 2) разложение древесины находится в начальной стадии (образцы № 2 и 6); 3) разложение древесины находится в развитой стадии (образцы № 3 и 4). Образцы в конечной стадии разложения древесины не рассматривались, так как на данной стадии структура древесины практически полностью разрушена.

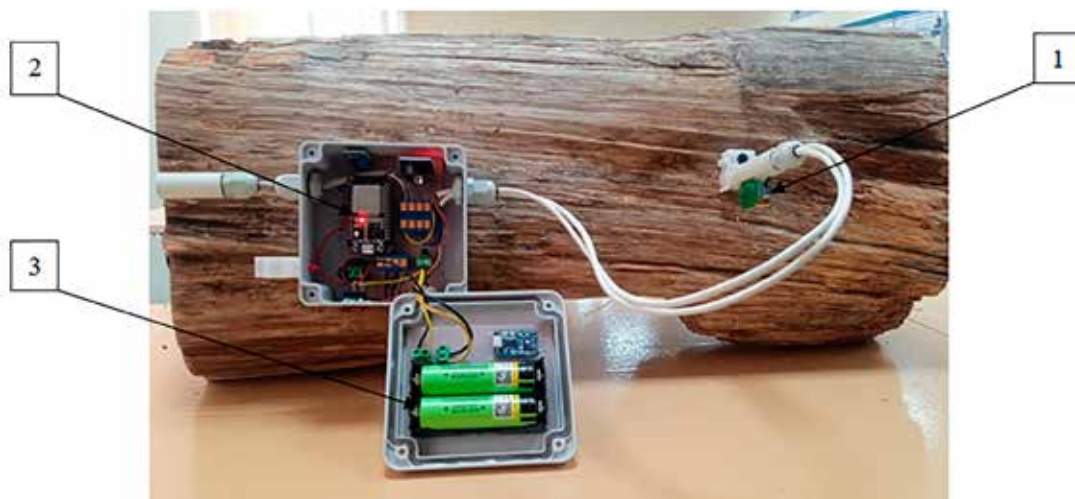


Рис. 1. Устройство для непрерывного измерения содержания углекислого газа у поверхности древесины



Рис. 2. Образцы элементов конструкций зданий и сооружений с разными стадиями разложения древесины

В ходе исследования на каждый образец элементов конструкций зданий и сооружений были установлены изготовленные устройства, которые в течение 60 дней непрерывно измеряли и сохраняли значения содержания углекислого газа в воздухе у поверхности древесины и по локальной сети Wi-Fi через каждые 15 минут передавали измеренные данные на компьютер. Для дальнейшей сравнительной оценки измеряемых данных изготовленные устройства также были установлены на открытом воздухе и измеряли содержание углекислого газа в наружном воздухе. Температура и влажность воздуха в помещениях в ходе исследования также непрерывно измерялась посредством цифровых датчиков температуры и влажности GY-SHT31-D (диапазон измерения температуры от -40 до 120 °С, точность измерения температуры 0,015 °С, диапазон измерения влажности от 0 до 100% относительной влажности, точность измерений влажности 0,01% относительной влажности). Температура воздуха в течение исследования изменялась в интервале от 21,31 до 28,23 °С. Влажность воздуха изменялась в интервале от 37,61 до 53,15%.

Результаты исследования и их обсуждение

В ходе исследования были получены данные о содержании углекислого газа у поверхности древесины для трех групп образцов с разными стадиями разложения, а также данные о содержании углекислого газа в наружном воздухе (вне

помещений). Полученные данные были обработаны общепринятыми методами математической статистики. Результаты представлены на графике (рис. 3).

Анализ результатов, представленных на графиках, показывает, что содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов № 1 и 5 (образцы, у которых разложение древесины отсутствует) на протяжении всего исследования остается постоянным от 409 до 439 ppm, соизмеримым с содержанием углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений) – от 401 до 416 ppm. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов № 2 и 6 (образцы, у которых разложение древесины находится в начальной стадии) на протяжении всего исследования плавно растет от 514 до 777 ppm для образца № 2 и от 592 до 985 ppm для образца № 6. К окончанию исследования рост составил около 51% для образца № 2 и 66% для образца № 6. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов № 3 и 4 (образцы, у которых разложение древесины находится в развитой стадии) на протяжении всего исследования значительно растет от 1897 до 3763 ppm для образца № 3 и от 1927 до 3709 ppm для образца № 4. К окончанию исследования рост составил около 98% для образца № 3 и 92% для образца № 4. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов № 2, 3, 4 и 6 на протяжении всего исследования значительно превышает значения содержания углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений).

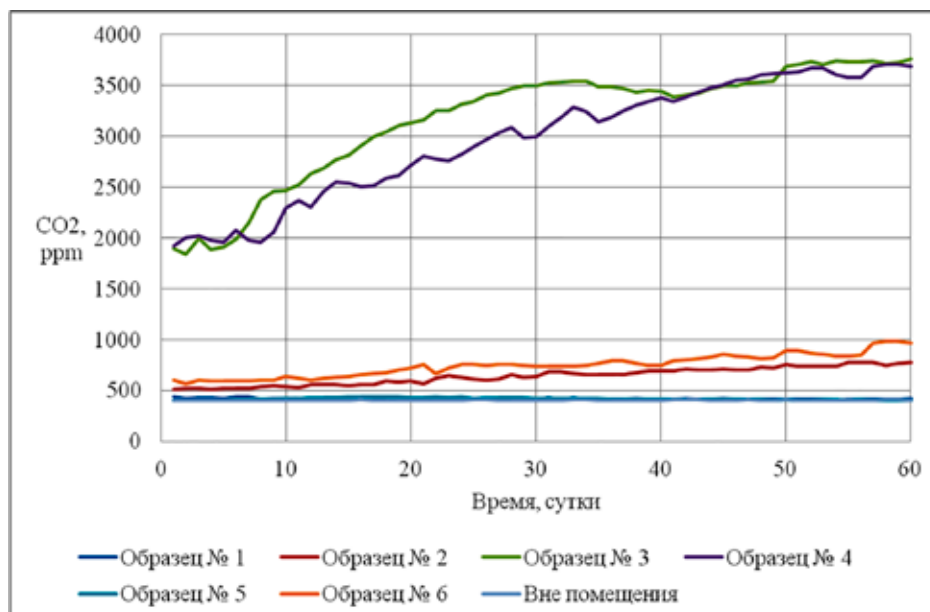


Рис. 3. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов

Представленные на графике (рис. 3) экспериментальные кривые можно аппроксимировать зависимостями, характеризующими взаимосвязь между содержанием углекислого газа у поверхности древесины (CO_2) и длительностью процесса разложения (t):

– для образцов, находящихся в начальной стадии разложения:

$CO_2 = 5,34 \cdot t + 534,16$, достоверность аппроксимации составляет $R^2 = 0,972$;

– для образцов, находящихся в развитой стадии разложения:

$CO_2 = -0,59 \cdot t^2 + 66,87 \cdot t + 1762,20$, достоверность аппроксимации составляет $R^2 = 0,984$.

Быстроту изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины можно определить следующим образом:

$$V_{CO_2} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta CO_2}{\Delta t} = \frac{dCO_2}{dt}.$$

Тогда быстрота (скорость) изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины равна:

– для образцов, находящихся в начальной стадии разложения:

$$V_{CO_2} = \frac{dCO_2}{dt} = \frac{d(5,34 \cdot t + 534,16)}{dt} = 5,34 \text{ ppm/сутки};$$

– для образцов, находящихся в развитой стадии разложения:

$$V_{CO_2} = \frac{dCO_2}{dt} = \frac{d(-0,59 \cdot t^2 + 66,87 \cdot t + 1762,20)}{dt} = -1,18 \cdot t + 66,87 \text{ ppm/сутки}.$$

Плавность быстроты изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины можно определить следующим образом:

$$a_{CO_2} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta V_{CO_2}}{\Delta t} = \frac{dV_{CO_2}}{dt}.$$

Тогда плавность быстроты изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины равна:

– для образцов, находящихся в начальной стадии разложения:

$$a_{CO_2} = \frac{dV_{CO_2}}{dt} = \frac{d(5,34)}{dt} = 0 \text{ ppm/сутки}^2;$$

– для образцов, находящихся в развитой стадии разложения:

$$a_{CO_2} = \frac{dV_{CO_2}}{dt} = \frac{d(-1,18 \cdot t + 66,87)}{dt} = -1,18 \text{ ppm/сутки}^2.$$

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

1. Содержание углекислого газа у поверхности древесины не подверженных разложению образцов изменяется незначительно, причем по величине примерно равно содержанию углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений).

2. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов, находящихся в начальной и развитой стадиях разложения, непрерывно увеличивается, причем по величине значительно превышает содержание углекислого газа в наружном воздухе (вне помещений).

3. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов, находящихся в начальной стадии разложения, увеличивается плавно с постоянной скоростью, равной 5,34 ppm/сутки. Изменение содержания углекислого газа можно описать уравнением $CO_2 = 5,34 \cdot t + 534,16$.

4. Содержание углекислого газа у поверхности древесины образцов, находящихся в развитой стадии разложения, увеличивается резко. Причем быстрота изменения содержания углекислого газа у поверхности древесины замедляется и плавность замедления составляет 1,18 ppm/сутки². Изменение содержания углекислого газа можно описать уравнением $CO_2 = -0,59 \cdot t^2 + 66,87 \cdot t + 1762,20$.

5. Результаты исследования подтверждают справедливость выдвинутой гипотезы о том, что изменение содержания углекислого газа у поверхности древесины является маркером процесса разложения древесины. Полученные закономерности позволяют выявить процесс разложения древесины на начальных стадиях и купировать его существующими мероприятиями по защите древесины.

Исследования, описанные в данной работе, были проведены в рамках реализации Программы поддержки НИОКР студентов и аспирантов ПетрГУ, финансируемой Правительством Республики Карелия.

Список литературы

1. Серова Т.А., Титова Ю.А., Шенин Ю.Д. Химический метод оценки степени биodeградации древесины конструк-

- тивных элементов // Magazine of Civil Engineering. 2014. № 3. С. 77–89. DOI: 10.5862/MCE.47.9.
2. Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Микелиз древесины, его продукты и их использование. I. Экологические аспекты микологического разрушения древесины // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 2. С. 81–87. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-2-81-87.
3. Гаврилов Т.А., Станкевич Т.Б. The Influence of Natural and Climatic Factors on the Process of Biodegradation of Timber. Journal of Agriculture and Environment. 2022. № 5 (25). С. 1–6. DOI: 10.23649/jae.2022.5.25.01.
4. Кистерная М.В., Любимцев А.Ю. Система комплексного профилактического обслуживания памятников деревянного зодчества: научно-методические рекомендации. Петрозаводск: Издательский центр музея-заповедника «Киж», 2016. 70 с.
5. Ванин С.И. Гниль дерева: ее причины и меры борьбы. М. – Л.: Государственное издательство сельскохозяйственной и колхозно-кооперативной литературы, 1931. 159 с.
6. Строганов В.Ф., Бойчук В.А., Сагадеев Е.В. Биоповреждение древесных материалов и конструкций // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 2 (28). С. 185–193.
7. Кистерная М.В. Оценка состояния древесины архитектурных памятников: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2000. 24 с.
8. Горбань М.В., Ямпольская Т.Д. Физиологические аспекты деструкции синтетических и природных полимеров коллекционными и аборигенными штаммами микромицетов // Известия Самарского научного центра РАН. 2012. Т. 14. № 1. С. 2206–2210.
9. Третько В.В., Божелко И.К., Снопков В.Б. Абиотические и биологические факторы, влияющие на разрушение древесины в период эксплуатации // Труды БГТУ. 2015. № 2. С. 152–157.
10. Кистерная М.В., Козлов В.А. Методика мониторинга биологических вредителей исторических построек // Системный подход к сохранению памятников деревянного зодчества. Интернет-публикация kizhi.karelia.ru. [Электронный ресурс]. URL: <https://kizhi.karelia.ru/library/sistemnyiy-podhod-2017/1784.html> (дата обращения: 01.10.2022).
11. Кононов Г.Н., Веревкин А.Н., Сердюкова Ю.В., Зайцев В.Д. Микелиз древесины, его продукты и их использование. II. Биолого-морфологические процессы микологического разрушения древесины // Лесной вестник. 2020. Т. 24. № 5. С. 89–96. DOI: 10.18698/2542-1468-2020-5-89-96.