

ІНСЕКТИЦИДНА ДІЯ ФУМІГАНТІВ ПРИ ЗНЕЗАРАЖЕННІ ДЕРЕВИНИ ТА ВИРОБІВ З НЕЇ

РОМАНКО В. О. – кандидат сільськогосподарських наук

orcid.org/0000-0002-5263-4190

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»

ЖУРАВЧАК Т. М. – провідний фахівець

orcid.org/0009-0009-5027-7263

Державна установа «Закарпатська фітосанітарна випробувальна лабораторія Держпродспоживслужби»

ДУДИНСЬКА А. Т. – кандидат біологічних наук, доцент

orcid.org/0000-0001-7461-0512

Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»

Постановка проблеми. В Україні, як і в інших країнах, обмеження по застосуванню бромистого метилу, які виконуються відповідно рішенням Четвертої конференції Монреальського Протоколу, відчутно впливають на карантинні заходи та фумігації, де в основному використовувався бромистий метил [1].

Така ситуація спонукала дослідників багатьох країн до проведення досліджень по використанню замість бромистого метилу інших відомих фумігантів та їх сумішей. Серед препаратів, які розглядають в якості альтернативних бромметилу, більшістю дослідників та спеціалістів на перший план виносяться препарати на основі фосфіну та фтористого сульфурилу.

Фосфін, або фосфористий водень (PH_3) – безбарвний газ, у який вводиться газ-аналізатор з неприємним запахом, за рахунок чого є більш безпечнішим, ніж бромметил. Проте цей фумігант має ряд недоліків. Перш за все це стосується у необхідності тривалих експозицій, що пов'язано з повільним випаровуванням препарату із твердої форми, вибухонебезпечністю, наявністю «наркотичного ефекту» та резистентністю у комах [2, 3, 4].

Фтористий сульфурил (SO_2F_2) це безбарвний газ, без запаху. Позитивні ознаки: невибухонебезпечний; не корозійний, не реагуючий з металами, токсичний на постембріональних стадіях розвитку комах. Небажані ознаки: без запаху, необхідність у застосуванні більших доз, слабо діє на яйцеву стадію комах [5, 6, 7]. Фтористий сульфурил широко застосовується, як ефективний фумігант проти термітів. Цей газ має добру проникаючу дію. Фізико-хімічні особливості дають змогу ототожнювати його з бромметилом. Він результативний проти постембріональних стадій комах та кліщів [8, 9].

Слід зазначити, що зростання міжнародної торгівлі деревиною та виробами з неї (у тому числі дерев'яним пакувальним матеріалом) збільшує небезпеку проникнення карантинних організмів в Україну. В той же час торгові партнери України мають суворі вимоги щодо попередження потрапляння на їх територію карантинних шкідливих організмів та застосування для цього відповідних заходів. А використання бромистого метилу зв'язане з відчутними труднощами не лише через жорсткі обмеження застосування цього фуміганту, а й припинення його виробництва на території України. Очевидно, що в таких умовах пошук та випробування

альтернативних фумігантів набуває особливої актуальності. Але передумовою цього є необхідність проведення низки досліджень з визначення можливості застосування різних фумігантів та їх сумішей, вивчення їх токсикологічних властивостей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх публікацій по даній проблематиці показав, що дослідження проводять в таких напрямках – вивчення токсичної дії препаратів, які є альтернативні хімічному знезараженню; визначення ефективності термообробок проти шкідників; збільшення асортименту фумігантів та їх препаративних форм, по знезараженню рослинної продукції, оскільки повністю замінити хімічні препарати, зокрема в карантинному знезараженні, в найближчому майбутньому буде достатньо важко.

Серед альтернатив хімічному знезараженню слід відзначити інертні порошки цеоліту та каоліну, які володіють акарицидною та інсектицидною дією. Так, Boukouvala Maria, та ін. (2025) доводять, що акарицидну ефективність двох інертних порошоків типу діатоміт, досліджували проти різних стадій розвитку *Acarus siro* та *T. putrescentiae* на пшениці при двох варіантах доз. Обидва препарати продемонстрували залежність ефективності від дозування та експозиції проти кліщів на всіх стадіях розвитку. Крім того, преімагінальні стадії (німфи) обох видів були більш чутливими до препаратів, ніж дорослі особини. Загалом ефективність варіювалась в межах 84,4–97,0 % залежно від препаратів та стадії шкідників [10].

По хімічному знезараженню заслуговують на увагу низка наукових праць. Так, Md. Mahbub Hasan, та ін. (2019) доводять, що личинки шкідника *Necrobia rufipes* були найбільш стійкими при обробці фосфіном або бромистим метилом протягом 48 годин при температурі 23 °C. Яйця *T. putrescentiae* також були більш стійкими до обох фумігантів, порівняно з рухомими стадіями кліщів [11].

N. Subekti та M. A. Syahadan (2021) при порівнянні токсичної дії альтернативних бромистому метилу фумігантів проти шкідників запасів таких як *Alphitobius diaperinus* та *Tribolium castaneum*, спостерігали різницю ефективності газів. Вищий рівень загибелі відзначали у шкідників за фумігації з використанням SO_2F_2 при експозиції 24 години, ніж при дії PH_3 [12].

Md. Mahbub Hasan, та ін. (2021) визначали ефективність фтористого сульфурилу проти двох основних членистоногих-шкідників в'яленої шинки: *N. rufipes* та *T. putrescentiae*. Дія фтористого сульфурилу викликала значну загибель комах-шкідників, але не на кліщів при обробці протягом 48 годин за температури 23 °С. Дослідження також показали, що яйця *T. putrescentiae* були в кілька разів стійкішими, ніж рухомі стадії кліщів [13].

Cottrell Ted E., та ін. (2020) доводять, що фумігація пеканів фтористим сульфурилом проти личинок *Curculio caryae* здатна забезпечувати високу її ефективність проти шкідника та підтримувати дотримання карантинних правил як у Сполучених Штатах, так і за їх межами [14].

Не зважаючи на те, що карантинну фумігацію дерев'яного пакувального матеріалу, як правило, здійснюють бромистим метилом та термічною обробкою, водночас, активно проводяться дослідження щодо вивчення токсичної дії проти шкідників деревини і іншими фумігантами, такими як фосфін, фтористий сульфурил та ін., що обумовлено рядом причин. Зокрема Shuai Cao, та ін. (2022) вважають, що термічна обробка є однією з основних технологій на ринку та широкими перспективами у функціональній технології деревини. Однак, існують деякі проблеми в термічній обробці, такі як зниження механічних властивостей, зволоженості поверхні деревини та високе споживання енергії під час виробництва [15].

Hnatek Jonas, та ін. (2021) досліджували інсектицидну етандинітрилу дію проти короїда *Ips typographus*. Початкові польові випробування з фумігації деревини показали необхідність проведення знезараження під брезентами, а також з використанням нижньої ізоляції, що потребує застосування додаткових робіт [16].

Щодо результатів токсичної дії фосфіну та фтористого сульфурилу, існує ряд робіт, які дещо протирічать ефективності газів.

Так, Hall Matthew K. D., та ін. (2025) провели детальний аналіз щодо токсичної дії фосфіну проти шкідників деревини. На їх думку, не зважаючи на те, що фосфін виявився ефективний проти деяких шкідників деревини, він зазвичай не відповідає стандартам карантинної обробки та є неефективним проти фітонематод та збудників грибкових захворювань [17].

В той же час Donghun Cho та Min-Goo Park (2025) знезаражували бромистим метилом відповідно до корейських рекомендацій щодо фітосанітарної дезінфекції, які призначені для деревини, а не для деревних пелет. Фумігація цим фумігантом призвела до низької його ефективності проти шкідників через високу адсорбцію. Водночас знезараження сумішами газів фосфіну та бромистого метилу продемонстрували синергетичний ефект проти шкідників [18].

Rajendran Somiahnadar, та V. L. Kumar (2008) зазначають, що пакувальні матеріали з твердої деревини – основне джерело транспортування, ввезення та поширення карантинних шкідників, що пошкоджують деревину, наразі або обробляються термічною обробкою, або фумігуються бромистим метилом відповідно

до Міжнародних стандартів фітосанітарних заходів (МСФЗ) № 15. Однак, з огляду на глобальний перехід до поступової відмови від бромистого метилу, основна увага приділяється альтернативним фумігантам для боротьби зі шкідниками. Фтористий сульфурил у дозі 40 г/м³ з експозицією 24 години та фосфін у дозі 2 г/м³ протягом 96 годин виявилися ефективними для обробки дерев'яних піддонів від *Lyctus africanus* (Lyctidae) та *Sinoxylon* sp. (Bostrichidae), а *Dinoderus ocellaris* (Bostrichidae) [19].

Huanwen Chen та ін. (2025) досліджували токсичну дію фумігантів при обробці хвойних проти *Hylurgus ligniperda*. Яйця цього шкідника були найбільш стійкими до фумігації. Автори доводять, що незважаючи на те, що фтористий сульфурил виявився ефективнішим, проте фосфід алюмінію забезпечував глибше проникнення в деревину [20].

So-Yeon Kim, та ін. (2024) наводять дослідження щодо токсичної дії фтористого сульфурилу проти термітів, які є в зоні високого ризику потрапляння разом із деревинною, імпортованій до Республіки Корея. Показники летальних норм ЛН₅₀ та ЛН₉₉ для фтористого сульфурилу проти *Reticuliterme speratus* були не значними, що свідчить про високу ефективність фуміганту [21].

Naoyang Yang, та ін. (2025) досліджували токсичну дію фумігантів проти соснової нематоїди *Bursaphelenchus xylophilus*, яка становить значну глобальну загрозу для соснових лісів. Дослідники визначали синергізм газів, де найоптимальніша ефективність спостерігалася при співвідношеннях 1:9 для фосфіну та бромметилу, 1:9 для фтористого сульфурилу та бромметилу та 3:7 для метилізотіоціанату та бромметилу [22].

Stoyanova Antoaneta, та ін. (2019) вивчали оцінку ризиків при фумігації деревини з застосуванням вимог ISO 9001:2015. На думку дослідників існує значний ризик неконтрольованих заходів боротьби зі шкідниками в процесі фумігації. Результати підтверджують, що система управління якістю на основі стандарту ISO 9001:2015 має практичне застосування в аналізі ризиків процесу фумігації деревини [23].

Vicent Antonio, та ін. (2025) у статті наводять, що Європейська комісія звернулася до групи експертів з питань здоров'я рослин EFSA з проханням провести оцінку ризику щодо ймовірності відсутності регульованих карантинних шкідників ЄС, з акцентом на *Bursaphelenchus xylophilus* та її переносників *Monochamus* spp. з хвойної деревини, знезараженої фтористим сульфурилом як запропоновано Сполученими Штатами (США) та як зазначено в ISPM 28-PT23 щодо фумігації цим фумігантом для нематод та комах в очищеній деревині. Незважаючи на те, що в експертній оцінці зазначено високу ефективність фтористого сульфурилу (параметри фумігації: ДКЧ 3000 г-гр., мінімальна концентрація 29 г/м³, температури не менше 20 °С та 48-годинної експозиції окореної деревини до 20 см діаметром), але також зазначено, що обробка цим фумігантом, як правило, менш ефективна для знищення збудників грибкових захворювань, ніж комах та фітонематод [24].

З вище наведених літературних даних видно, що існує ряд розбіжностей щодо ефективності замінників бромистому метилу і потребують додаткового їх вивчення.

Мета: токсична дія фосфіну та фтористого сульфурину проти шкідників деревини та виробів з неї.

Матеріали і методи досліджень. Роботу проводили в Закарпатському територіальному центрі карантину рослин Інституту захисту рослин НААН України в 2006–2007 роках. Продовжували дослідження в інституті електронної фізики Національної академії наук України в 2023–2024 роках.

Досліди проводили в лабораторних умовах у фумігаційних камерах (ємністю 30 літрів) (рис. 1). Матеріалом досліджень були: різні препаративні форми фосфіну, в тому числі тверда (таблетки фосфіду магнію), фтористий сульфурил та деревина заселена шкідниками.

Об'єкти досліджень: комахи родів *Cetonia*, *Rhagium*, *Ips*, *Monochamus*. Зразки відбирали в природних умовах в лісових масивах Ужгородського району Закарпатської області у хвойних та мішаних лісах, а також на складах лісо- і пиломатеріалів та деревообробних підприємств Закарпаття. Зразки відбирали з окореної та неокореної

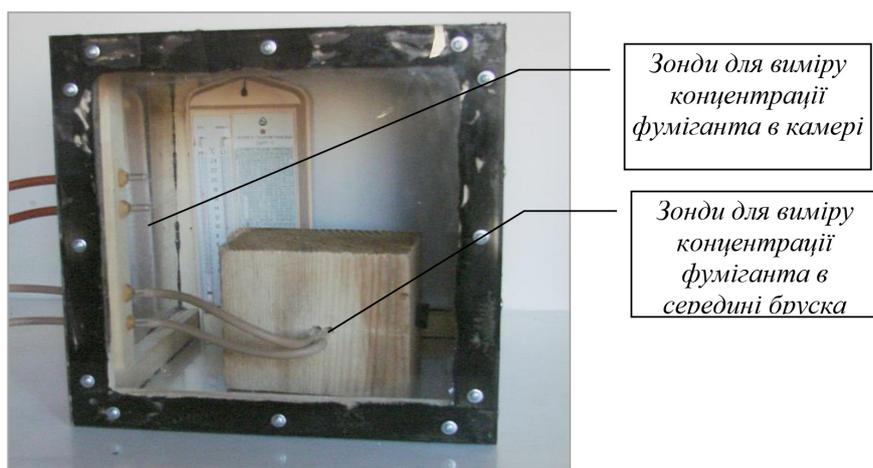


Рис. 1. Визначення концентрації всередині бруска деревини, розташованого у фумкамері з фосфіном

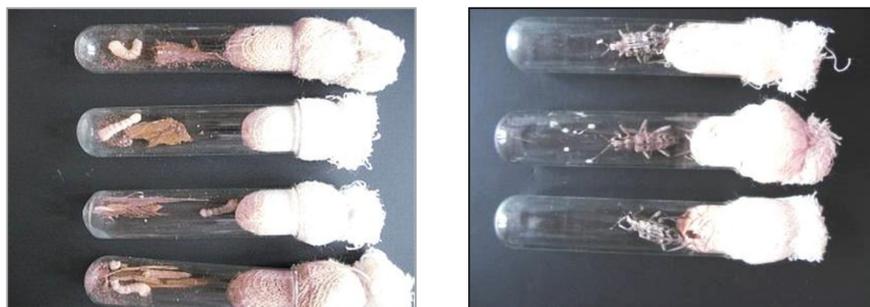


Рис. 2. Пробірки з комахами-шкідниками деревини, підготовленими для фумігації та проведення послідовних обліків загибелі

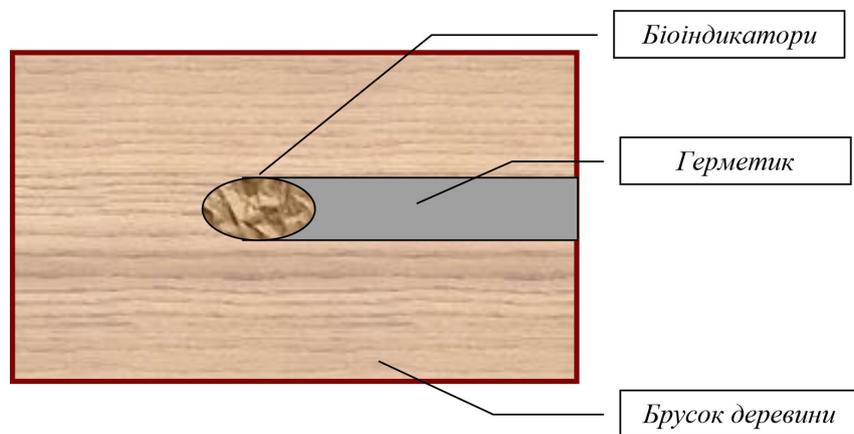


Рис. 3. Розміщення біоіндикаторів в середині деревини

деревини із заселеними її шкідниками на різних стадіях розвитку, крім ембріональної.

Для фумігації шкідників або біоіндикаторів поміщали у фумкамери у два способи: у газопроникні садки або пробірки з газопроникними корками (рис. 2), а також в середину попередньо просвердленої деревини (рис. 3).

Повторність в дослідах – трикратна (30–50 особин в одній повторності), аналогічно і в контролі. Загибель визначали з поправкою на контроль за формулою Аббота. На період проведення обліків після проведення фумігації комахи були забезпечені кормом та зберігалися в однакових умовах. Обліки проводились через 4 години після закінчення експозиції, потім щодобово протягом 3 діб. В деяких варіантах, за необхідності, спостереження проводили до 17-ї доби.

Під час обліку комахи, що знаходилися на стадіях розвитку (личинки) вважалися загиблими при втраті тургору, висиханні, почорнінні покривів тіла від дії процесів розкладу. Імаго визначались як загиблі при повній відсутності руху та живлення, відсутності реакції на обережне механічне подразнення. Спостереження за загибеллю короїдів проводили під збільшенням для більш достовірних результатів [25].

Концентрацію фосфіну вимірювали газоаналізатором *PhD-Lite*. Сенсор фосфіну, встановлений на приладі *PhD Lite*, дозволяв вимірювати концентрації газу в повітрі від 0,1 до 20 ppm. Для виміру високих концентрацій використовували установку, яка вимірювала концентрацій фосфіну в широкому діапазоні значень, починаючи від 0,1 до 3000 ppm і вище. Температури в дослідах знаходились в інтервалі 19–20 °C [26].

При вивченні токсичної дії фосфіну та фтористого сульфурилу проти шкідників за основний показник, від якого при певній температурі залежала ефективність фуміганту, було прийнято ДКЧ, який виражали у годинах-грамах [27, 28].

Статистичну обробку даних було проведено за допомогою комп'ютерних математичних функцій, що вбудовані в програму Microsoft Excel 2003.

Результати досліджень. Враховуючи те, що газоаналізатор *PhD-Lite* дозволяв вимірювати концентрації газу в повітрі лише від 0,1 до 20 ppm, додатково був розроблений пристрій для вимірювання значно вищих концентрацій фосфіну, а також дозуванні фтористого сульфурилу. Принцип дії пристрою полягав в розбавленні повітрям певної кількості газоповітряної проби з концентрацією фосфіну, яка завідомо перевищувала 20 ppm, в певну кількість разів – від 2-х до 200, відповідно у стільки ж разів зменшуючи концентрацію газу. Отримана таким чином газоповітряна суміш містила від 0,1 до 20 ppm фосфіну. Такі концентрації визначали за допомогою газоаналізатора з високою точністю. Далі отримані дані вносили в програму Excel, яка автоматично вже проводила перерахунок з ppm у g/m^3 , враховуючи при цьому ступінь розбавлення і об'єм проби [26].

При використанні таблеток фосфіду магнію для більш рівномірного виділення газу також підготували спосіб (метод), який полягав в тому, що таблетки «Магтоксину» або їх частки закладали в скляний або металевий посуд,

який щільно закривали тонкою (0,05 мм) алюмінієвою фольгою в один шар (рис. 4).

Фольга виявилася напівпроникною для фосфіну і тим самим гальмувала реакцію утворення газу, затримуючи проникнення вологи в посуд і вихід фуміганту. Застосування цього процесу водночас дозволяло запобігти небажаних стрибків концентрації та забезпечити її відносно постійний рівень протягом тривалого часу. Це важливо в дослідах з тривалою експозицією, оскільки мінімізуються похибки у визначенні середньої концентрації, так як виключаються значні її зміни у ті періоди, коли виміри не проводяться.

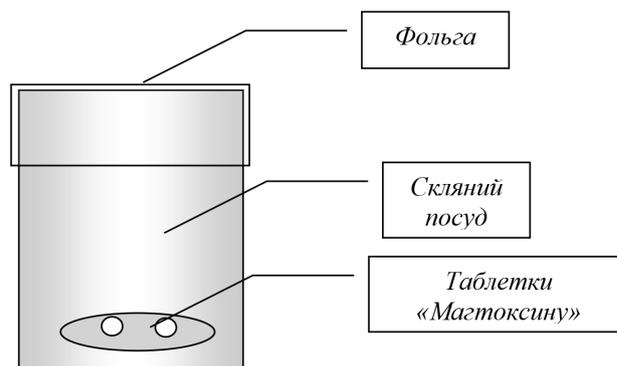


Рис. 4. Процес гальмування та стабілізації швидкості виділення фосфіну з таблеток

Як видно з рисунку 5, випаровування фосфіну з таблеток із застосуванням даного способу відбувалося поступово, концентрація утримувалася тривалий час на відносно постійному рівні, тоді як при звичайних умовах відмічали стрибкоподібність концентрації, значення якої упродовж періоду виділення з таблеток відрізнялися у кілька разів, а це негативно впливало на ефективність фумігації.

Слід зазначити, що при проведенні досліджень важливою умовою було встановлення показника загибелі комах в межах 90–99 %, що в подальшому давало можливість більш точно визначити показник летальної норми за мінімально ефективних концентрацій та експозицій фуміганту. Тому у разі встановлення 100 % загибелі комах проводили подальші дослідження у напрямку зниження токсичного навантаження на шкідників до встановлення 90–99 % показника їх загибелі. І навпаки, підвищували токсичну дію фумігантів, якщо була необхідність у отриманні 100 % загибелі.

З рисунку 6 видно, що на загибель личинок суттєво впливала тривалість експозиції, ніж концентрація. Короткі експозиції – 5, 6 і навіть 26 годин виявилися малоефективними (загибель на третій день після фумігації дорівнювала нулю). Слід також відмітити, що спостерігали підвищення ефективності при застосуванні способу для гальмування виділення і стабілізації концентрації фосфіну протягом тривалого часу. Так, наприклад, при порівнянні фумігацій за параметрами експозицій 48 годин і значенні ДКЧ 90,73 г-гр., а також із способом стабілізації виділення фосфіну ДКЧ 27,55 г-гр., не дивлячись на суттєво меншу величину ДКЧ, ефективність газу виявилася вищою – 33,3

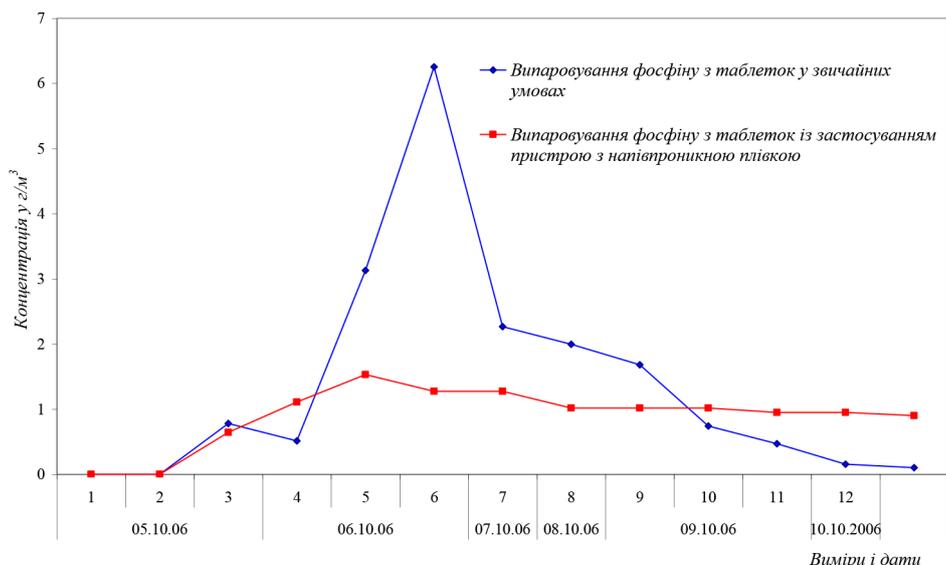


Рис. 5. Динаміка випаровування фосфіну з таблеток «Магтоксину» в звичайних умовах та з використанням пристрою для стабілізації концентрації фуміганту

і 60,0 % відповідно. З вищенаведеного дослідження видно, що на ефективність цього фуміганту впливає не тільки тривалість експозиції, однак рівномірні і нестрибокподібні концентрації газу фосфіну (рис. 6).

Також, слід відмітити, що личинки роду *Cetonia*, виявилися більш стійкими до фосфіну порівняно з личинками родів *Rhagium*, *Monochamus* (молодші віки). Так, за однакових параметрів фумігації (ДКЧ 27,55 г-гр. та експозиції 48 год), спостерігали різницю у 40 % загинелі комах.

Як видно з рисунку 7, на відміну від фосфіну, ефективність фтористого сульфурилу виявилася як при коротких (7 годин), так і при тривалих експозиціях, і залежала в основному від величини значення ДКЧ. Личинки роду

Cetonia, як і в разі фосфіном, виявилися більш стійкими і до фтористого сульфурилу, ніж інші досліджувані шкідники деревини. Так, при значенні ДКЧ 95,35 г-гр. загинель їх складала 38 %, в той час, як при 62,28 г-гр. загинель личинок родів *Rhagium* і *Monochamus* була значно вищою – 82,67 %.

При дослідженні токсичної дії фумігантів проти короїдів засвідчили, що фосфін виявився більш ефективним при тривалих фумігаціях – 48–72 годинах, ніж при коротких (24 годинах). Так, фумігація фосфіном за ДКЧ 42,79 г-гр., середньої концентрації газу в 1,78 г/м³ та 24 годинній експозиції забезпечувала лише 57,78 % загинель короїдів на стадії лялечки. Підвищення тривалості експозиції фосфіном до 48 годин за однакових

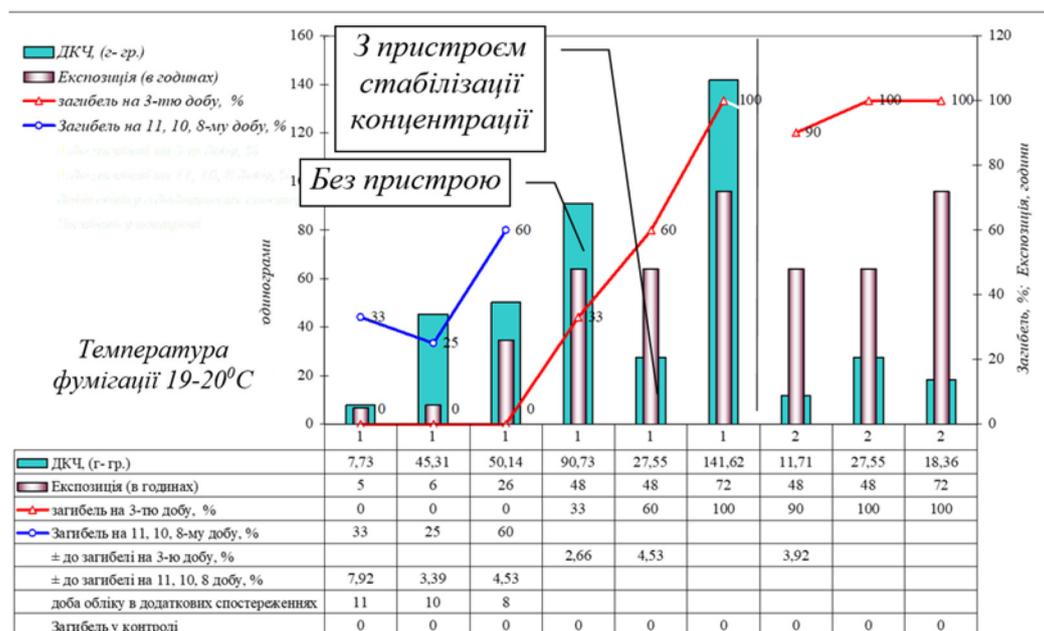


Рис. 6. Результати лабораторних фумігацій фосфіном проти личинок комах – шкідників деревини
Примітки: 1 – личинки роду *Cetonia*; 2 – личинки родів: *Rhagium*, *Monochamus* (молодші віки)

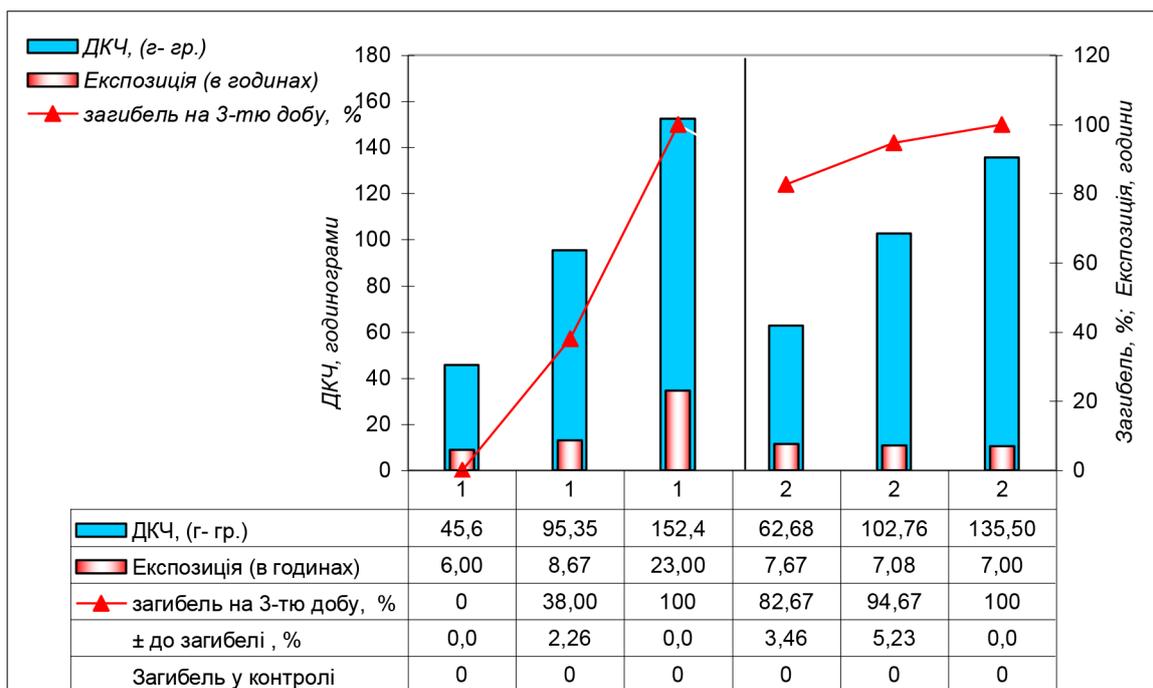


Рис. 7. Фумігація проти личинок шкідників деревини фтористим сульфуримом

Примітки: 1 – личинки роду Cetonia; 2 – личинки родів: Rhagium, Monochamus (молодші віки)

ДКЧ (42,80 г-гр.) викликало загибель лялечок короїдів на рівні 85,56 %. Подібну тенденцію токсичної дії фосфіну спостерігали і на імаго роду Ips, проте, порівняно з лялечками, дорослі особини виявилися менш стійкими до фуміганту. Так, фумігація фосфіном за ДКЧ 42,84 г-гр., середньої концентрації газу в 1,79 г/м³ та 24 годинній експозиції забезпечувала лише 84,09 % загибель короїдів на стадії імаго. Підвищення тривалості експозиції фосфіном до 48 годин за однакових ДКЧ

42,80 г-гр. викликало загибель жуків на рівні 95,35 % (табл. 1).

В разі однакової тривалості експозиції ефективність залежала від величини значень ДКЧ (при експозиції 48 годин і ДКЧ – 42,8 і 64,13 г-гр. загибель імаго склала 95,35 і 100 % відповідно).

Температура, при якій відбувалася фумігація, теж впливала на ефективність фосфіну. Так, за температури 19 та 20 °С (інші параметри знезараження фосфіном

Таблиця 1

Результати лабораторних фумігацій короїдів фосфіном і фтористим сульфуримом

Об'єкт: короїди на стадії	фуміганти	Температура, (°С)	Експозиція (в год.)	Концентрація (в г/м³)	ДКЧ, (г- гр.)	Дослід	
						загибель на 3-тю добу, %	± до загибелі на 3-ю добу, %
імаго*	PH ₃	20	72 год.	0,21	15,10	100,00	0,00
імаго		20	48 год.	0,90	42,87	97,62	1,92
імаго		20	24 год.	1,79	42,84	88,10	3,85
Імаго, лялечки		19	48 год.	1,89	90,73	100,00	0,00
імаго		19	48 год.	1,34	64,13	100,00	0,00
імаго		19	48 год.	0,89	42,80	95,35	3,85
імаго		19	24 год.	1,79	42,84	84,09	8,39
лялечки		19	48 год.	0,89	42,80	85,56	2,18
лялечки		19	24 год.	1,78	42,79	57,78	5,09
імаго	SO ₂ F ₂	20	23 год.	6,63	152,40	100,00	0,00
імаго		20	8 год. 40 хв.	9,68	83,88	100,00	0,00
імаго		20	7 год. 40 хв.	5,66	43,36	75,56	3,85
імаго		19	9 год.	8,76	78,84	100,00	0,00
імаго		19	8 год. 40 хв.	8,22	71,28	96,51	3,33
імаго		19	3 год. 50 хв.	11,21	42,98	65,12	5,77
імаго		19	7 год. 40 хв.	5,66	43,36	67,05	1,92

Примітка: * – в досліді застосовували пристрій для стабілізації концентрації фосфіну

однакові) спостерігали різницю загибелі короїдів на стадії імаго в межах 3,06 – 4,01 %.

При застосуванні способу для стабілізації концентрації фосфіну 100 % його ефективність проти імаго короїдів була отримана при порівняно низькому значенні ДКЧ – 15,1 г-гр. Такий низький показник ДКЧ був можливий за рахунок застосування низьких концентрацій фосфіну – 0,21 г/м³ або 266 ppm, що суттєво зменшувало витрати на дозування препарату.

На відміну від фосфіну, фтористий сульфурил забезпечував 100 % загибель короїдів на стадії імаго як при коротких експозиціях (8 годин 40 хвилин), так і при більш тривалих – 23 години. На ефективність фумігації цим фумігантом у першу чергу впливала величина ДКЧ, в межах якої була можливість варіювали показники середньої концентрації та експозиції.

Загальновідомо, що неактивні стадії шкідників є більш стійкими до фумігантів, ніж активні. В той же час стійкість шкідників до знезараження препаратами може значно змінюватись, залежно від ряду чинників [4].

При проведенні досліджень щодо вивчення інсектицидної дії при знезараженні деревини та виробів з неї прослідковувалась чітка тенденція: комахи виявилися більш стійкими на неактивних стадіях розвитку (лялечки) до фосфіну, порівняно з активними стадіями (імаго та личинки).

Подібні дані наводять Manag Y., та ін. (2021) при фумігації ECO2FUME проти карантинних зерноїдів та, де саме у *Callosobruchus chinensis* лялечка виявилась найбільш стійкою до фуміганту, а у *Callosobruchus maculatus* чутливість до фосфіну яєць та лялечок були на одному рівні [29].

Meenatchi R. et al. (2018) вказують, що у *Tribolium castaneum* саме лялечки виявились найбільш стійкими до суміші фосфіну та вуглекислого газу [30].

Щодо порівняльного аналізу токсичної дії між фосфіном та фтористим сульфурилом, як і в нашому випадку, Subekti N. та Syahadan M. A. (2021) вважають, що фумігація за допомогою фтористого сульфурилу більш проста у застосуванні, ефективніша, а час експозиції коротший порівняно з фосфіном [12].

Таким чином, вищенаведені результати досліджень щодо вивчення токсичної дії фумігантів проти шкідників деревини та виробів з неї вказують на можливість досягнення 100 % ефективності газів. Проте, для вирішення питання чи зможуть ці фуміганти бути в якості заміни бромистому метилу в карантинній фумігації, необхідні подальші дослідження.

Висновки

1. Фосфін виявився більш ефективним при застосуванні тривалих 48–72 годинних, ніж коротких 5–6 годинних експозиціях проти шкідників деревини та виробів з неї. Уразі однакових експозицій, на підвищення ефективності фосфіну впливали збільшення показників ДКЧ та середньої концентрації газу.

2. На відміну від фосфіну, фтористий сульфурил забезпечував 100 % ефективність проти шкідників деревини як при коротких експозиціях – 8,67 годин, так і при більш тривалих – 23 години. На ефективність фумігації у першу чергу впливала величина ДКЧ.

3. При застосуванні пристрою для стабілізації концентрації фосфіну 100 % ефективність була отримана при порівняно низькому значенні ДКЧ – 15,1 г-гр. Це потребує додаткових досліджень для визначення особливостей токсичної дії фосфіну його ефективності проти шкідників за різних параметрів фумігації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Wöhr Andrea & Frey Annett. Handbook for Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. Freiburg in Breisgau, Germany, 2020. 936 p. ISBN: 978-9966-076-79-3 URL: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2020-English.pdf>
2. Nayak Manoj K., Daghli Gregory J., Phillips Thomas W. & Ebert Paul R. Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, 2020. Vol. 65. P. 333-350. doi: 10.1146/annurev-ento-011019-025047
3. Konemann C. E., Hubhachen Z., Opat G. P., Gautam S. & Bajracharya N. S. Phosphine resistance in *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Laemophloeidae) collected from grain storage facilities in Oklahoma, USA. *Journal of Economic Entomology*, 2017. 110 (3). P. 1377–1383. doi: 10.1093/jee/tox101
4. Somiahnadar Rajendran. Insect Pest Management in Stored Products Outlooks on Pest Management, 2020. Vol. 31. N. 1. P. 24-35. DOI: https://doi.org/10.1564/v31_feb_05
5. Jagadeesan Rajeswaran, Singarayan Virgine T. & Nayak Manoj K. A co-fumigation strategy utilizing reduced rates of phosphine (PH₃) and sulfurly fluoride (SF) to control strongly resistant rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae). *Pest Management Science*, 2021. 77 (9). P. 4009–4015. doi.org/10.1002/ps.6424
6. Dumancas Gerard, Cobbinah Elizabeth & Pham-Bugayong Patrisha J. Sulfuryl fluoride (Vikane). *In book: Reference Module in Biomedical Sciences*, 2022. DOI: 10.1016/B978-0-12-824315-2.00163-9
7. Nayak, M. K., Jagadeesan, R., Kaur, R., Daghli, G. J., Reid, R., Pavic, H., Smith, L. & Collins P. J. Use of sulfurly fluoride in the management of strongly phosphine-resistant insect pest populations in bulk grain storages in Australia. *January Indian Journal of Entomology*, 2016. 78 (special) :100. DOI: 10.5958/0974-8172.2016.00030
8. Романко, В. О., Дудинська А. Т. Акарицидна дія фтористого сульфурилу. *Науковий прогрес та інновації*, 2025. 28 (3), 91-97. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.03.15>
9. Boukouvala, Maria, Filintas, Constantin & Kavallieratos Nickolas G. Acaricidal efficacy of diatomaceous earths on different Life Stages of *Acarus siro* L. and *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank). *Insects*, 2025. 16 (7): 693. DOI: 10.3390/insects16070693
10. Md. Mahbub Hasan, Michael J. Aikins, Wes, Schilling & Thomas, Phillips. Comparison of methyl bromide and phosphine for fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae). Pests of high-value stored products. *Journal of Economic Entomology*, 2019. 113 (1). DOI: 10.1093/jee/toz319

11. Subekti N. & Syahadan M. A. Comparison the effectiveness of the fumigants sulfuryl fluoride and phosphine in controlling warehouse pest insects. *Journal of Physics Conference Series*, 2021. 1918(5):05 DOI: 10.1088/1742-6596/1918/5/052021
12. Md. Mahbub Hasan, Michael J. Aikins, Wes Schilling & Thomas Phillips. Sulfuryl fluoride as a methyl bromide alternative for fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae), major pests of animal-based stored products. *Journal of Stored Products Research*, 2021. 91:101769 DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101769
13. Cottrell Ted E, Aikins Michael J, Thoms Ellen M & Phillips Thomas W. Efficacy of Sulfuryl Fluoride Against Fourth-Instar Pecan Weevil (Coleoptera: Curculionidae) in Pecans for Quarantine Security. *Journal of Economic Entomology*, 2020. 113(2). 1152–1157 DOI: 10.1093/jee/toaa021
14. Shuai Cao, Shuai Cheng & Jiabin Cai. Research Progress and Prospects of Wood High-temperature Heat Treatment Technology. *BioResources*, 2022. 17(2):3702-3717 DOI: 10.15376/biores.17.2.Cao
15. Hnatek Jonas, Stejskal Vaclav, Vendl Tomas, Aulicky Radek, Malkova Jarmila & Zouhar Miloslav. Fumigation of Insect-Infested Wooden Logs by EDN Using Two Scenarios of Plastic Tent-Tarpaulin Sealing: Wooden Logs Stacks Placed on Bottom Plastic Sheets or Directly on Underlying. *Soil Sustainability*, 2021. 13(23), 13377. <https://doi.org/10.3390/su132313377>
16. Hall Matthew KD, Machuca-Mesa Laura M, Uzunovic Adnan & Nayak Manoj K. Phosphine as a possible alternative to methyl bromide for the phytosanitary treatment of wood products. *Journal of Stored Products Research*, 2025. 113 DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102672
17. Donghun Cho & Min-Goo Park. Primary Efficacy of Co-Fumigation with Methyl Bromide and Phosphine Against *Tribolium castaneum* and *Sitophilus zeamais* in Wood Pellets as a Quarantine Treatment. *Insects*, 2025. 16(2):186 DOI: 10.3390/insects16020186
18. Rajendran Somiahnadar & V. L. Kumar. Sulfuryl fluoride and phosphine as methyl bromide alternatives for fumigation of solid wood packaging *International Pest Control*, 2008. 50(6):317–320. URL https://www.researchgate.net/publication/285925978_Sulfuryl_fluoride_and_phosphine_as_methyl_bromide_alternatives_for_fumigation_of_solid_wood_packaging_materials
19. Huanwen Chen, Xiaowei Chen, Dan Xie, Qingshan Yang, Fang Niu, Defu Chi & Jia Yu. Integrated Management Strategies for Wood Infested by *Hylurgus ligniperda* F. (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Insects*, 2025. 16(11):1154 DOI: 10.3390/insects16111154
20. So-Yeon Kim, Na-Ra Choi & Min-Goo Park. Sulfuryl Fluoride Fumigation as a Quarantine Treatment for the Control of *Reticulitermes speratus* Kolbe (Blattodea: Rhinotermitidae) in Wood. *Insects*, 2024. 15(6):379 DOI: 10.3390/insects15060379
21. Hao Yang, Yuqi Hua, Tao Liu, Siming Fang, Wei Gu & Juan Shi. Alternative fumigation technologies for *Bursaphelenchus xylophilus*-infected woods: reducing reliance on methyl bromide. *Pest Management Science*, 2025. 81(8):4611-4620 DOI: 10.1002/ps.8821
22. Stoyanova Antoaneta, Stefanova Marieta Georgieva & Kirechev Damyan. Risk assessment of timber wood fumigation by applying the requirements of ISO 9001: 2015. Conference: 12th International Scientific Conference Wood ema 2019 digitalisation and circular economy: forestry and forestry based industry implications At: Varna, Bulgaria URL: chrome-extension://efaidnbmnnnnibpcajpcgiclfefndmkaj/https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2019_Proceedings.pdf
23. Vicent Antonio, Baptista Paula, Berlin Anna & Gonthie Paolo. Commodity risk assessment of debarked conifer wood chips fumigated with sulfuryl fluoride from the US. *EFSA Journal*, 2025. 23(1) DOI: 10.2903/j.efsa.2025.9190
24. Мамонтов В. А., Журавчак Т. М., Романко В. О., Анопченко О. М. Знезараження деревини: можливість застосування фосфіну та фтористого сульфурілу. *Карантин і захист рослин*. 2008. № 8. С. 21–24 URL <URI dspace.uzhnu.edu.ua/handle/lib/80525>
25. Мамонтов В. А., Романко В. О. Пат. 48293 UA, МПК C01B25/06 (2006.01), G01N7/00 (2006.01) Пристрій для вимірювання високих концентрацій фосфіну.; заявник Закарпатський територіальний центр карантину рослин Інституту захисту рослин Української аграрної академії наук. № у 200910100; заявл. 5.10.2009; опубл. 10.03.2010, Бюл. № 5, 2010 р. URL <URI dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/57472>
26. Romanko, V., & Dudynska, A. Synergism of a mixture of phosphine and carbon dioxide in fumigation against bean weevils. *Scientific Horizons*, 2023. 26(5), 89–98. <https://doi.org/10.48077/scihor5.2023.89>
27. Романко В. О., Дудинська А. Т. Синергізм суміші фосфіну та вуглекислого газу при фумігації проти хлібних шкідників запасів. *Аграрні інновації*. 2023. № 1. С. 113–119. <https://doi.org/10.32848/agrар.innov.2023.17.15>
28. Manar Y., Amin Abeer Omar & Refaat A. Mohamed. Susceptibility of different life stages of *Callosobruchus maculatus* and *Callosobruchus chinensis* to ECO2FUME gas and its impact on cowpea seeds quality. *Research Square*, 2021. DOI:10.21203/rs.3.rs-889770/v2
29. Meenatchi R., Alice R. P. & Paulin P. P. Synergistic effect of phosphine and carbon dioxide on the mortality of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) in Paddy. *Journal of Agricultural Science*, 2018. 10 (7). P. 503. DOI:10.5539/jas.v10n7p503

REFERENCES:

1. Wöhr Andrea, Frey Annett (2020). Handbook for Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. Freiburg in Breisgau, Germany. 936 p. ISBN: 978-9966-076-79-3 URL: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2020-English.pdf>
2. Nayak Manoj K., Daghli Gregory J., Phillips Thomas W., Ebert Paul R. (2020). Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, Vol. 65. P. 333-350. doi: 10.1146/annurev-ento-011019-025047
3. Konemann C. E., Hubhachen Z., Opit G. P., Gautam S., Bajracharya N. S. (2017). Phosphine resistance in *Cryptolestes ferrugineus* (Coleoptera: Laemophloeidae) collected from grain storage facilities in Oklahoma, USA. *Journal of Economic Entomology*, 110 (3). P. 1377–1383. doi: 10.1093/jee/tox101

4. Somiahnadar Rajendran, (2020). Insect Pest Management in Stored Products Outlooks on Pest Management. Vol. 31. N. 1. P.24–35. DOI: https://doi.org/10.1564/v31_feb_05
5. Jagadeesan Rajeswaran, Singarayan Virgine T., Nayak Manoj K. (2021). A co-fumigation strategy utilizing reduced rates of phosphine (PH₃) and sulfuryl fluoride (SF) to control strongly resistant rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens) (Coleoptera: Laemophloeidae). *Pest Management Science*, 77 (9). P. 4009–4015. doi.org/10.1002/ps.6424
6. Dumancas Gerard, Cobbinah Elizabeth, Pham-Bugayong Patrisha J. (2022). Sulfuryl fluoride (Vikane). In book: *Reference Module in Biomedical Sciences*. DOI: 10.1016/B978-0-12-824315-2.00163-9
7. Nayak, M. K., Jagadeesan, R., Kaur, R., Daglish, G. J., Reid, R., Pavic, H., Smith, L., Collins P. J. (2016). Use of sulfuryl fluoride in the management of strongly phosphine-resistant insect pest populations in bulk grain storages in Australia. *January Indian Journal of Entomology*, 78 (special) :100. DOI: 10.5958/0974-8172.2016.00030
8. Romanko, V. O., Dudynska, A. T. (2025). Akarytsydna diia ftorystoho sulfurylu. [Acaricidal action of fluorinated sulfuryl]. *Naukovyi prohres ta innovatsii*, 28 (3), 91–97. DOI: <https://doi.org/10.31210/spi2025.28.03.15> [in Ukrainian]
9. Boukouvala, Maria, Filintas, Constantin, Kavallieratos Nickolas G. (2025). Acaricidal efficacy of diatomaceous earths on different Life Stages of *Acarus siro* L. and *Tyrophagus putrescentiae* (Schrank). *Insects*, 16 (7): 693. DOI: 10.3390/insects16070693
10. Md. Mahbub Hasan, Michael J. Aikins, Wes, Schilling, Thomas, Phillips. (2019). Comparison of methyl bromide and phosphine for fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae). Pests of high-value stored products. *Journal of Economic Entomology*. 113 (1). DOI: 10.1093/jee/toz319
11. Subekti N., Syahadan M. A. (2021). Comparison the effectiveness of the fumigants sulfuryl fluoride and phosphine in controlling warehouse pest insects. *Journal of Physics Conference Series*, 1918(5):05 DOI: 10.1088/1742-6596/1918/5/052021
12. Md. Mahbub Hasan, Michael J. Aikins, Wes Schilling, Thomas Phillips (2021). Sulfuryl fluoride as a methyl bromide alternative for fumigation of *Necrobia rufipes* (Coleoptera: Cleridae) and *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae), major pests of animal-based stored products. *Journal of Stored Products Research*, 91:101769 DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101769
13. Cottrell Ted E, Aikins Michael J, Thoms Ellen M, Phillips Thomas W. (2020). Efficacy of Sulfuryl Fluoride Against Fourth-Instar Pecan Weevil (Coleoptera: Curculionidae) in Pecans for Quarantine Security. *Journal of Economic Entomology*, 113(2). 1152–1157 DOI: 10.1093/jee/toaa021
14. Shuai Cao, Shuai Cheng, Jiabin Cai (2022). Research Progress and Prospects of Wood High-temperature Heat Treatment Technology. *BioResources*, 17(2):3702-3717 DOI: 10.15376/biores.17.2.Cao
15. Hnatek Jonas, Stejskal Vaclav, Vendl Tomas, Aulicky Radek, Malkova Jarmila, Zouhar Miloslav. (2021). Fumigation of Insect-Infested Wooden Logs by EDN Using Two Scenarios of Plastic Tent-Tarpaulin Sealing: Wooden Logs Stacks Placed on Bottom Plastic Sheets or Directly on Underlying. *Soil Sustainability*, 13(23), 13377. <https://doi.org/10.3390/su132313377>
16. Hall Matthew KD, Machuca-Mesa Laura M, Uzunovic Adnan, Nayak Manoj K (2025). Phosphine as a possible alternative to methyl bromide for the phytosanitary treatment of wood products. *Journal of Stored Products Research*, 113 DOI: 10.1016/j.jspr.2025.102672
17. Donghun Cho, Min-Goo Park (2025). Primary Efficacy of Co-Fumigation with Methyl Bromide and Phosphine Against *Tribolium castaneum* and *Sitophilus zeamais* in Wood Pellets as a Quarantine Treatment. *Insects*, 16(2):186 DOI: 10.3390/insects16020186
18. Rajendran Somiahnadar, V. L. Kumar. (2008). Sulfuryl fluoride and phosphine as methyl bromide alternatives for fumigation of solid wood packaging *International Pest Control*, 50(6):317–320. URL https://www.researchgate.net/publication/285925978_Sulfuryl_fluoride_and_phosphine_as_methyl_bromide_alternatives_for_fumigation_of_solid_wood_packaging_materials
19. Huanwen Chen, Xiaowei Chen, Dan Xie, Qingshan Yang, Fang Niu, Defu Chi, Jia Yu (2025). Integrated Management Strategies for Wood Infested by *Hylurgus ligniperda* F. (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae). *Insects*, 16(11):1154 DOI: 10.3390/insects16111154
20. So-Yeon Kim, Na-Ra Choi, Min-Goo Park (2024). Sulfuryl Fluoride Fumigation as a Quarantine Treatment for the Control of *Reticulitermes speratus* Kolbe (Blattodea: Rhinotermitidae) in Wood. *Insects*, 15(6):379 DOI: 10.3390/insects15060379
21. Hao Yang, Yuqi Hua, Tao Liu, Siming Fang, Wei Gu, Juan Shi. (2025). Alternative fumigation technologies for *Bursaphelenchus xylophilus*-infected woods: reducing reliance on methyl bromide. *Pest Management Science*, 81(8):4611–4620 DOI: 10.1002/ps.8821
22. Stoyanova Antoaneta, Stefanova Marieta Georgieva, Kirechev Damyan. (2019). Risk assessment of timber wood fumigation by applying the requirements of ISO 9001: 2015. Conference: 12th International Scientific Conference Wood ema 2019 digitalisation and circular economy: forestry and forestry based industry implications at: Varna, Bulgaria URL: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefndmkaj/https://www.woodema.org/proceedings/WoodEMA_2019_Proceedings.pdf
23. Vicent Antonio, Baptista Paula, Berlin Anna, Gonthie Paolo. (2025). Commodity risk assessment of debarked conifer wood chips fumigated with sulfuryl fluoride from the US. *EFSA Journal*, 23(1) DOI: 10.2903/j.efsa.2025.9190
24. Mamontov V. A., Zhuravchak T. M., Romanko V. O., Anopchenko O. M. (2008). Znezarazhennia derevyny: mozhlyvist zastosuvannia fosfinu ta ftorystoho sulfurylu. [Wood disinfection: the possibility of using phosphine and sulfuryl fluoride]. *Karantyn i zakhyst roslyn*, № 8. S. 21–24. URI <dspace.uzhnu.edu.ua/handle/lib/80525> [in Ukrainian].
25. Mamontov V. A., Romanko V. O. (2010) Patent. 48293 UA, МПК C01B25/06 (2006.01), G01N7/00 (2006.01). Prystrii dlia vymiruvannia vysokykh konsentratsii fosfinu [Device for measuring high concentrations of phosphine]. zaiavnyk Zakarpatskyi terytorialnyi tsentr karantynu roslyn Instytutu zakhystu roslyn Ukrainskoi

- ahranoj akademii nauk. № u 200910100; zaiavl. 5.10.2009; opubl. 10.03.2010, Biul. № 5, 2010 r. URI <https://dSPACE.uzhnu.edu.ua/jspui/handle/lib/57472> [in Ukrainian].
26. Romanko, V., Dudynska, A. (2023). Synergism of a mixture of phosphine and carbon dioxide in fumigation against bean weevils. *Scientific Horizons*, 26(5), 89–98. <https://doi.org/10.48077/scihor5.2023.89>
27. Romanko V. O., Dudynska A. T. (2023). Synerhizm sumishi fosfinu ta vuhlekysloho hazu pry fumihatsii proty khlibnykh shkidnykiv zapasiv. [Synergism of phosphine and carbon dioxide mixture during fumigation against grain pests in storage]. *Ahrarni innovatsii*, 2023. № 1. S. 113–119. <https://doi.org/10.32848/ahrar.innov.2023.17.15> [in Ukrainian].
28. Manar Y., Amin Abeer Omar, Refaat A. Mohamed (2021). Susceptibility of different life stages of *Callosobruchus maculatus* and *Callosobruchus chinensis* to ECO2FUME gas and its impact on cowpea seeds quality. *Research Square*. DOI:10.21203/rs.3.rs-889770/v2
29. Meenatchi R., Alice R. P., Paulin P. P. (2018). Synergistic effect of phosphine and carbon dioxide on the mortality of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) in Paddy. *Journal of Agricultural Science*, 10 (7). P. 503. DOI:10.5539/jas.v10n7p503

Романко В. О., Журавчак Т. М., Дудинська А. Т. Інсектицидна дія фумігантів при знезараженні деревини та виробів з неї

Робота присвячена пошуку альтернатив бромистому метилу – універсального фуміганта, який був обмежений у застосуванні на вимогу Монреальського протоколу. В статті наведені результати ефективності фумігантів проти шкідників деревини.

Мета: дослідження токсичної фосфіну та фтористого сульфуриду проти шкідників деревини та виробів з неї. Об'єкти досліджень: комахи родів *Cetonia*, *Rhagium*, *Ips*, *Monochamus*. Матеріал досліджень: препаративна форма фосфіну «Магтоксин» (таблетовидна форма) виробництва Detia Degesch GmbH, фтористий сульфурид та деревина.

Методи: аналітичний огляд по тематиці досліджень, чинній нормативно-правовій базі у галузі знезараження; аналіз біологічних особливостей шкідників; експериментальний – визначення ефективності фумігантів проти шкідників деревини та виробів з неї у лабораторних умовах за різних параметрів знезараження; математико-статистичний – за допомогою комп'ютерних математичних функцій, вбудованих у програму Microsoft Excel 2003.

Результати. Розроблений пристрій для вимірювання високих концентрацій фосфіну застосовували за значних амплітуд концентрацій газу (від 0,1 до 8 г/м³). Розроблений спосіб гальмування та стабілізації швидкості виділення газу з таблеток давав можливість уникнути стрибкоподібних коливань концентрації фосфіну, які негативно впливали на ефективність цього фумігantu. Фосфін при експозиції 48 годин і ДКЧ 64,13 г-гр. забезпечив 100 % загибель шкідників роду *Ips*.

Висновки. На ефективність фосфіну впливало збільшення тривалості фумігації та рівномірність концентрації газу. На відміну від фосфіну, високу інсектицидну дію фтористого сульфуриду спостерігали і при коротких експозиціях (8 год. 40 хв.). Личинки роду *Cetonia* виявилися більш стійкими до фумігантів, ніж личинки *Rhagium* і *Monochamus*.

Отримані результати свідчать про необхідність проведення подальших досліджень зокрема у напрямку порівняльної ефективності фумігантів проти шкідників на різних стадіях розвитку та параметрів фумігації.

Ключові слова: альтернативи бромистому метилу, фосфін, фтористий сульфурид, шкідники.

Romanko V. O., Zhuravchak T. M., Dudynska A. T. Insecticidal action of fumigants in the disinfection of wood and wood products

This work is devoted to the search for alternatives to methyl bromide, a universal fumigant whose use has been restricted under the Montreal Protocol. The article presents the results of the effectiveness of fumigants against wood pests.

Purpose: to study the toxicity of phosphine and sulfur fluoride against pests of wood and wood products. Research objects: insects of the *Cetonia*, *Rhagium*, *Ips*, *Monochamus*. Research material: the preparative form of phosphine "Magtoxin" (tablet form) produced by Detia Degesch GmbH, sulfur fluoride, and wood.

Methods: analytical review of the research topic, the current regulatory framework in the field of disinfection; analysis of the biological characteristics of pests; experimental – determination of the effectiveness of fumigants against pests of wood and wood products in laboratory conditions under various disinfection parameters; mathematical and statistical – using computer mathematical functions built into Microsoft Excel 2003.

The results. The device developed for measuring high concentrations of phosphine was used at significant gas concentration amplitudes (from 0.1 to 8 g/m³). The developed method of slowing down and stabilizing the release rate of phosphine from tablets made it possible to avoid sudden fluctuations in phosphine concentration, which negatively affected the effectiveness of this fumigant. Phosphine at an exposure of 48 hours and a CT Product of 64.13 h*g ensured 100 % mortality of *Ips* pests.

Conclusions. The effectiveness of phosphine was influenced by an increase in the duration of fumigation and the uniformity of gas concentration. Unlike phosphine, the high insecticidal effect of sulfur fluoride was observed even at short exposures (8 hours 40 minutes). Larvae of the genus *Cetonia* were more tolerant to fumigants than larvae of *Rhagium* and *Monochamus*.

The results obtained indicate the need for further research, in particular in the direction of comparative effectiveness of fumigants against pests at different stages of development and fumigation parameters.

Key words: alternatives to methyl bromide, phosphine, sulfur fluoride, pests.

Дата першого надходження рукопису до видання: 12.11.2025

Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 19.12.2025

Дата публікації: 31.12.2025