

Олександр БУТАЙ,

к.ф.-м.н., завідувач сектору,
Інститут прикладної фізики НАН України (Суми, Україна),
Комунальний заклад «Центр консервації предметів археології» (Київ, Україна)
e-mail: alex.buhay@gmail.com, ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6813-0413>

КОНСЕРВАЦІЯ ЗРАЗКА ВОЛОГОЇ ДЕРЕВИНИ ЗІ ЗРУБУ ДАВНЬО- РУСЬКОГО КОЛОДЯЗЯ

АНОТАЦІЯ. У статті представлено демонстрацію та випробування на реальному зразку комплексного підходу до консервації археологічної вологої деревини з використанням поліетиленгліколю (ПЕГ). Матеріалом дослідження став фрагмент дубового зрубу XI–XIII ст., виявленого під час розкопок давньоруського поселення Гатне-2. На основі визначення високого ступеня деградації зразка, зумовленого руйнуванням клітинної структури та імовірною втратою лігніну, було ухвалено рішення щодо використання поліетиленгліколю з молекулярною масою 1500. Проведено первинне очищення матеріалу, довготривале вимочування у дистильованій воді (з моніторингом видалення ґрунтових домішок). На другому етапі консервації застосовано просочування 5 % розчином ПЕГ-1500. Після двох місяців перебування у 5 % розчині ПЕГ зафіксовано значне збільшення густини деревини, що свідчить про ефективне проникнення консоліданта в деградовану структуру.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: археологічна деревина; консервація; поліетиленгліколь; деградація деревини; густина та вологість деревини

Вступ. Археологічні знахідки з деревини, особливо ті, що тривалий час перебували у зволоженому або водонасиченому середовищі, потребують невідкладної консервації після вилучення з ґрунту. Будь-яка зміна фізико-хімічних чинників, таких як рівень вологості чи температура, спричиняє швидку деградацію структури деревини і, відповідно, руйнування археологічного об'єкта¹. Волога деревина є одним із найскладніших матеріалів для збереження, оскільки її клітинна структура зазнає деформацій, усадки та тріщин у разі порушення стабільних умов².

Історично для стабілізації археологічної деревини застосовували різні матеріали, серед яких сахароза, алюмінієві квасці та інші речовини, здатні частково заміщати вологу в клітинних порожнинах³. Однак жоден із цих методів не отримав такого широкого використання

¹ Björdahl, B. (1979). *Conservation of Waterlogged Wood*. National Museum of Denmark; Hoffmann, P. (1986). On the stabilization of waterlogged oakwood with polyethylene glycol (PEG). *Studies in Conservation*, 31(3), 103–113.

² Grattan, D. W., Clarke, R. (1987). Conservation of waterlogged wood: A review of current research. *Studies in Conservation*, 32(2), 57–67.

³ Jensen, J. A. (1967). The preservation of wet archaeological wood using sugars. *Curator*, 10(3), 203–214.





та доведеної ефективності, як консервація з використанням поліетиленгліколю (ПЕГ), що нині вважається одним із найрезультативніших способів стабілізації водонасиченої археологічної деревини^{4 5}.

Сучасний підхід до збереження археологічної водонасиченої деревини має ґрунтуватися на комплексному підході: ретельному вивченні стану виробу, підборі відповідної речовини-консоліданта (або їх комбінацій), контролі процесу сушіння та післяконсерваційного зберігання, а також застосуванні сучасних методів документування й моніторингу.

Метою цієї роботи є демонстрація та випробування на реальному зразку комплексного підходу до консервації археологічної вологої деревини із застосуванням поліетиленгліколю.

Матеріали. Під час розкопок, що проходили на давньоруському поселенні Гатне-2, яке займало підвищену борову терасу між двома притоками річки Гатнянки, був виявлений колодязь XI–XIII ст. (рис. 1). Конструкція колодязя являла собою зруб, складений із горизонтально укладених один на одного брусів, з'єднаних між собою «в обло». Вінця зрубу виступали до 0,28 м.

Довжина брусів коливається від 1,59 до 1,81 м, ширина – від 0,12 до 0,21 м, товщина від 2,1 до 7,6 см (враховуючи ступінь збереженості) На кожному з брусів, у верхній частині, зроблено по дві чашки. Їх ширина від 7,5 до 4,5 см, глибина – від 11,5 до 5,3 см. На всіх чашках зафіксовано сліди від пилки. Скоріше за все, під час складання конструкції необхідно було поступово заглиблювати чашки для кожного бруса індивідуально.

Конструкція була поставлена на дно з дощок. Останнє складалось із 5 дощок. Їх довжина коливається від 1,7 до 1,55 м, ширина – від 0,13 до 0,33 м. Насичений водою глинистий материк, щільна структура якого простежена з відзначки 1,04 м від денної поверхні (за наявності ґрунтових вод з рівня 1,47 м), сприяв добрій збереженості дерев'яної частини конструкції і органічних матеріалів у заповненні споруди⁶.

Матеріалом зрубу є деревина дуба. Після вилучення з материка матеріал зрубу був герметично упакований у поліетиленову плівку. Це дозволило запобігти зміні вологості і, відповідно, руйнуванню матеріалу.

Для дослідження був отриманий зразок деревини зрубу масою 291 г. Всі нижчезгадані дослідження були виконані з використанням цього зразка.

Методи та методики дослідження. При дослідженні та подальшій консервації деревини на першому етапі визначається вологість деревини. Волога впливає на міцність, питому вагу та інші властивості деревини. Визначення вологості археологічної деревини потрібно, щоб вибрати способи її зберігання та підібрати, у разі необхідності, способи обробки та подальшої консервації.

⁴ Stamm, A. J. (1964). *Wood and Cellulose Science*. Ronald Press.

⁵ Grattan, D. W., Clarke, R. (1995). *Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworth-Heinemann.

⁶ І. Зоценко, І. Готун, В. Івакін (2020). Науковорядитвінні дослідження у с. Гатне. Археологічні дослідження в Україні 2019. Київ. С. 101–102.

Вологістю деревини називають ступінь насичення деревини водою, виражену у процентах по відношенню до маси сухої деревини:

$$W = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\%$$

де W – вологість деревини, %; m – маса зразка вологої деревини, г; m_0 – маса зразка абсолютної сухої деревини, г.

Такий метод вимірювання вологості деревини називається ваговим.

За ступенем вологості розрізняють деревину кімнатну суху – вологість 12...18 %, напівсуху – вологість 18...23 %, повітряно суху – вологість 15...20 %. Деревина вологістю більше 23 % називається сирію, а деревина, яка перебуває довгий час у воді – мокрою. Волога міститься у деревині у двох станах: зв'язаному і вільному.

Ще одним параметром при роботі з деревиною є всихання деревини – зменшення її розмірів і, відповідно, об'єму при висушуванні. Для вологої (або мокрої) археологічної деревини всихання не визначається, оскільки при висушуванні відбувається клітинний колапс і деревина руйнується.

Також визначалася густина деревини. Густина деревини – відношення маси зразка до його об'єму. Розрізняють густину абсолютно сухої деревини, густину вологої деревини, умовну густину, стандартну густину.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

де ρ – густина абсолютно сухої деревини, кг/м³; m – маса абсолютно сухої деревини, кг; V – об'єм зразка абсолютно сухої деревини, м³.

Густина абсолютно сухої деревини – відношення маси абсолютно сухого зразка до його об'єму. Густина вологої деревини – відношення маси зразка при даній вологості до його об'єму при цій же вологості.

Для археологічної деревини можна визначити лише густину вологої деревини. Густина сухої деревини не може бути визначена з тієї ж причини, що й неможливість визначення всихання.

Визначення елементного складу здійснювалося рентгенфлуоресцентним аналізом. Рентгенфлуоресцентний аналіз виконувався за допомогою портативного рентгенівського спектрометра ElvaX ProSpector3 (ТОВ «ЕЛВАТЕХ» [<https://elvatech.com/uk/>]). Цей прилад має можливість вимірювати концентрації елементів з оптимізацією для певних видів матеріалів. Зокрема: сплави металів, дорогоцінні метали, руди (грунти), скло, археологічні зразки. Прилад має можливість детектувати елементи з атомними номерами від $Z = 11$ (натрій) до 92 (уран). Прилад оснащений рентгенівською трубкою (максимальна прискорююча напруга до 50 кВ) з родієвим катодом, детектором типу fast SDD з термoeлектричним охолодженням. Роздільна здатність детектора менше





150 eВ при енергії рентгенівського випромінювання 5,9 кеВ. Прилад дає змогу визначати концентрації в «автоматичному режимі» з невизначеністю до 0,01 мас.%. При окремому аналізі отриманих спектрів можна знизити невизначеність до 0,001 мас.%.

Консервація деревини виконується за одностадійною методикою, яка передбачає консервацію однією маркою поліетиленгліколю. Підбір марки поліетиленгліколю залежить від ступеня деградації деревини. Консервація виконується за наступною схемою:

- очищення об'єкта від поверхневих забруднень;
- витримка об'єкта в дистильованій або глибокого очищення воді з метою видалення з деревини дрібнодисперсних частинок і водорозчинних речовин. Витримка об'єкта в воді проводиться до максимального вологонасичення деревини;
- занурення об'єкта в розчин ПЕГ з початковою концентрацією 1–5 % мас.;
- поетапне підвищення концентрації просочувального розчину;
- контроль за процесом просочення деревини на певному етапі консервації і перехід на наступний етап консервації визначається за вмістом ПЕГ у деревині;
- сушка об'єкта.

Результати. Підготовка зразку зводилася на першому етапі до очищення від крупних фракцій за допомогою щітки. Далі відбувалося миття зразка. Візуально відбувався пошук наявності залізних артефактів у деревині зразка з метою запобігання проблемі піриту. Після цього відбувалося вимірювання елементного складу поверхні зразка у вісімнадцяти точках. Це виконувалося з метою визначення елементного складу забруднень, а також у підозрілих місцях, де можливе знаходження залізних предметів чи включень.

Основними сполуками, виявленими на поверхні зразка, є оксиди кремнію, алюмінію, заліза, калію та кальцію. Концентрації основних сполук та наявність певних мінорних домішок є характерними для ґрунту. Це свідчить, що основним забруднювачем є ґрунт, у якому був зразок.

Після очищення була проведена оцінка деградації деревини. Деградація оцінювалася шляхом занурення сталеві голки як у повздовжньому, так і поперечному напрямках деревини. Тести показали, що голка проникає легко в матеріал деревини в обох напрямках. Це свідчить, що деревина зразка є сильнодеградована. Додатково були проведені дослідження структури деревини методом оптичної мікроскопії. Виконувався тонкий зріз деревини за допомогою ультрамікротома. Зріз поміщався на предметне скло і досліджувався в поляризованому світлі. Мікроскопічні дослідження показали, що структура клітинних стінок є розрихленою. Швидше за все, це свідчить про втрату лігніну, що теж є показником сильної деградації. Це також може говорити про зараження зразка біодеградантами.

На наступному етапі були визначені вологість та густина деревини. Зі зразка археологічної деревини була відрізана проба масою 43,173 г. Бюкс без проби був зважений з точністю до 0,001 г. Потім проба

поміщалася у бюкс і зважувалася з точністю до 0,001 г. Потім бюкс із пробєю поміщався у сушильну шафу СНОЛ, нагріту до температури $t = 103 \pm 2$ °С. Далі відбувався постійний контроль величини маси повторним зважуванням. Бюкс зважувався перший раз через 6 годин. Кожне наступне зважування проводилось через 2 години. Висушування вважалось закінченим, коли різниця між двома зважуваннями (останніми) не більша 0,002 г. При кожному зважуванні бюкси закривалися кришками і переносились в ексікатор для охолодження.

Вологість зразка у процентах з точністю до 0,1 % вираховувалась за формулою:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m} \times 100\%$$

де m – маса бюкси з кришкою, у г; m_1 – маса бюкси з кришкою до висушування, г; m_2 – маса бюкси із пробєю і кришкою після висушування, г.

Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Вологість археологічної деревини

	Маса деревини, г		Вологість, %
	до висушування	після висушування	
Археологічна деревина	43,173	23,371	84,73

Для визначення густини вологого зразка було виконане його зважування. Маса зразка становила 247 г. Об'єм зразка вимірювався методом занурення і він становив 167 см³. Отже, густина деревини становить 1,478 г/см³.

Після вищезгаданих досліджень, розпочалася процедура консервації. На першому етапі зразок був поміщений у дистильовану воду. Спочатку вода періодично фільтрувалася для запобігання зараження води біодеградантами, але виявилось, що для невеликих зразків більш економічно вигідною є повна заміна дистильованої води, а не фільтрування.

Для контролю процесу очищення вода, в яку був поміщений зразок, фільтрувалася паперовим фільтром і осад аналізувався. Аналізувалася також поверхня зразка. Результати показують, що після двох місяців перебування у дистильованій воді основними на поверхні зразка є легкі елементи – 98,5 % (елементи з атомним номером до 11). Із забруднювачів на поверхні основними залишилися оксид кремнію та оксид алюмінію, але дещо змінилися співвідношення їх концентрацій (збільшується вміст оксиду алюмінію). Основним в осаді є оксид кремнію. Концентрація оксиду алюмінію зменшилася.

Наступним етапом є просочування розчином поліетиленгліколю. Враховуючи вищезгадані дослідження, для консервації був обраний ПЕГ з молекулярною масою 1500, так як високомолекулярні ПЕГ гарно





стабілізують сильно зруйновану деревину. Для просочування була створена установка, схема якої наведена на *рис. 2*. Установка складається з кювети для просочування (4) та системи очищення розчину, що складається з насоса (1), механічного фільтру (3) та запірної арматури (2).

Зразок був поміщений у 5 % розчин ПЕГ і перебував у ньому протягом двох місяців. Розчин фільтрувався один раз на тиждень та знезаражувався кварцуванням – один раз на два тижні. Після двох місяців перебування у 5 % розчині ПЕГ густина зразка збільшилася до 2,758 г/см³, що свідчить про ефективне проникнення ПЕГ у структуру деревини. Також була проведена фотофіксація зразка. Зображення представлено на *рис. 3*. Відзначимо, що видимої зміни кольору зразка не відбулося.

На сьогодні розпочався третій етап консервації, коли зразок поміщено у розчин ПЕГ з концентрацією 10 %.

Ph. D., Head of Sector,
Institute of Applied Physics, NAS of Ukraine (Sumy, Ukraine).
Municipal Institution «Center for Conservation of Archaeological Objects», (Kyiv,
Ukraine), e-mail: alex.buhay@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6813-0413>

CONSERVATION OF A SAMPLE OF WATERLOGGED WOOD FROM THE LOG STRUCTURE OF AN ANCIENT RUS' WELL

ABSTRACT. *The article presents a demonstration and testing of a comprehensive approach to the conservation of archaeological waterlogged wood using polyethylene glycol (PEG). The research material is a fragment of an oak log structure dating to the 11th–13th centuries, discovered during excavations at the Ancient Rus' settlement of Hatne-2. Based on the assessment of the high degree of degradation of the sample—caused by the destruction of the cell structure and the probable loss of lignin—the decision was made to use polyethylene glycol with a molecular weight of 1500. Primary cleaning of the material and prolonged soaking in distilled water (with monitoring of the removal of soil contaminants) were conducted. At the second stage of conservation, impregnation with a 5% solution of PEG-1500 was applied. After two months in the 5% PEG solution, a significant increase in the wood density was recorded, indicating effective penetration of the consolidant into the degraded structure.*

KEYWORDS: *archaeological wood; conservation; polyethylene glycol; wood degradation; wood density and moisture.*

REFERENCES

1. Björdahl, B. (1979). *Conservation of Waterlogged Wood*. National Museum of Denmark.
2. Hoffmann, P. (1986). On the stabilization of waterlogged oakwood with polyethylene glycol (PEG). *Studies in Conservation*, 31(3), 103–113.
3. Grattan, D. W., Clarke, R. (1987). Conservation of waterlogged wood: A review of current research. *Studies in Conservation*, 32(2), 57–67.
4. Jensen, J. A. (1967). The preservation of wet archaeological wood using sugars. *Curator*, 10(3), 203–214.
5. Stamm, A. J. (1964). *Wood and Cellulose Science*. Ronald Press.
6. Grattan, D. W., Clarke, R. (1995). *Conservation of Marine Archaeological Objects*. Butterworth
7. Zotsenko I., Hotun I., Ivakin V. (2020) Naukovoriativni doslidzhennia u s. Hatne. *Arkheolohichni doslidzhennia v Ukraini 2019*. Kyiv. 101–102. [in Ukrainian]





Рис.1. Колодязь XI—XIII ст., виявлений під час розкопок на давньоруському поселенні Гатне-2.

32

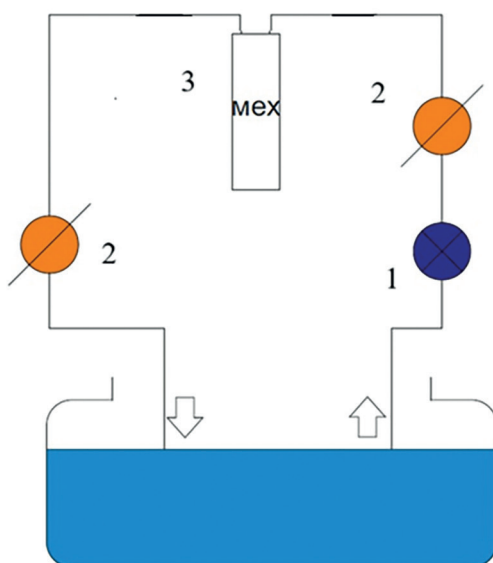


Рис.2. Схема установки для просочування.



Рис.3. Зображення зразка після просочування у 5 % розчині ПЕГ протягом 2 місяців.