

УДК 678.027.3;678.742.2;678.046.5

Д.С. Криволапов, К.М. Сухий, П.І. Баштаник, І.В. Суха, О.В. Савченко

ВПЛИВ ФОСФОГІПСУ НА ВЛАСТИВОСТІ ДЕРЕВИННО-ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Здійснено дослідження впливу фосфогіпсу на технологічні, експлуатаційні та фізико-механічні властивості композитів на основі вторинного поліетилену високої густини, наповненого деревинним борошном. Показано, що при заміщенні у композиті кальциту фосфогіпсом експлуатаційні, фізико-механічні та технологічні властивості матеріалу залишаються стабільними. Оскільки фосфогіпс є дешевим побічним продуктом виробництва екстракційної фосфорної кислоти, то використання його як наповнювача в деревинно-полімерних композитах дозволить знизити собівартість виробів з них.

Ключові слова: деревинно-полімерний композит, фосфогіпс, поліетилен високої густини, кальцит, фізико-механічні властивості.

DOI: 10.32434/0321-4095-2025-159-2-144-149

Вступ

Деревинно-полімерні композити (ДПК) стають поширеними матеріалами у різних галузях, наприклад, у будівництві (зовнішні терасні покриття, перила, огороження), автомобільної промисловості (спинки сидінь автомобілів), а також в інфраструктурі (настили) [1]. Це пов'язано з багатьма їх перевагами, такими як: можливістю вторинної переробки, низькими густиною, вартістю, експлуатаційними витратами, високими фізико-механічними властивостями та екологічністю [2].

У ДПК наповнювачем є деревинні відходи: тріска, тирса, стружка, волокна або, найчастіше, деревинне борошно. Завдяки унікальному поєднанню властивостей полімера та деревини, а також привабливого зовнішнього вигляду, ДПК стали цікавою альтернативою як полімерам, так і продукції деревообробної промисловості [3]. Їх головна перевага – використання для обробки тих же інструментів, що і для деревини [4]. Істотною перевагою ДПК є те, що вони, порівняно з дере-

виною, характеризуються значно меншим водопоглинанням та стійкістю до атмосферних факторів [5].

Слід зазначити, що використання відходів деревини як наповнювачів для ДПК дуже вигідне з екологічної точки зору. Вони не становлять небезпеки для навколишнього середовища в процесах експлуатації та переробки. Крім того, після певної модифікації деревинно-полімерні композити можуть стати біорозкладними [6].

Мінеральні наповнювачі, такі як: карбонат кальцію, тальк, кремнезем, дуже поширені в полімерній промисловості. Вони підвищують фізико-механічні властивості наповненого полімеру, збільшують його вогнестійкість [7]. Наповнювачі для ДПК можуть бути неорганічними, органічними, або змішаними. Типові неорганічні наповнювачі можуть бути простими солями зі стійкою хімічною структурою (кальцит, воластоніт), складними неорганічними матеріалами (тальк, каолін); або сполуками з невизначеним чи

© Д.С. Криволапов, К.М. Сухий, П.І. Баштаник, І.В. Суха, О.В. Савченко, 2025



This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

D.S. Kryvolapov, K.M. Sukhyy, P.I. Bashtanyk, I.V. Sukha, O.V. Savchenko

змінним складом (слюда, глина та зольний пил) [8].

В останні десятиліття актуальною є проблема впливу хімічних речовин на навколишнє середовище. Це визнано глобальною екологічною проблемою. Щоб подолати її, хімічна промисловість має розробити чистіші хімічні процеси або матеріали методом розробки інноваційних та екологічно безпечних хімічних реакцій [9]. Зелена хімія пропонує інструменти цього підходу. Важливою метою зеленої хімії є максимізація ефективності використання сировини та мінімізація утворення відходів [10].

На сьогодні залишається невирішеною задача переробки й утилізації низки хімічних відходів, зокрема й фосфогіпсу, який є побічним продуктом при виробництві екстракційної фосфорної кислоти [11]. Щорічні світові обсяги утворення фосфогіпсу становлять 120–130 млн тонн, а масова частка його утилізації за найоптимістичніми прогнозами не перевищує 10% [12]. Більшу частину утвореного фосфогіпсу, зберігають у відвалах, що споруджуються на суходолі, іноді з використанням відпрацьованих кар'єрів і рудників. У місцях складування фосфогіпсу утворилися відвали висотою до 15 м [13]. Враховуючи обсяги вже утвореного фосфогіпсу й такого, що утворюється, актуальною проблемою є не лише його видалення, транспортування та зберігання у відвалах, а і розроблення нових методів та можливостей його використання.

Метою роботи є дослідження впливу фосфогіпсу у якості наповнювача композиту на основі вторинного поліетилену високої густини та дубового борошна на технологічні, фізико-механічні і експлуатаційні властивості ДПК.

Методика експерименту

Як об'єкт дослідження у даній роботі був використаний композит на основі поліетилену високої густини із наступним складом [14]:

- вторинний поліетилен високої густини – 30 мас.%;
- деревинне борошно марки М 200 – 54 мас.%;
- кальцит – 11 мас.%;
- стеаринова кислота – 1,25 мас.%;
- поліетилен із вмістом 1–6% прищепленого малеїнового ангідриду – 0,85 мас.%;
- поліетиленовий віск (із температурою краплепадіння 105°C) – 1,1 мас.%;
- УФ стабілізатор та барвники – інше.

Для оцінювання впливу фосфогіпсу на властивості композиту проводили часткову заміну кальциту на фосфогіпс у таких пропорціях: зразок № 0 – кальцит 11 мас.%, фосфогіпс 0 мас.%;

зразок № 1 – кальцит 8,25 мас.%, фосфогіпс 2,75 мас.%; зразок № 2 – кальцит 5,5 мас.%, фосфогіпс 5,5 мас.%; зразок № 3 – кальцит 2,75 мас.%, фосфогіпс 8,25 мас.%; зразок № 4 – кальцит 0 мас.%, фосфогіпс 11 мас.%.

Використаний у даному дослідженні фосфогіпс походить із ЗАТ «Дніпровський завод мінеральних добрив» (м. Кам'янське) та має такий склад (у перерахунку на оксиди): CaO 30–36 мас.%; SO₃ 34–39 мас.%; P₂O₅ 1,3–3,0 мас.%; SiO₂ 2,3–10 мас.%; Fe₂O₃ 3,4–5,1 мас.%; H₂O_{крис} 19,4–19,6 мас.%; домішки – інше. Треба зазначити, що елементний склад фосфогіпсу із різних місць відвалу може відрізнитись за складом домішок і залежить від впливу на нього під час зберігання у відвалі природних факторів вивітрювання.

При виготовленні деревинно-полімерного композиційного матеріалу підготовлені, висушені та зважені компоненти завантажувались у лопатевий змішувач (sky win swehl 600/1200), де змішувались при обертах лопатей 800 об./хв до температури 100°C для гарантованого видалення залишкової вологи протягом 40–60 хвилин. Далі суміш подавалась у двошнековий гранулятор (sky win swmsz-3), де відбувалася гомогенізація композиційного матеріалу при температурі від 160 до 200°C та обертах шнеків 250–350 об./хв. Композиційний матеріал, отриманий у вигляді гранул, далі був перероблений методом екструзії у терасну дошку, з якої вирізалися зразки для досліджень.

Технологічні та експлуатаційні властивості зразків, а також їх механічні випробування, визначались за стандартними методиками досліджень та випробування пластмас. Визначення випадкової похибки прямих багаторазових випробувань, а також розрахунок взаємних регресивно-кореляційних функцій проводили відповідно до існуючих методик за допомогою пакета програм Microsoft Office Excel. Практична імовірність забезпечується величиною довірчого інтервалу отриманих значень, який складає 0,95.

Результати та обговорення

Очевидно, що при визначенні основних характеристик матеріалів для зовнішнього оздоблення вирішальне значення мають такі фізико-механічні властивості як: ударна в'язкість за Шарпі та міцність при вигині. Також ці властивості корелюють разом із гідрофільними властивостями деревинного борошна, які негативно впливають на показники механічної міцності.

Густина є важливим показником якості деревинно-полімерних композитів. На рис. 1

зображено залежність густини деревинно-полімерного композиту від вмісту фосфогіпсу. Аналізуючи ці дані, можна констатувати, що при збільшенні вмісту фосфогіпсу у композиті густина матеріалу не змінюється і становить 1235 кг/м^3 . Це пояснюється, по-перше, тим, що фосфогіпс має однакову, у порівнянні з кальцитом, густину, а по-друге, тим, що частки фосфогіпсу мають однаковий розмір, як і частки кальциту.

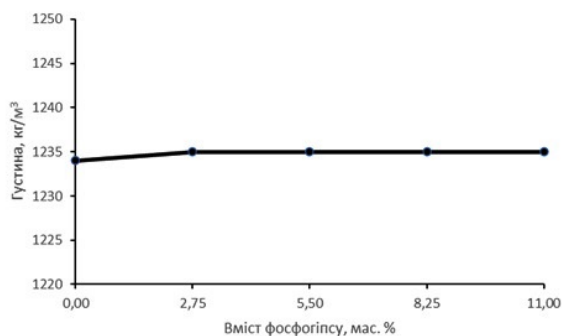


Рис. 1. Залежність густини деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Наскільки добре оздоблювальні матеріали для зовнішнього застосування витримують ударні та стаціонарні навантаження, можна визначити за допомогою таких характеристик їх фізико-механічних властивостей, як ударна в'язкість за Шарпі та міцність при вигині. Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) та міцності при вигині деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу зображено на рис. 2 і 3, відповідно. Аналізуючи дані рис. 2 і 3, можна стверджувати, що при заміщенні кальциту у композиті фосфогіпсом зміна ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) та міцності при вигині практично не відбувається і становить 12 кДж/м^2 та $51,2 \text{ МПа}$, відповідно. Незмінність ударної в'язкості за Шарпі та міцності при вигині вказує на достатній адгезійний зв'язок на межі розподілу фаз полімер-деревинне борошно.

Водопоглинання вказує на здатність матеріалу поглинати воду під впливом різних умов, таких як дощ, вологість повітря або занурення в воду. Цей показник може впливати на стійкість матеріалу до руйнування, деформації та зміни зовнішнього вигляду. Для багатьох застосувань важливо мати низький рівень водопоглинання, щоб забезпечити довговічність і стійкість матеріалу у різних умовах експлуатації. Залежність водопоглинання деревинно-полімерних композитів

від вмісту фосфогіпсу зображено на рис. 4. Видно, що при заміщенні кальциту фосфогіпсом у деревинно-полімерному композиті водопоглинання незначно збільшується, але це збільшення знаходиться у межах довірчого інтервалу вимірювань. Таку поведінку можна пояснити незмінною кількістю мікропор у масі композиції, про також свідчить незмінність густини композиту при заміщенні кальциту фосфогіпсом.

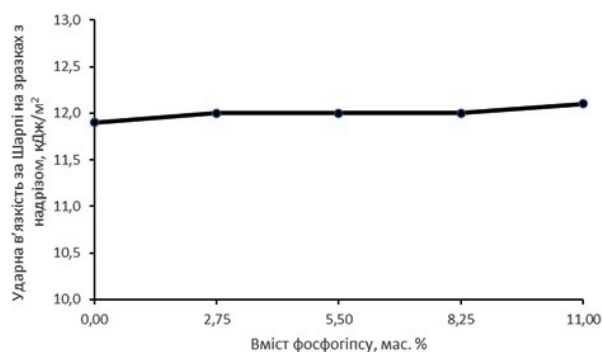


Рис. 2. Залежність ударної в'язкості за Шарпі (на зразках з надрізом) деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

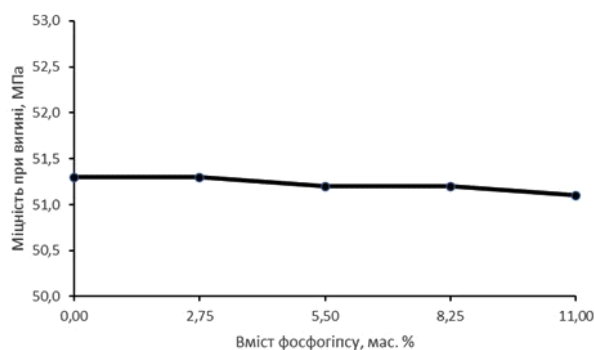


Рис. 3. Залежність міцності при вигині деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

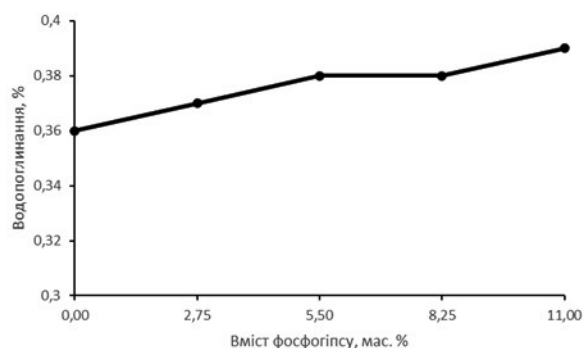


Рис. 4. Залежність водопоглинання деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

Коефіцієнт лінійного розширення-стиснення може бути важливим при проектуванні конструкцій і виробів, оскільки він вказує на те, наскільки матеріал буде вразливим до змін розмірів при зміні температури. У випадку деревинно-полімерних композитів, цей показник може бути важливим для оцінювання їх стійкості та властивостей в умовах зовнішньої експлуатації. На рис. 5 зображено залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу. Можна констатувати, що коефіцієнт лінійного термічного розширення композиту однаковий як при використанні у якості наповнювача кальциту, так і при наповненні фосфогіпсом.

Технологічна усадка — це явище, яке виникає під час виробництва матеріалів або виробів і пов'язане з їх зміною розмірів під впливом температури, вологості або інших факторів переробки. У разі деревинно-полімерних композитів технологічна усадка може відбуватися під час процесу формування та охолодження виробу. Усадка може впливати на точність розмірів виробу та його зовнішній вигляд. Залежність технологічної усадки деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу зображено на рис. 6. Видно, що заміщення кальциту фосфогіпсом у деревинно-полімерному композиті не впливає на технологічну усадку. Це також пояснюється однаковою густиною та розміром частинок кальциту та фосфогіпсу.

Висновки

За результатами здійснених досліджень з впливу фосфогіпсу на властивості деревинно-полімерного композиту на основі вторинного поліетилену високої густини встановлено:

— заміщення кальциту фосфогіпсом у деревинно-полімерних композитах не впливає на фізико-механічні, експлуатаційні та технологічні

властивості ДПК, що дає можливість використовувати дані композити для одержання виробів, які експлуатуються в умовах впливу зовнішніх факторів;

— оскільки фосфогіпс є побічним продуктом при виробництві екстракційної фосфорної кислоти, який в основній масі накопичується у відвалах, то використання його у якості наповнювача у деревинно-полімерних композитах дозволить знизити собівартість виробів. Використання фосфогіпсу позитивно вплине на екологію навколишнього середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ratanawilai T., Taneerat K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: effects on mechanical properties and resistance to natural weathering // *Constr. Build. Mater.* — 2018. — Vol.172. — P.349-357.
2. Tang J., Lu Q., Yuan J. Study on the properties of PP bamboo plastic composites toughened by white carbon black and mPE // *J. Mater. Sci. Eng.* — 2019. — No. 37. — P.86-90.
3. Gardner D.J., Han Y., Wang L. Wood-plastic composite technology // *Curr. Forestry Rep.* — 2015. — Vol.1. — P.139-150.
4. Kim J.K., Pal K. Recent advances in the processing of wood-plastic composites. — Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. — 176 p.
5. Yadav S.M., Yusoh K.B. Mechanical and physical properties of wood-plastic composites made of polypropylene, wood flour and nanoclay // *Int. J. Agric. Forestry Plant.* — 2015. — Vol.1. — P.52-58.
6. Zini E., Scandola M. Green composites: an overview // *Polym. Compos.* — 2011. — Vol.32. — No. 12. — P.1905-1915.
7. Frolova L., Sukhyi K. Investigation of photocatalytic activity of NiFe_2O_4 in the oxidation reaction of 4-nitrophenol // *Mol. Cryst. Liq. Cryst.* — 2021. — Vol.720. — No. 1. — P.97-104.

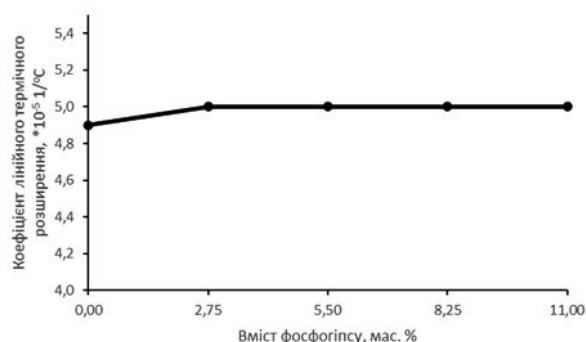


Рис. 5. Залежність коефіцієнта лінійного термічного розширення деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

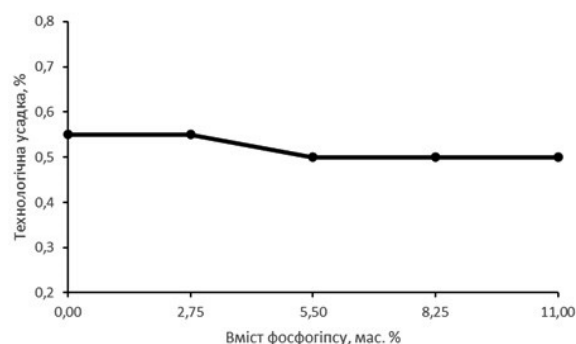


Рис. 6. Залежність технологічної усадки деревинно-полімерних композитів від вмісту фосфогіпсу

8. *Performance* of an adsorptive heat-moisture regenerator based on silica gel-sodium sulphate / Belyanovskaya E., Rimar M., Lytovchenko R.D., Variny M., Sukhyi K., Yeromin O., Sykhyi M., Prokopenko E., Sukha I., Gubinskiy M.V., Kizek J. // *Sustainability*. – 2020. – Vol.12. – No. 14. – Art. No. 5611.

9. Ashori A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! // *Bioresour. Technol.* – 2008. – Vol.99. – No. 11. – P.4661-4667.

10. Anastas P., Eghbali N. Green chemistry: principles and practice // *Chem. Soc. Rev.* – 2010. – Vol.39. – P.301-312.

11. *Mathematical* model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion / Rimar M., Kulikov A., Fedak M., Yeromin O., Sukhyi K., Gupalo O., Belyanovskaya E., Berta R., Smajda M., Ratnayake M.R. // *Processes*. – 2020. – Vol.8. – No. 4. – Art. No. 469.

12. Sukhyi K.M., Belyanovskaya E.A., Sukhyi M.P. Technology development for adsorptive heat energy converters: emerging research and opportunities. – IGI Global, 2021. – 305 p.

13. *Influence* of fly ash on the properties of wood-polymer composites / Kryvolapov D.S., Sukhyi K.M., Bashtanyk P.I., Tretyakov A.O., Bezrukavyy V.A. // *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. – 2024. – No. 3. – P.83-88.

14. Вплив стеаринової кислоти на властивості деревинно-полімерних композитів / Криволапов Д.С., Сухий К.М., Баштанник П.І., Третяков А.О., Безрукавий В.О. // *Питання хімії та хім. технол.* – 2023. – № 5. – С.50-54.

15. *Dynamic* mechanical properties of epoxy composites modified with polysulphide rubber / Sukhyi K., Belyanovskaya E., Nosova A., Sukha I., Sukhyi M., Huang Yu., Kochergin Yu., Hryhorenko T. // *Chem. Chem. Technol.* – 2022. – Vol.16. – No. 3. – P.432-439.

Надійшла до редакції 06.11.2024

INFLUENCE OF PHOSPHOGYPSUM ON THE PROPERTIES OF WOOD-POLYMER COMPOSITES

D.S. Kryvolapov *, K.M. Sukhyi, P.I. Bashtanyk, I.V. Sukha, O.V. Savchenko

Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine

* e-mail: dmipro706@gmail.com

The influence of phosphogypsum on the technological, operational, and physical and mechanical properties of composites based on recycled high-density polyethylene filled with wood flour was studied. It was shown that when calcite is replaced by phosphogypsum in the composite, the operational, physical, mechanical, and technological properties of the material remain stable. Since phosphogypsum is a cheap by-product of the production of extraction phosphoric acid, its use as a filler in wood-polymer composites will reduce the cost of products made from them.

Keywords: wood-polymer composite; phosphogypsum; high-density polyethylene; calcite; physical and mechanical properties.

REFERENCES

1. Ratanawilai T, Taneerat K. Alternative polymeric matrices for wood-plastic composites: effects on mechanical properties and resistance to natural weathering. *Constr Build Mater*. 2018; 172: 349-357. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.266.

2. Tang J, Lu Q, Yuan J. Study on the properties of PP bamboo plastic composites toughened by white carbon black and mPE. *J Mater Sci Eng*. 2019; (37): 86-90.

3. Gardner DJ, Han Y, Wang L. Wood-plastic composite technology. *Curr Forestry Rep*. 2015; 1: 139-150. doi: 10.1007/s40725-015-0016-6.

4. Kim JK, Pal K. *Recent advances in the processing of wood-plastic composites*. Heidelberg: Springer; 2010. 176 p. doi: 10.1007/978-3-642-14877-4.

5. Yadav SM, Yusoh KB. Mechanical and physical properties of wood-plastic composites made of polypropylene, wood flour and nanoclay. *Int J Agric Forestry Plant*. 2015; 1: 52-58.

6. Zini E, Scandola M. Green composites: an overview. *Polym Compos*. 2011; 32: 1905-1915. doi: 10.1002/pc.21224.

7. Frolova L, Sukhyi K. Investigation of photocatalytic activity of NiFe₂O₄ in the oxidation reaction of 4-nitrophenol. *Mol Cryst Liq Cryst*. 2021; 720: 97-104. doi: 10.1080/15421406.2021.1905287.

8. Belyanovskaya E, Rimar M, Lytovchenko RD, Variny M, Sukhyi K, Yeromin O, et al. Performance of an adsorptive heat-moisture regenerator based on silica gel-sodium sulphate. *Sustainability*. 2020; 12: 5611. doi: 10.3390/su12145611.

9. Ashori A. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresour Technol*. 2008; 99: 4661-4667. doi: 10.1016/j.biortech.2007.09.043.

10. Anastas P, Eghbali N. Green chemistry: principles and practice. *Chem Soc Rev*. 2010; 39: 301-312. doi: 10.1039/B918763B.

11. Rimar M, Kulikov A, Fedak M, Yeromin O, Sukhyy K, Gupalo O, et al. Mathematical model of a heating furnace implemented with volumetric fuel combustion. *Processes*. 2020; 8: 469. doi: 10.3390/pr8040469.

12. Sukhyy KM, Belyanovskaya EA, Sukhyy MP. *Technology development for adsorptive heat energy converters: emerging research and opportunities*. IGI Global; 2021. 305 p. doi: 10.4018/978-1-7998-4432-7.

13. Kryvolapov DS, Sukhyy KM, Bashtanyk PI, Tretyakov AO, Bezrukavy VA. Influence of fly ash on the properties of wood-polymer composites. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024; (3): 83-88. doi: 10.32434/0321-4095-2024-154-3-83-88.

14. Kryvolapov DS, Sukhyy KM, Bashtanyk PI, Tretyakov AO, Bezrukavy VA. Influence of stearic acid on the properties of wood-polymer composites. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2023; (5): 50-54. doi: 10.32434/0321-4095-2023-150-5-50-54.

15. Sukhyy KM, Belyanovskaya EA, Nosova A, Sukha I, Sukhyy MP, Huang Y, et al. Dynamic mechanical properties of epoxy composites modified with polysulphide rubber. *Chem Chem Technol*. 2022; 16(3): 432-439. doi: 10.23939/chcht16.03.432.