

Acaricidal effect of sulfuryl fluoride

V. Romanko✉ | A. Dudynska

Article info

Correspondence Author

V. Romanko

E-mail:

romankovlad@ukr.netUzhhorod National
University,
Voloshyna Str., 32,
Uzhhorod, 88000 Ukraine**Citation:** Romanko, V., & Dudynska, A. (2025). Acaricidal effect of sulfuryl fluoride. *Scientific Progress & Innovations*, 28(3), 91–97. doi: 10.31210/spi2025.28.03.15

The study is devoted to the search for alternatives to phosphine, to which some pests have developed resistance, as well as methyl bromide, the use of which has been restricted by the Montreal Protocol. The article presents the results of studies on the effectiveness of sulfuryl fluoride against the mobile stages of mites. The study aimed to investigate the toxic effect of sulfuryl fluoride at different temperatures on the mobile stages of mites of the genera *Acarus* and *Tyrophagus* under parameters acceptable for industrial fumigation. The research objects were the mobile stages of acarid mites. The research material was sulfuryl fluoride. The following methods were used: analytical review of the topic; analysis of the biological characteristics of acarid mites; experimental – variation of different fumigation parameters (temperature, concentration, exposure duration, c (concentration) $\times$ t (time) products (CT-products), mathematical and statistical analysis using computer modeling. The results of the studies showed the toxic effect of sulfuryl fluoride against the mobile stages of *Acarus* and *Tyrophagus* mites, depending on the fumigation parameters. Lethal dose (LD) values for the mobile stages of mites were established. At a temperature of 15–22 °C, the lethal norms for sulfuryl fluoride were CT-products 1398.80 g-hr., average concentration – 21.19 g/m³, fumigation duration 66 hours. At a temperature of 23–24 °C, lethal norms were at the level of CT-products 1206.00 g-hr., the average concentration was 28.71 g/m³, and the duration of fumigation was 42 hours. At a temperature of 25–26 °C, lethal norms of sulfuryl fluoride for mites were at the following fumigation parameters: CT-products 1107.55 g-hr., average concentration 30.77 g/m³, fumigation duration 36 hours. At a temperature of 27–28 °C, lethal norms were at the level of CT-products 1005.00 g-hr., average concentration – 33.50 g/m³, fumigation duration 30 hours. At a temperature of 32 °C and above, the lethal norms for sulfuryl fluoride were CT-products 906.55 g-hr., average concentration – 34.87 g/m³, fumigation duration 26 hours. Lethal norms for sulfuryl fluoride at different temperatures were established, which are optimal for ensuring 100 % mortality of mobile stages of acarid mites, as they slightly exceed the sublethal threshold. The dependence of the fumigant's effectiveness on temperature was observed. As the temperature decreases, the toxic load must increase to ensure 100 % mortality mites, and vice versa. The results obtained indicate the need for further research, particularly to determine optimal intervals for repeated fumigations.

Keywords: alternative to methyl bromide, acarid mites, fumigation parameters.

Акарицидна дія фтористого сульфурилу

В. О. Романко | А. Т. Дудинська

Ужгородський
Національний Університет,
м. Ужгород, Україна

Робота присвячена пошуку альтернатив фосфіну, до якого резистентні деякі шкідники, а також бромистому метилу, обмежений у застосуванні на вимогу Монреальського протоколу. В статті наведені результати досліджень ефективності фтористого сульфурилу на рухомих стадіях кліщів. Метою дослідження була токсична дія фтористого сульфурилу за різних температур на рухомих стадіях кліщів представників роду *Acarus* та *Tyrophagus* в параметрах прийнятних для виробничої фумігації. Об'єктами досліджень слугували рухомі стадії комірних кліщів. Матеріал досліджень був фтористий сульфурил. Використовували методи: аналітичного огляду по тематиці досліджень; експериментальний – варіювання параметрів незараження (температура концентрація, тривалість експозиції, показник ДКЧ); математико-статистичний – за допомогою комп'ютерних математичних функцій. В результатах досліджень наведено токсичну дію фтористого сульфурилу проти рухомих стадій комірних кліщів родів *Acarus* та *Tyrophagus* в залежності від параметрів фумігації. Встановлені летальні значення ДКЧ для рухомих стадій кліщів. За температури 15–22 °C летальні норми фтористим сульфурилом становили ДКЧ 1398,80 годинограм, середня концентрація – 21,19 г/м³, тривалість фумігації 66 годин. За температури 23–24 °C летальні норми були на рівні ДКЧ 1206,00 годинограм, середня концентрація – 28,71 г/м³, тривалість фумігації 42 годин. За температури 25–26 °C летальні норми фтористим сульфурилом на кліщів становили при таких параметрів фумігації ДКЧ 1107,55 годинограм, середня концентрація – 30,77 г/м³, тривалість фумігації 36 годин. За температури 27–28 °C летальні норми були на рівні ДКЧ 1005,00 годинограм, середня концентрація – 33,50 г/м³, тривалість фумігації 30 годин. За температури 32 °C та вище летальні норми фтористим сульфурилом становили ДКЧ 906,55 годинограм, середня концентрація – 34,87 г/м³, тривалість фумігації 26 годин. Встановлені летальні норми фтористим сульфурилом за різних температур, які є оптимальними для забезпечення 100 % загибелі рухомих стадій акаридєвих кліщів. Спостерігали залежність ефективності фуміганту від температури. При зниженні температури, для забезпечення 100% загибелі комірних кліщів, була необхідність у збільшенні токсичного навантаження фуміганту і навпаки.

Ключові слова: альтернатива бромистому метилу, акаридєві кліщі, параметри фумігації.**Бібліографічний опис для цитування:** Романко В. О., Дудинська А. Т. Акарицидна дія фтористого сульфурилу. *Scientific Progress & Innovations*. 2025. № 28 (3). С. 91–97.

Вступ

На даний час у фітосанітарних заходах в Україні фактично використовується лише один фумігант – фосфін. Незважаючи на високу ефективність цього фумігantu, постійне та недостатньо контрольоване його використання може призвести до негативних наслідків, які пов'язані із виникненням у комах стійкості (резистентності), що генетично закріплюється й передається наступним поколінням [1–3].

У випадку завезення резистентних шкідливих організмів або виникнення їх популяцій на території країни боротися з ними буде практично нічим. Це призведе до неконтрольованого розповсюдження стійких до фосфіну популяцій, а згодом й до значних матеріальних втрат.

Крім того, фосфін не є універсальним фумігантом і багатьох випадках його застосування є проблематичним для знезараження [4–6]. З вищенаведеного очевидно, що необхідність у застосуванні нових фумігантів, які б були альтернативні бромистого метилу (обмеженого, а в подальшому і забороненого «універсального» фумігantu), а також і фосфіну для України є питанням виняткової актуальності.

Як один із таких фумігантів може розглядатися фтористий сульфурил. Це безбарвний газ без запаху, який раніше застосовували при деревообробці проти термітів [7].

Протягом останнього двадцятиліття в багатьох країнах проводяться дослідження можливості застосування фтористого сульфурилу, які в більшості носять суто прикладний характер і в основному зводяться до вивчення ефективності фтористого сульфурилу у визначених умовах проти певних шкідників продовольства й запасів, а також деревини та виробів з неї [7, 8].

Актуальним також є і фумігація проти комірних кліщів, які належать до групи шкідливих організмів продовольства й запасів. В даному напрямку активно проводяться дослідження і вже отримані певні позитивні результати [9, 10]. Проте, на думку багатьох вчених, доцільно збільшувати асортимент фумігантів та їх сумішей або препаративних форм для конкретно взятого шкідника [5, 11, 12]. Це дасть можливість збільшити ефективність фітосанітарних заходів та, можливо, уникнути, резистентності до препаратів, які постійно застосовуються.

Акаридієві кліщі є одними з найпоширеніших шкідників, що зустрічаються в умовах зберігання та переробки харчових продуктів. Ці види мають космополітичне поширення, заселяючи широкий спектр рослинної продукції. Їхня здатність використовувати умови високої вологості та багаті на органічні речовини субстрати робить їх особливо проблематичними в погано вентильованих або недостатньо обслуговуваних приміщеннях [13–15].

Господарська шкодочинність хлібних кліщів визначається багатьма чинниками. Так, унаслідок життєдіяльності кліщів зменшується маса продуктів і знижується їх якість. Вони набувають затхлого запаху, стаючи грудкуватими та непридатними для їжі і годівлі худоби. Схожість насіння суттєво знижується [16, 17].

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

Так, Sally Abbar et al. (2016) на основі проведених досліджень довели, що, обробка екстремальними температурами може відігравати важливу роль у комплексних програмах боротьби зі шкідниками для в'яленої шинки як альтернатива бромистому метилу або іншим хімічним обробкам. Було виявлено, що яйця кліщів *Tyrophagus putrescentiae* більш стійкі як до високих, так і до низьких температур, ніж рухомі стадії [18].

Серед альтернатив хімічному знезараженню слід відзначити інертні порошки цеоліту та каоліну, які володіють акарицидною дією. Результати Christos et al. (2025), показали що цеоліт був ефективнішим за каолін, незалежно від дозування. 100 % загибель кліщів *T. putrescentiae* визначали при концентрації 1000 ppm цеоліту за 72 години. Натомість, виживання *T. putrescentiae* спостерігалось при всіх дозах каоліну [9].

На думку Nihal Kilic (2022), інертні порошки типу діатоміт (отриманий із скам'янілих залишків діатомових водоростей) відзначався акарицидними властивостями проти *T. putrescentiae*. Спостерігали 100 % загибель за 24 години та 25 °C і можуть бути перспективною альтернативою традиційним хімічним акарицидам [19].

Подібні дослідження проводилися іншими дослідниками. Так, Maria Boukouvala et al. (2025) доводять, що акарицидну ефективність двох інертних порошків 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 *A. siro* та *T. putrescentiae* на всіх стадіях розвитку. Крім того, незрілі стадії обох видів (тобто личинки та німфи) були більш чутливими до препаратів, ніж дорослі особини. Загалом ефективність варіювалась в межах 84,4–97,0 % залежно від препаратів та стадії шкідників [10].

Також досліджується і токсична дія різних фумігантів та їх сумішей проти акаридієвих кліщів, зокрема на *T. putrescentiae*. Так, на думку Zhao et al. (2015) фумігація фосфіном сушовеяної шинки проти досліджуваних кліщів забезпечувала їх загибель на постембріональних стадіях на рівні 99,8 %. Крім того, залишкова концентрація фосфіну була нижчою за допустиму межу 0,01 ppm в продукції, що в подальшому споживається [20].

Md. Mahbub Hasan et al. (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. [21].

На думку дослідників Subekti & Syahadan (2021) при порівнянні токсичної дії фосфіну та фтористого сульфуриту проти шкідників запасів таких як *Alphitobius diaperinus* та *Tribolium castaneum*, спостерігали різницю ефективності у фумігантів. Вищий рівень загибелі відзначали у шкідників за фумігації з використанням фтористого сульфуриту при експозиції 24 години. Дослідники акцентують увагу на те, що фумігація при фтористому сульфуриті проста у застосуванні, ефективніша, а час експозиції коротший порівняно з фосфіном [7].

Також фтористий сульфурит виявився ефективний проти кліщів *T. putrescentiae*. На думку Sally Abbar et al. (2018) 36-годинна фумігація за 1400 годинограм (показник добутку концентрації на тривалість фумігації (далі ДКЧ)) забезпечувала 100 % усіх стадій життєвого циклу кліщів при 40 °C. Яйця кліщів, які були визначені як найбільш стійкі до фумігantu [22].

Проте, подальше зниження температури негативно вплинуло на ефективність фтористого сульфуриту. Так Md. Mahbub Hasan et al. (2021) визначали ефективність фтористого сульфуриту проти двох основних членистоногих-шкідників в'яленої шинки: *N. rufipes* та *T. putrescentiae*. Дія фтористого сульфуриту викликала значну загибель комах-шкідників, але не на кліщів при обробці протягом 48 годин при температурі 23 °C. Дослідження також показали, що яйця *T. putrescentiae* були в кілька разів стійкішими, ніж рухомі стадії кліщів [23].

З вище наведених даних видно, що в літературі немає детальних результатів досліджень щодо впливу температурного фактору (в значній амплітуді) на токсичну дію фтористого сульфуриту проти акаридів кліщів.

Крім того, враховуючи, що в різних субстратах часто виявляли представників родів *Tyrophagus* та

Acarus [13] є доцільним при розробці летальних норм не розділяти їх по видовій належності.

Мета дослідження

Мета роботи: охарактеризувати токсичну дію фтористого сульфуриту за різних температур на рухомих стадіях кліщів представників роду *Acarus* та *Tyrophagus* в параметрах прийнятих для виробничої фумігації.

Матеріали і методи

Роботу проводили в Закарпатському територіальному центрі карантину рослин Інституту захисту рослин НААН України в 2011–2013 роках. Продовжували дослідження в інституті електронної фізики Національної академії наук України в 2021–2024 роках.

Об'єкти досліджень: токсична дія фтористого сульфуриту, рухомі стадії комірних кліщів (представники роду борошняних (*Acarus*) та видовжених (*Tyrophagus*) кліщів). Біоматеріал зібраний в складських приміщеннях, та зерносковищах Ужгородського району. Подальше розведення та підтримка культур досліджуваних організмів здійснювались за загальноприйнятою методикою [13].

Проведення фумігації досліджуваних кліщів. Фумігацію проводили у камерах, виготовлених із 3-х літрових скляних банок та відповідно обладнаних до потреб подібних досліджень.

У камері є отвори для введення фумігantu та розташування садків з біоматеріалом, передбачено можливість рециркуляції газової суміші та створення від'ємного тиску.

Для введення в камеру необхідної кількості фумігantu, була розроблена та виготовлена спеціальна установка, за допомогою якої з високою точністю можна дозувати препарат від 0,1 до 40 г/м³ (рис. 1).

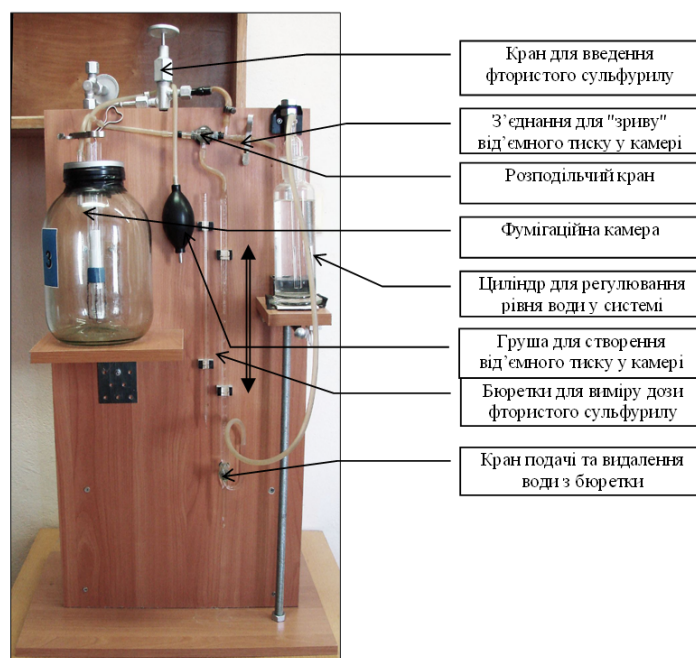


Рис. 1. Установка для дозування та введення фтористого сульфуриту в камеру

Вимірювання заданої кількості фуміганту проводиться за допомогою мірних бюреток ємністю 1, 5, 25 і більше мл. шляхом введення у заповнену водою бюретку фтористого сульфуриду з балончика.

Схема досліджень рухомих стадій кліщів. Для фумігації наважки зараженого кліщами субстрату (масою 1000–1500 мг, залежно від інтенсивності заселення даних шкідливих організмів) поміщали у газопроникні садки. Потім для одного варіанту у фумігаційну камеру вміщали по 3 садки і стільки ж залишали й витримували у подібних умовах до проведення обліків для контролю. Контролем в нас слугували нефуміговані особини рухомих стадій кліщів, які містилися в субстраті.

Виділення живих особин кліщів з поживного субстрату після фумігації, а також з контролю проводили за допомогою конусоподібних фототермо-еклекторів Берлезе в модифікації Тульгрена (рис. 2) за загальноприйнятою методикою [13].

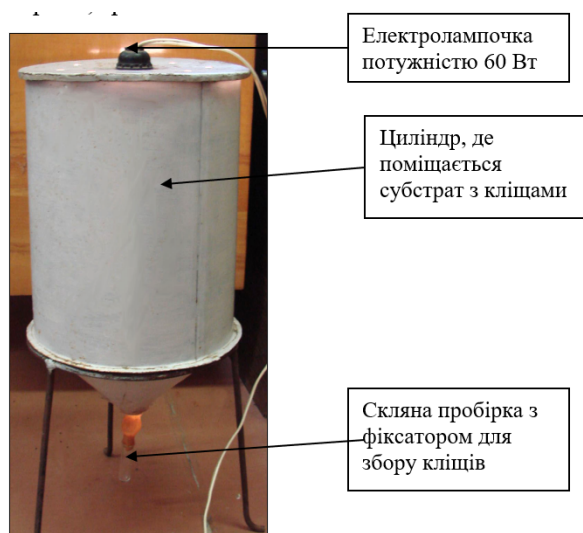


Рис. 2. Еклектор для виділення кліщів з субстрату

По закінченню експозиції та дегазації за допомогою еклектора виділяли із субстрату живі особини з дослідних та контрольних садків.

Далі підраховували виділену кількість особин кліщів під бінокуляр і визначали кількість особин кліщів на 0,1 грам субстрату за формулою:

$$n = \frac{N \times 100}{m}, \text{ де} \quad (1)$$

n – кількість особин кліщів у 0,1 грам субстрату, штук, N – кількість особин кліщів у пробі, штук, m – маса проби, грам.

Загибель кліщів у дослідах визначали за формулою:

$$E = 100 - \left(\frac{D}{K} \right), \text{ де} \quad (2)$$

E – загибель в досліді з урахуванням контролю, %, D – кількість живих особин кліщів у 0,1 грамах субстрату в досліді після фумігації, штук,

K – кількість живих особин кліщів у 0,1 грамах субстрату в контролі, штук.

Залежно від інтенсивності зараження у 0,1 грамах субстрату кількість кліщів становила 69–256 особин.

Дослідження проводили за параметрами фумігації в межах: ДКЧ від 604,20 до 3298,04 годинограм, середньої концентрації від 6,70 до 34,87 г/м³, експозиції від 25 до 144 годин, залежно від температури (15, 23, 25, 27 та 32 °C).

Ефективність фумігації визначали з врахуванням контролю за формулою Аббота. Статистичну обробку даних проводили за допомогою комп'ютерних математичних функцій, що вбудовані в програму Microsoft Excel 2003.

Результати та їх обговорення

При вивченні токсичної дії фтористого сульфуриду проти комірних кліщів родів борошняних (*Acarus*) та видовжених (*Tyrophagus*), за основний показник, від якого при певній температурі залежала ефективність фуміганту, було прийнято ДКЧ летальних норм, який виражали у годинограмах [11].

При проведенні нами досліджень важливою умовою було встановлення показника загибелі кліщів на рівні 90–99 %, що в подальшому давало можливість більш точно визначити показник летальної норми за мінімально ефективних концентрацій та експозицій фуміганту. Тому у разі отримання 100 % загибелі кліщів, токсичне навантаження зменшували до встановлення 90–99 % показника загибелі даних шкідливих організмів.

Отримані нами результати лабораторних досліджень по фумігації, при застосуванні ДКЧ в межах від 906,00 до 1398,80 годинограм, свідчать про високу ефективність даного фуміганту проти рухомих стадій комірних кліщів (рис. 3).

Так, були встановлені летальні значення ДКЧ для рухомих стадій кліщів при температурах фумігації 15, 23, 25, 27 та 32 °C на рівні – 1398,80; 1206,00; 1107,55; 1005,00 та 906,55 годинограм відповідно. Встановлена чітка залежність ефективності фуміганту від температури: при зниженні температури, для забезпечення 100 % загибелі комірних кліщів, була необхідність у збільшенні токсичного навантаження фуміганту, що відображалось у підвищенні показника ДКЧ.

Також відзначали кореляційний зв'язок (коефіцієнт кореляції в межах від 0,921 до 0,999) між загибеллю рухомих стадій кліщів (в %) та показників ДКЧ за однакової температури.

Слід зауважити, що саме величина ДКЧ впливала на ефективність фумігації при певній температурі, а не інші окремо взяті параметри знезараження (концентрація фуміганту або тривалість експозиції).

Так за температури 32 °C варіювання показників у напрямку збільшення середньої концентрації з 14,37 на 24,17 г/м³ та, водночас, скорочення експозиції з 42 на 25 годин (за подібних показників ДКЧ -603,80 та 604,20 годинограм) не спричиняло зміну показника загибелі кліщів – 97,00±0,96 та 96,72±1,04 відповідно.

Аналогічні результати отримали і при фумігації за температури 25 °C. Так, варіювання показників середньої концентрації з 6,70 на 32,13 г/м³ та

експозиції з 144 на 30 годин (за подібних показників ДКЧ – 964,80 та 963,98 годинограм) не спричиняло

зміну показника загибелі кліщів – $99,97 \pm 0,03$ та $99,89 \pm 0,01$ відповідно (рис. 3).

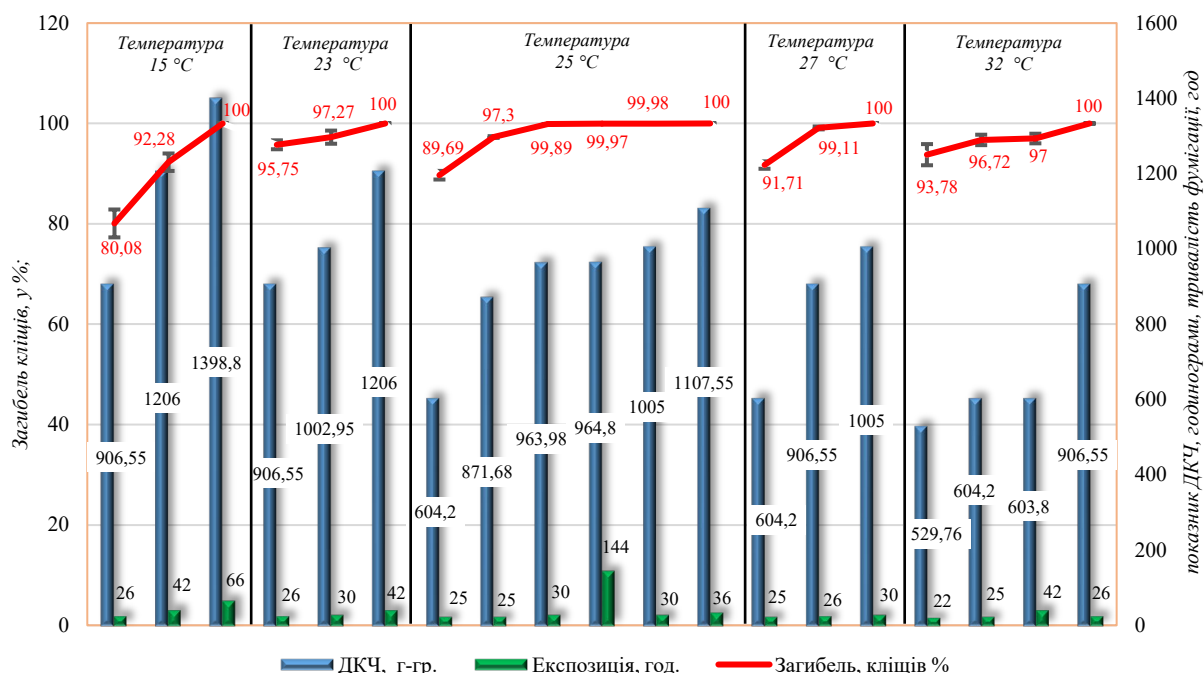


Рис. 3. Токсична дія фтористого сульфурилу на рухомі стадії борошняних та видовжених комірних кліщів в залежності від параметрів фумігації

В той же час, як відомо, значне скорочення експозиції при дії фосфіну може спричинити виникнення "наркотичного" ефекту, що у свою чергу призводить до непередбаченого зменшення загибелі шкідників і, як наслідок, відбувається зниження ефективності фумігації [4, 11].

Результати дослідів підтверджують відповідність токсичної дії фтористого сульфурилу правилу Хейбра (Haber's rule) у діапазоні варіюванні показників середньої концентрації від 6,7 до 32,13 г/м³ та експозиції від 30 до 144 годин.

Мінімальна ефективна концентрація, за якої було отримано 100 % загибель рухомих стадій комірних кліщів, становила 6,7 г/м³ (за тривалості фумігації 144 години). Подальше зниження середньої концентрації не доцільно через необхідність застосування тривалих експозицій, неприйнятних для виробничої фумігації.

В таблиці наведені летальні норми фтористим сульфурилом за різних температур, які забезпечують 100 % загибель рухомих стадій кліщів родів *Acarus* та *Tyrophagus* (табл. 1). Особливість токсичної дії фуміганту на кліщів полягає в тому, що при зниженні температури 32 до 15 °C була необхідність підвищувати показник ДКЧ лише у 1,54 рази.

Тоді як при летальних нормах фтористим сульфурилом на шкідників-комах за подібних температур була необхідність підвищувати показник ДКЧ значно більше: для *Acanthoscelides obtectus* – 2,38, *Ephestia kuehniella* – 3,36, *Sitophilus granarius* 2,51 рази [24]. Це, ймовірно, пояснюється тим, що за високих температур процеси дихання у активних стадій кліщів проходять не так інтенсивно, порівняно з комахами-шкідниками.

Таблиця 1

Летальні норми фтористим сульфурилом для рухомих стадій кліщів родів *Acarus* та *Tyrophagus*

Температура, °C	ДКЧ, годинограм	Концентрація, г/м ³	Експозиція, год.
15–22	1398,80	21,19	66
23–24	1206,00	28,71	42
25–26	1107,55	30,77	36
27–28	1005,00	33,50	30
32 та вище	906,55	34,87	26

Слід зазначити, що для забезпечення загибелі кліщів на стадії яйця була необхідність у суттєвому збільшенні показника ДКЧ фтористим сульфурилом до 3298,04 годинограм. Такі параметри фумігації є економічно не обґрунтованими, оскільки необхідно було підвищувати токсичну дію фтористого сульфурилу мінімум у 2,3 рази. Крім того таке знезараження не завжди забезпечувало 100 % загибель кліщів на стадії яйця. Тому, на нашу думку, у виробничих умовах доцільно спочатку проводити фумігацію проти рухомих стадій комірних кліщів. Потім, у разі можливості, дотримуватися у зерно-сховищах оптимальних умов зберігання рослинної продукції, особливо це стосується вологості як повітря так і зерна, щоб уникнути швидкого розвитку шкідників. У разі відсутності таких умов – повторна фумігація фтористим сульфурилом.

Отримані результати досліджень співпадають з думкою Sally Abbar et al. (2018) про те, що яйця кліщів відзначалися стійкістю до фтористого сульфурилу [22].

Аналогічно з нашими результатами є дані авторів Md. Mahbub Hasan et al. (2021) які стверджували, що

ефективність фтористого сульфурилу проти *T. putrescentiae* залежить від температурного фактору. Крім того кліщі виявилися більш стійкими до фумігantu порівняно з шкідником *N. rufipes* [23].

Подібної думки дотримується і Bell C.H. (2004), який вказує на значну стійкість яєць кліща *A. siro* порівняно з яйцями основних комах-шкідників запасів, щонайменше у 3,38 рази [25].

Також, слід відзначити, про стабільність отриманих результатів досліджень, про що свідчать низькі показники похибок середніх значень (похибка не перевищувала показник 2,78) між повторностями у варіанті.

Таким чином, дані параметри фумігації є оптимальними для забезпечення 100 % загибелі рухомих стадій кліщів, оскільки їх значення в незначній мірі вищі за сублетальний рівень отруєння. Крім того вони є ефективними та прийнятними для виробничої фумігації і дають можливість у широкому діапазоні регулювати час експозиції і витрати фумігantu.

На нашу думку, є актуальними подальші дослідження у напрямку встановлення оптимальним періодів для повторних фумігацій в залежності від особливостей розвитку кліщів та температурного чинника.

Висновки

1. Встановлено летальні значення ДКЧ для рухомих стадій кліщів роду *Acarus* та *Tyrophagus* при температурах фумігації 15, 23, 25, 27 та 32 °C на рівні – 1398,80; 1206,00; 1107,55; 1005,00 та 906,55 годинограм відповідно, які є прийнятними для виробничої фумігації.

2. Спостерігали залежність ефективності фумігantu від температури. При зниженні температури, для забезпечення 100 % загибелі кліщів, була необхідність у збільшенні токсичного навантаження фтористого сульфурилу і навпаки.

3. Ефективність фтористим сульфурилом при певній температурі залежала, перш за все, від показника добутку тривалості фумігації та концентрації газу, а не від їх окремих значень. На практиці така особливість токсичної дії фумігantu дає можливість варіювати показниками концентрації газу та експозиції у разі необхідності.

Конфлікт інтересів

Автори стверджують про відсутність конфлікту інтересів щодо їхнього викладу та результатів досліджень.

References

- Holloway, J. C., Falk, M. G., Emery, R. N., Collins, P. J., & Nayak, M. K. (2016). Resistance to phosphine in *Sitophilus oryzae* in Australia: A national analysis of trends and frequencies over time and geographical spread. *Journal of Stored Products Research*, 69, 129–137. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2016.07.004>
- Aulicky, R., Stejskal, V., Frydova, B., & Athanassiou, C. (2022). Evaluation of phosphine resistance in populations of *Sitophilus oryzae*, *Oryzaephilus surinamensis* and *Rhyzopertha dominica* in the Czech Republic. *Insects*, 13 (12), 1162. <https://doi.org/10.3390/insects13121162>
- Aulicky, R., Stejskal, V., & Frydova, B. (2019). Field validation of phosphine efficacy on the first recorded resistant strains of *Sitophilus granarius* and *Tribolium castaneum* from the Czech Republic. *Journal of Stored Products Research*, 81, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2019.02.003>
- Rajendran, S. (2020). Insect Pest Management in Stored Products. *Outlooks on Pest Management*, 31 (1), 24–35. https://doi.org/10.1564/v31_feb_05
- Bell, C. H. (2014). Food safety assurance systems: infestation management in food production premises. *Encyclopedia of Food Safety*, 189–200. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-378612-8.00354-1>
- Jagadeesan, R., & Nayak, M. K. (2016). Phosphine resistance does not confer cross-resistance to sulfuryl fluoride in four major stored grain insect pests. *Pest Management Science*, 73 (7), 1391–1401. <https://doi.org/10.1002/ps.4468>
- 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), 052021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1918/5/052021>
- Nayak, M. K., Jagadeesan, R., Kaur, R., Daglish, G. J., Reid, R., Pavic, H., Smith, L. W., & Collins, P. J. (2016). Use of sulfuryl fluoride in the management of strongly phosphine-resistant insect pest populations in bulk grain storages in Australia. *Indian Journal of Entomology*, 78 (special), 100. <https://doi.org/10.5958/0974-8172.2016.00030.4>
- Athanassiou, C. G., Rumbos, C. I., Agrafioti, P., & Sakka, M. K. (2025). Acaricidal effect of zeolite and kaolin against *Tyrophagus putrescentiae* on Wheat. *Agronomy*, 15 (4), 799. <https://doi.org/10.3390/agronomy15040799>
- Boukouvala, M. C., Filintas, C. S., & Kavallieratos, N. G. (2025). Acaricidal efficacy of diatomaceous earths on different life stages of *Acarus siro* L. and *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk). *Insects*, 16 (7), 693. <https://doi.org/10.3390/insects16070693>
- Romanko, V., & Dudynska, A. (2023). Synergism of a mixture of phosphine and carbon dioxide in fumigation against bean weevils. *Scientific Horizons*, 26 (5). <https://doi.org/10.48077/scihor5.2023.89>
- Klechkovskiy, Ju., & Niamtsu, Je. (2020). Control of the spread of potato moth at the use of mebrocarboxylic mixtures. *Bulletin of Agricultural Science*, 98 (1), 32–38. <https://doi.org/10.31073/agroviznyk202001-05>
- Dudynska, A. T., Romanko, V. O., Dudynsky, T. T., Karabiniuk, M. M., & Zhovnerchuk, O. V. (2023). Species diversity and distribution of synanthropic acarid mites (Acariformes, Acaridia) in Transcarpathia. *Zoodiversity*, 57 (4), 283–292. <https://doi.org/10.15407/zoo2023.04.283>
- Hubert, J., Münzbergová, Z., Kučerová, Z., & Stejskal, V. (2006). Comparison of communities of stored product mites in Grain Mass and Grain Residues in the Czech Republic. *Experimental and Applied Acarology*, 39 (2), 149–158. <https://doi.org/10.1007/s10493-006-0026-y>
- Collins, D. A. (2012). A review on the factors affecting mite growth in stored grain commodities. *Experimental and Applied Acarology*, 56 (3), 191–208. <https://doi.org/10.1007/s10493-012-9512-6>
- Vogel, P., Liberato da Silva, G., Esswein, I. Z., Dallazen, M. C., Heidrich, D., Pagani, D. M., Hoehne, L., Scroferneker, M. L., Valente, P., & Ferla, N. J. (2021). Effects of infestations of the storage mite *Tyrophagus putrescentiae* (Acaridae) on the presence of fungal species and mycotoxin production in stored products. *Journal of Stored Products Research*, 94, 101883. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101883>
- Malik, A., Gulati, R., Duhan, K., & Poonia, A. (2018). *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk) (Acari: Acaridae) as a pest of grains: a review. *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 6, 2543–2550.
- Abbar, S., Schilling, M. W., & Phillips, Thomas. W. (2016). Time-mortality relationships to control *Tyrophagus putrescentiae* (Sarcoptiformes: Acaridae) exposed to high and low temperatures. *Journal of Economic Entomology*, 109 (5), 2215–2220. <https://doi.org/10.1093/jee/tow159>
- Kılıç, N. (2022). Efficacy of dust and wettable powder formulation of Diatomaceous earth (Detech®) in the control of *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk) (Acari: Acaridae). *Insects*, 13 (10), 857. <https://doi.org/10.3390/insects13100857>
- Zhao, Y., Abbar, S., Phillips, T. W., & Schilling, M. W. (2015). Phosphine fumigation and residues in dry-cured ham in commercial applications. *Meat Science*, 107, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2015.04.008>

21. Hasan, M. M., Aikins, M. J., Schilling, M. W., & Phillips, T. W. (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 (2), 1008–1014. <https://doi.org/10.1093/jee/toz319>
22. Abbar, S., Sağlam, Ö., Schilling, M. W., & Phillips, T. W. (2018). Efficacy of combining sulfuryl fluoride fumigation with heat to control the ham mite, *Tyrophagus putrescentiae* (Schränk) (Sarcoptiformes: Acaridae). *Journal of Stored Products Research*, 76, 7–13. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2017.11.008>
23. Hasan, M. M., Aikins, M. J., Schilling, M. W., & Phillips, T. W. (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. <https://doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101769>
24. Romanko, V. O., & Dudynska, A. T. (2017). *Patent for utility model No 96871. Ukraine*. Method for controlling the number of insect pests in grain and legume stocks during fumigation with fluorinated sulfuryl. Retrieved from: <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/757833/>
25. Bell, C. H. (2004). The use of sulphuryl fluoride in Europe for structure and commodity disinfestation. *Proceedings of international conference on alternatives to methyl bromide*, 27-30 September 2004. (pp. 237–240). Lisbon, Portugal.

ORCID

V. Romanko 
A. Dudynska 

<https://orcid.org/0000-0002-5263-4190>
<https://orcid.org/0000-0001-7461-0512>



2025 by the author(s). This is an open-access article distributed under the Creative Commons Attribution License <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.