

ФУМІГАЦІЯ СУМІШАМИ ФОСФІНУ З ВУГЛЕКИСЛИМ ГАЗОМ ПРОТИ ЗЕРНОЇДІВ НА РІЗНИХ СТАДІЯХ РОЗВИТКУ

Романко Володимир Олександрович

кандидат сільськогосподарських наук, доцент
Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

ORCID: 0000-0002-5263-4190

volodymyr.romanko@uzhnu.edu.ua

Робота присвячена пошуку альтернатив бромистому метилу – універсального фуміганта, який був обмежений у застосуванні на вимогу Монреальського протоколу. В статті наведені результати токсичної дії сумішей фосфіну з вуглекислим газом проти шкідників зернобобової продукції.

*Мета статті – дослідження токсичної дії суміші фосфіну та вуглекислого газу проти зерноїдів на різних їх стадіях розвитку та популяціях. Об'єкти досліджень. *Acanthoscelides obtectus* на різних стадіях розвитку та популяцій. Матеріал досліджень – препаративна форма фосфіну «Магтоксин» (таблетковидна форма) виробництва *Detia Degesch GmbH*, вуглекислий газ у балонах. Методи – аналітичний огляд по тематиці досліджень, чинній нормативно-правовій базі у галузі знезараження; аналіз біологічних особливостей шкідників; експериментальний – встановлення 100% ефективності фосфіну із вуглекислим газом проти шкідників у лабораторних умовах за відповідного обладнання; математико-статистичний – за допомогою комп'ютерних математичних функцій, вбудованих у програму *Microsoft Excel 2003*.*

*При фумігації за ДКЧ 6,85 та температури 30 °С, визначали загибель імаго, личинок, лялечок та яєць зерноїда квасолевого на рівні 96,7±1,31, 89,7±1,73, 66,3±3,97 та 58,3±3,46% відповідно. При фумігації за ДКЧ 14,26 та температури 22 °С, визначали загибель імаго, личинок, лялечок та яєць зерноїда квасолевого на рівні 79,3±2,85 74,0±4,08, 65,3±3,54 та 60,6±4,28% відповідно. Для забезпечення 100% загибелі стійких популяцій *Acanthoscelides obtectus* на стадії яйця була необхідність збільшити показники ДКЧ з 10,14–14,23 до 19,22–29,25 годинogramів залежно від температури. *Acanthoscelides obtectus* на стадії яйця виявся найбільш стійким при фумігації сумішами газів за різних температур. Лялечки лише на 7,0% є менш стійкими до сумішей газів, порівняно з стадією яйця. Різниця загибелі між активними та неактивними стадіями становила 38,4 та 18,7% за температур 30 та 22 °С відповідно. Отримані результати свідчать про необхідність проведення подальших досліджень у напрямку більш детального вивчення популяційної стійкості зерноїдів при знезараженні сумішами газів.*

Ключові слова: альтернатива бромистому метилу, популяції та стадії розвитку *Acanthoscelides obtectus*.

DOI <https://doi.org/10.32782/agrobio.2023.1.12>

Вступ. 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 складських приміщень, де в основному використовувався бромистий метил (*Wöhr & Frey, 2020*). 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 бромистому метилу, більшістю дослідників та спеціалістів на перший план виносяться препарати на основі фосфіну.

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 (*Manoj K Nayak et al. 2020; Kopemann et al. 2017; Holloway et al., 2016*).

До інших альтернатив бромистого метилу слід віднести фтористий сульфурил (*Romanco et al., 2014*) та його сумішей з фосфіном (*Jagadeesan et al., 2018*;

Rajeswaran Jagadeesan, et. al., 2021; Rajeswaran Jagadeesan, Manoj K Nayak, 2017). Також проводять дослідження з сумішами бромистого метилу з вуглекислим газом (*Klechkovskiy et al., 2016; Klechkovskiy & Niamtsu, 2020; Klechkovskiy & Neamtsu, 2019*), ефективність яких доведена.

Проте, дані фуміганти та їх суміші не зареєстровані для використання на території України, хоча необхідність їх актуальна. В такому разі є перспективний інший спосіб – це застосування суміші фосфіну (дозволений у використанні на території України) з вуглекислим газом проти шкідників. Особливо актуальним є вивчення токсичної дії суміші газів проти тих стадій комах, які є стійкими до фумігантів, зокрема стадії яйця та лялечки.

Серед карантинних видів шкідників зернобобової продукції, які можуть проникнути та акліматизуватися на території України, є китайський (*Callosobruchus chinensis* L.) (*CABI digital library, 2021; Singh, 2022*) та чотириохплямистий зерноїди (*Callosobruchus maculatus* Fabre) (*CABI digital library, 2021; Khadim Kébé, et. al. 2017; Kalpna et al., 2022*).

Враховуючи те, що дані організми є шкідниками запасів та вже присутні на території країн Європи, ймовірність потрапляння та акліматизації на територію України досить високі.

Важливою умовою можливості застосування фумігантів у карантинному знезараженні, є їх 100% ефективність проти шкідників. Проведений нами аналітичний огляд показав, що на ефективність знезараження може суттєво впливати ряд таких чинників як вибір фуміганту, герметизація, параметри знезараження, а також стійкість та резистентність шкідників на різних їх стадіях і популяціях.

Так, деякі дослідники вважають, що фумігація препаратом ECO₂FUME (суміш фосфіну з вуглекислим газом) проти таких шкідників запасів як *Plodia interpunctella*, *Amyelois transitella*, *Tribolium castaneum*, *Tribolium confusum*, *Trogoderma variabile*, *Orzaepphilus surinamensis*, *Lasioderma serricorne* та *Carpophilus hemipterus* виявилась ефективною, проте не забезпечувала повну загибель комах на всіх стадіях розвитку. Стадія яйця виявилась найстійкішою (максимальна загибель шкідників становила максимум 99,8%), а найбільш чутливою стадією – імаго (Hartsell & Muhareb, 2005).

В літературі є дані щодо токсичної дії фумігантів та їх альтернатив проти *Callosobruchus maculatus* та *Callosobruchus chinensis*. Так, у роботі Хассан А. та його колег вказується на високу ефективність дії озону на імаго даних шкідників. Проте, неактивні стадії (яйця та лялечки) виявились стійкими (Hassan et al. 2021). Або інсектицидної дії ефірних олій (альтернатива хімічному методу) проти даних шкідників (Himanshi Gupta et al., 2023). А також токсичної дії вуглекислого газу на *Callosobruchus maculatus*. Так, 18% CO₂ істотно підвищували смертність дорослих особин, пізніх стадій яєць, а також личинок 1-го і 4-го віку (Weining Cheng et al., 2013). Loganathan et al. (2011) наводять результати досліджень впливу високих та низьких температур проти *Callosobruchus maculatus* на різних стадіях розвитку, де лялечки виявились найбільш стійкими (Loganathan et al. 2011). Проте, вищенаведені результати не гарантують 100% ефективність, що є необхідним при застосуванні карантинних заходів.

Слід відзначити, що у літературі наявні дані фумігації сумішами фосфіну з вуглекислим газом проти *Callosobruchus maculatus* та *Callosobruchus chinensis*. Так, Manar Y. et al. (2021) наводять результати досліджень щодо 100% ефективності фумігації препаратом ECO₂FUME проти *Callosobruchus maculatus* та *Callosobruchus chinensis*. Крім того, виявляли вищу схожість фумігованих насінин бобових, ніж у контрольних (Manar et al., 2021).

Виходячи з вищенаведених результатів ефективності препарату ECO₂FUME, а також відсутності його реєстрації у застосуванні на території України, все це, в цілому, вказує на перспективність та доцільність проведення досліджень по застосуванню сумішей газів фосфіну (зареєстрована форма) з вуглекислим газом проти зерноїдів.

Мета роботи: дослідження токсичної дії суміші фосфіну та вуглекислого газу проти зерноїдів на різних їх стадіях розвитку та популяціях.

Матеріали і методи досліджень. Роботу проводили в Закарпатському територіальному центрі каран-

тину рослин Інституту захисту рослин НААН України в 2014–2015 роках. Продовжували дослідження в Інституті електронної фізики Національної академії наук України в 2021–2022 роках.

Досліди проводили у лабораторних умовах у фумігаційних камерах (ємністю 30 літрів). Для цього застосовували прилади для виміру концентрації фумігантів – газоаналізатор PhD-Lite, інтерферометр ШІ-11, розроблений нами пристрій (Mamontov & Romanko, 2010) для отримання та дозування газів і виміру високих концентрацій фосфіну та інше необхідне лабораторне устаткування. Також для фумігації при високих температурах застосовували термостат.

При проведенні лабораторних досліджень суміші фосфіну з вуглекислим газом застосовували розроблений нами дозатор для нейтрального газу, який забезпечував необхідне дозування в межах від 200 до 2500 мл (рис. 1).

Для проведення досліджень використовували препаративну форму фосфіну «Магтоксин» (таблетовидна форма) виробництва Detia Degesch GmbH. Біоматеріал для дослідів розводили у лабораторії.

Об'єктами досліджень слугували: зерноїд kwasолевий (*Acanthoscelides obtectus* Say) на стадії імаго, личинки, лялечки та яйця, як біологічно близький модельний вид відсутніх на території України карантинних зерноїдів.

Загибель шкідників у дослідах визначали за формулою Аббота:

$$C\% = \frac{(P_k - P_0)}{P_k} * 100$$

де: C% – загибель шкідників, %;

P_k – загибель шкідників у контролі, %;

P_0 – загибель шкідників у досліді, %.

Ефективність сумішей газів визначали на основі показника добутку концентрації на час (ДКЧ), який виражається в одиницях годинограмах (Maslov et. al., 2007; Mamontov, 2006).

Дослідження були направлені на визначення ефективності газів фосфіну з вуглекислим газом проти шкідників зернобобової продукції за різних параметрів фумігації: температурних режимів від 22 до 30 °С, експозицій від 16 до 72 годин та концентрацій – фосфіну від 0,29 г/м³ до 0,59 г/м³, ДКЧ по фосфіну в межах 6,85-42,48 годинограмів.

Концентрацію вуглекислого газу застосовували в межах 116,58–117,93 г/м³ (або біля 5,9% від загального об'єму повітря), оптимальність яких проти даних шкідників експериментально доведено (Romanko, 2015).

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

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 наванта-

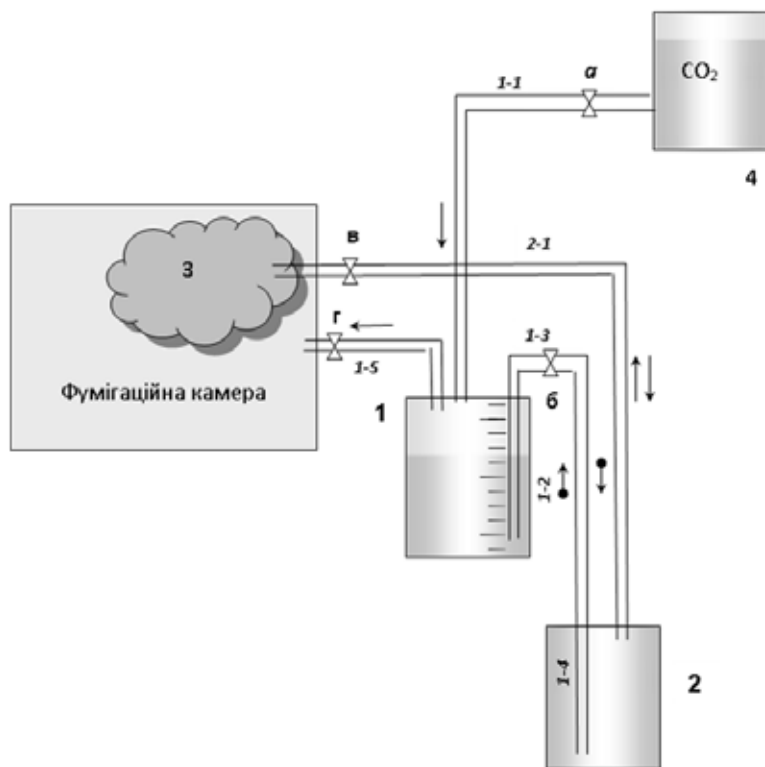


Рис. 1. Пристрій для дозування вуглекислого газу

Примітки:

1 – герметично вимірювальна ємність об'ємом 3000 мл., ціною поділки 100 мл., яка заповнена олією.

2 – герметична ємність об'ємом 3000 мл., яка виконує функцію утворення тиску та резервуару олії.

3 – поліетиленовий мішок ємністю 3000 мл., який розміщений у фумігаційній камері для запобігання утворення тиску при введенні вуглекислого газу у камеру.

4 – ємність, в якій під тиском розміщений вуглекислий газ.

трубки скляні сифонові 1-2, 1-4; трубки гумові 1-1, 1-3, 1-5, 2-1;

затискачі а, б, в, г.

ження на шкідників до встановлення 90–99% показника їх загибелі. І навпаки, підвищували токсичну дію сумішей, якщо була необхідність у отриманні 100% загибелі.

Результати. Згідно отриманих результатів лабораторних досліджень виявлено різницю в чутливості комах до сумішей газів фосфіну з вуглекислим газом в залежності від їх стадії розвитку.

За результатами досліджень встановлено, що шкідник є найбільш стійким до сумішей газів фосфіну з вуглекислим газом саме на стадії яйця. Так, при фумігації за параметрів: експозиції 16 годин, концентрації фосфіну $0,42 \text{ г/м}^3$, вуглекислого газу $117,31 \text{ г/м}^3$ та температури $30 \text{ }^\circ\text{C}$, встановлено, що загибель імаго, личинок, лялечок та яєць зерноїда квасолевого становила на рівні $96,7 \pm 1,31$, $89,7 \pm 1,73$, $66,3 \pm 3,97$ та $58,3 \pm 3,46\%$ відповідно (рис. 2).

З рис. 2 видно, що стадія лялечки лише на 7,0% є менш стійкою до сумішей газів, порівняно з стадією яйця. Різниця загибелі між активними та неактивними стадіями була суттєва. Зокрема між стадією імаго та яйця становила 38,4%.

Подібну тенденцію чутливості стадій шкідника до суміші газів спостерігали і при температурі $22 \text{ }^\circ\text{C}$, ДКЧ $14,26$ годинограм. Проте, різниця загибелі між актив-

ними та неактивними стадіями була не в такій мірі значною. Між стадією імаго та яйця становила 18,7%, що обумовлено, ймовірно, температурним фактором. За низьких температур метаболізм у активних стадій комах значно знижений і це є основною причиною чому зерноїд на даних стадіях стає більш стійкішим до фумігантів.

Крім стадійної чутливості зерноїда квасолевого до сумішей фосфіну з вуглекислим газом спостерігали також і неоднакову загибель шкідника у різних його популяціях.

У наших дослідженнях були взяті дві популяції шкідника: №1 (лабораторна популяція) та №2 (з приватного господарства с. Малі Геївці Ужгородського району).

Слід зауважити, що різниця загибелі зерноїдів з різних популяцій при дії сумішей газів виявилася суттєвою. Так, 100% загибель зерноїда на стадії яйця популяції №1 виявляли за такими параметрами фумігації: температура $23\text{--}24 \text{ }^\circ\text{C}$, експозиція 28 годин, середня концентрація фосфіну $0,51 \text{ г/м}^3$, вуглекислого газу $117,37 \text{ г/м}^3$, ДКЧ_{по фосфіну} $14,23$ годинограмів. Проте, при дії сумішей газів за подібних параметрів проти зерноїдів на стадії яйця популяції №2, повної їх загибелі вже не виявляли (табл. 1).

Так, застосування сумішей газів ДКЧ_{по фосфіну} $14,82$ годинограмів, експозиції 24 годин, середньої

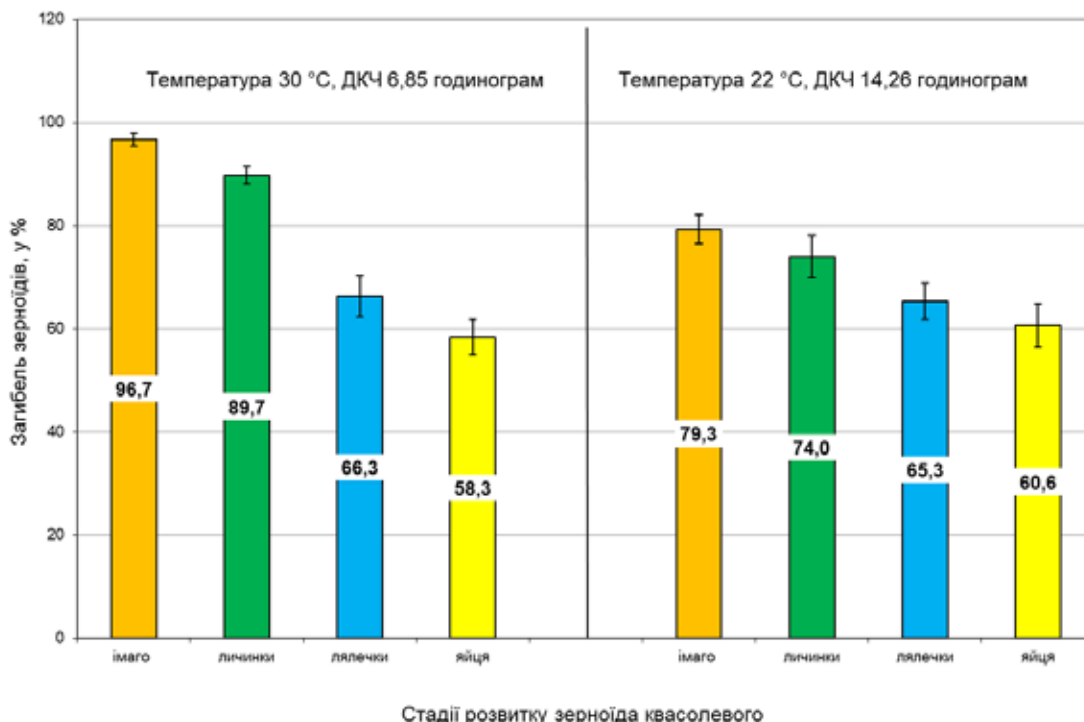


Рис. 2. Стадійна чутливість зернодіа квасолевого до сумішей фосфіну з вуглекислим газом за різних температур (лабораторні досліді, 2014–15, 2021–22 рр.)

Таблиця 1

Токсична дія сумішами фосфіну з вуглекислим газом проти різних популяцій зернодіа квасолевого на стадії яйця (лабораторні досліді, 2014–2015, 2021–2022 рр.)

Зерноді квасолевий	Температура, °C	Концентрація, г/м ³		Експозиція, годин	ДКЧ, годино-грамів	Загибель шкідника, у%
		РН ₃	СО ₂			
Популяція №1	23-24	0,51	117,37	28	14,23	100
Популяція №2	23-24	0,53	116,82	24	14,82	77,00±5,88
Популяція №2	23-24	0,48	116,74	42	20,18	90,67±6,91
Популяція №2	23-24	0,40	117,26	52	21,02	97,33±4,54
Популяція №2	23-24	0,49	117,69	60	29,25	100
Популяція №2	23-24	0,59	117,51	72	42,48	100
Популяція №1	25-26	0,36	116,58	28	10,14	100
Популяція №2	25-26	0,29	117,93	28	8,12	79,67±5,10
Популяція №2	25-26	0,41	117,68	42	17,37	98,33±1,73
Популяція №2	25-26	0,42	118,03	46	19,22	100
Популяція №2	25-26	0,56	116,61	48	26,74	100
Популяція №2	25-26	0,45	117,32	68	30,31	100
Популяція №2	25-26	0,55	117,33	66	36,60	100

концентрації фосфіну 0,53 г/м³ та вуглекислого газу 116,82 г/м³ (температура 23–24 °C), забезпечило лише 77,00±5,88% загибелі зернодіа на стадії яйця. Збільшення ДКЧ по фосфіну 20,18 та 21,02 годинограмів та експозиції до 42 та 52 годин відповідно, також не забезпечило 100% сумішей газів.

Подальше підвищення токсичного навантаження до ДКЧ по фосфіну 29,25 та 42,48 годинограмів, а також збільшення експозиції до 60 та 72 годин забезпечило 100% ефективність сумішей газів проти яєць зерноділ.

Аналогічно спостерігали і за вищих температур. Так, застосування сумішей газів проти зернодіа на стадії

яйця з першої популяції №1, спричиняло їх загибель за такими параметрами: температура 25–26 °C, експозиція 28 годин, середня концентрація фосфіну 0,36 г/м³, вуглекислого газу 116,58 г/м³, ДКЧ по фосфіну 10,14 годинограмів.

Тоді як застосування сумішей газів ДКЧ по фосфіну 8,12 годинограмів, експозиції 28 годин, середньої концентрації фосфіну 0,29 г/м³ та вуглекислого газу 117,93 г/м³, забезпечило лише 79,67±5,10% загибелі шкідника з популяції №2. При дії сумішей газів ДКЧ по фосфіну 17,37 годинограмів, експозиції 42 години, середньої концентрації фосфіну 0,41 г/м³ та вуглекислого газу 117,68 г/м³, забезпечило 98,33±1,73% загибелі.

Подальше підвищення токсичного навантаження до ДКЧ_{по фосфіну} 19,22; 26,74, 30,31 та 36,60 годиниграмів, а також збільшення експозиції до 46, 48 та 66 та 68 годин відповідно, забезпечило 100% ефективність сумішей газів проти зерноїдів (табл).

Обговорення. Загальновідомо, що неактивні стадії шкідників є більш стійкими до фумігантів, ніж активні. В той же час стійкість шкідників до знезараження може значно змінюватись, залежно від ряду чинників (Rajendran & Somiahnadar, 2020).

Так, проведені нами дослідження що до вивчення токсичної дії фтористого сульфуриту проти деяких шкідників запасів показали іншу стадійну чутливість комах до фуміганту. Встановлено, стадія яйця у значній мірі була стійкішою до фтористого сульфуриту, навіть порівняно з лялечками. В середньому на стадії яйця зерноїд квасолевий виявився у 7,2 рази більш стійким порівняно зі стадією лялечки, вогнівка млинова – у 16,0, а довгоносик комірний – у 16,5 рази відповідно (Romanko et al., 2014). Така суттєва різниця чутливості між ембріональними та постембріональними стадіями комах до фтористого сульфуриту обумовлена особливістю токсичної дії даного фуміганту.

Що до особливостей сумішей фосфіну з вуглекислим газом проти комах, то слід відзначити їх подібність з токсичною дією окремо взятого фосфіну (еталону) проти шкідників. А саме прослідковувалась чітка тенденція: до фосфіну як при окремій його дії так і у його суміші з вуглекислим газом шкідники виявилися більш стійкими на неактивних стадіях розвитку (лялечки чи яйця), порівняно з активними стадіями (імаго та личинки).

Подібні дані наводять й інші дослідники, які встановили, що при фумігації ECO2FUME проти карантинних зерноїдів, у *Callosobruchus chinensis* лялечка виявилась найбільш стійкою до фуміганту, а у *Callosobruchus maculatus* чутливість до фосфіну яєць та лялечок були на одному рівні (Manar et al., 2021).

Деякі дослідники вказують, що у *Tribolium castaneum* саме лялечки виявились найбільш стійкими до суміші фосфіну та вуглекислого газу (Meenatchi et al., 2021).

Фумігація ECO2FUME виявилась ефективною проти *Frankliniella occidentalis* на всіх стадіях. При чому, стадія личинки та лялечки були майже на однаковому рівні чутливості до фуміганту (Sait Erturk et al., 2018).

Група вчених вивчали залежність стійкості шкідника *Cryptolestes ferrugineus* до фосфіну на генетичному рівні. Залежно від різновиду генотипу стійкість до фуміганту може по різному змінюватися у всіх стадіях

шкідника. У чутливих комах показник зниження стійкості проходив в такій послідовності: яйця > лялечки > імаго > личинки. У гомозиготних стійких комах порядок толерантності був такий: імаго= яйце > лялечки > личинки, а у гетерозигот – личинки > яйця > лялечки > імаго. На всіх стадіях визначали резистентність, причому співвідношення резистентності найвище у імаго > лялечок > личинок > яєць (Muralitharan Venkidusamy et al., 2018).

Неоднакова чутливість різних популяцій одного виду шкідника до пестицидів, в тому числі і до фумігантів явище з нерідкісних (Maslov et al., 2007; Aaron Cato et al., 2019). Так, Маслов М. І. та його колеги стверджують, що при дії фосфіду алюмінію проти хрущаків, залежно від їх популяцій, спостерігали різну чутливість до фуміганту. За однакових параметрів знезараження, загибель шкідників лабораторної та індійської популяції становила 100 та 40% відповідно (Maslov et al., 2007).

Деякі автори вказують, що при фумігації фосфіном проти *Tribolium castaneum* спостерігали різну чутливість популяцій, яких поділяли на «чутливих» до фосфіну, «слабо стійких» і «сильно стійких». При чому, для успішної фумігації проти сильно стійких популяцій була необхідність збільшити тривалість експозиції на з 60 на 100 хв., порівняно з чутливими (Aaron Cato et al., 2019).

Таким чином, нами встановлено, що на стійкість до сумішей газів фосфіну з вуглекислим газом впливає не лише стадія шкідника, але і його популяція. Отримані нами дані будуть враховані при розробці режимів фумігації сумішами фосфіну та вуглекислого газу проти зерноїдів на різних стадіях розвитку.

Висновки. Встановлено, що *Acanthoscelides obtectus* є найбільш стійкою до сумішей фосфіну з вуглекислим газом на стадії яйця. Найменш стійкою виявилась стадія імаго. За температури 30 °С, при якій проходила фумігація сумішами, коефіцієнт стійкості стадій шкідника був на рівні: 1,00 1,08, 1,54 та 1,66 для імаго, личинок, лялечок та яєць відповідно. За температури 22 °С – коефіцієнт стійкості становив на рівні: 1,00 1,07, 1,21 та 1,31 для імаго, личинок, лялечок та яєць відповідно.

Встановлено, що на стійкість шкідників до сумішей газів фосфіну з вуглекислим газом впливає не лише стадія, але і їх популяція. Для забезпечення повної загибелі стійких популяцій зерноїдів на стадії яйця була необхідність збільшити токсичне навантаження в межах 1,9–2,1 разів, залежно від температури. Показник ДКЧ підвищували за рахунок тривалості експозицій.

Бібліографічні посилання:

1. Aaron, Cato, Edwin, Afful, Manoj K Nayak & Thomas, W Phillips (2019). Evaluation of Knockdown Bioassay Methods to Assess phosphine resistance in the red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Insects*, 10(5), 140. doi: 10.3390/insects10050140
2. *Callosobruchus chinensis* CABI digital library. doi.org/10.1079/cabicompendium.10986 Access mode: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.10986#sec-21>
3. *Callosobruchus maculatus*. CABI digital library. doi: 10.1079/pwkb.species.10987 Access mode: <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/10.1079/cabicompendium.10987>
4. Hartsell, P.L. & Muhareb, J.S. (2005). Efficacy of a mixture of phosphine / carbon dioxide on eight species of stored product insects. *Southwestern Entomologist* 30 (1), 47–54.

5. Hassan, A. Gad, Gomaa, F. Abo, Laban, Khaled, H. Metwaly, Fathia S. Al-Anany & Samir, A.M. Abdelgaleil (2021). Efficacy of ozone for *Callosobruchus maculatus* and *Callosobruchus chinensis* control in cowpea seeds and its impact on seed quality. *Journal of Stored Products Research*, 92, 101786. doi: 10.1016/j.jspr.2021.101786
6. Himanshi, Gupta, Deeksha, Urvashi, S. G. & Eswara, Reddy (2023). Insecticidal and detoxification enzyme inhibition activities of essential oils for the control of pulse beetle, *Callosobruchus maculatus* (F.) and *Callosobruchus chinensis* (L.) (Coleoptera: Bruchidae). *Molecules*, 28(2), 492. doi: 10.3390/molecules28020492
7. 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. doi.org/10.1016/j.jspr.2016.07.004
8. Jagadeesan, R., Singarayan, V.T, Chandra, K, Ebert, P.R., M.K. (2018). Potential of co-fumigation with phosphine (PH₃) and sulfuryl fluoride (SO₂F₂) for the management of strongly phosphine-resistant insect pests of stored grain. *J Econ Entomol.* 111 (6). P. 2956–2965. doi: 10.1093/jee/toy269
9. Kalpna, Younis, Ahmad Hajam & Rajesh, Kumar (2022). Management of stored grain pest with special reference to *Callosobruchus maculatus*, a major pest of cowpea. *Heliyon*, 8(1). E08703. doi: 10.1016/j.heliyon.2021.e08703
10. Khadim, Kébé, Nadir, Alvarez, Midori, Tuda, Göran, Arnqvist, Charles, W. Fox, Mbacké, Sembène & Anahí, Espíndola (2017). Global phylogeography of the insect pest *Callosobruchus maculatus* (Coleoptera: Bruchinae) relates to the history of its main host, *Vigna unguiculata*. *Journal of Biogeography*, 44(11), 2515–2526. doi: 10.1111/jbi.13052
11. Klechkovskyi, Y.E. & Neamtsu, E.F. (2019). Karantynni obrobky svizhykh ovochiv ta zrizediv kvitiv proty zakhidnoho kvitkovoho trypsa [Quarantine treatments of fresh vegetables and cut flowers against western flower thrips]. Quarantine and plant protection, 1–2, 14–17 doi: 10.36495/2312-0614.2019.1-2.1-4 (in Ukrainian).
12. Klechkovskyi, Yu. E., Chernei, L. B., Yashchuk, V. U. & Niamtsu, Ye. F. (2016). Suchasni problemy znezarazhennia pidkarantynnoi produktsii v Ukraini [Modern problems of decontamination of quarantined products in Ukraine]. *Bulletin of Agricultural Science*. N.2, 11–14. doi: 10.31073/agrovisnyk201602-03 (In Ukrainian)
13. Klechkovskyi, Yu. E. & Niamtsu, Ye. F. (2020). Kontrol chyselnosti kartoplanoi moli za vykorystannia mebrokarbonovykh sumishei [Control of the number of potato moth using mebrocarbon mixtures]. *Bulletin of Agricultural Science*, 98(1), 32–38.
14. 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), 1377–1383. doi: 10.1093/jee/tox101
15. Loganathan, M., Jayas, D.S., Fields, P.G. & White, N.D.G. (2011). Low and high temperatures for the control of cowpea beetle, *Callosobruchus maculatus* (F.) (coleoptera: Bruchidae) in chickpeas. *Journal of Stored Products Research*, 47(3), 244–248. doi: 10.1016/j.jspr.2011.03.005
16. Mamontov, V. A. (2006). Osoblivosti viznachennya letalnih norm pri fumlgatsiyi fosflinom [Peculiarities of determining lethal rates during phosphine fumigation]. *Protection and quarantine of plants*, 52, 308–315 (in Ukrainian).
17. 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
18. Manoj, K Nayak, Gregory, J Daglish, Thomas, W Phillips & Paul, R Ebert (2020). Resistance to the fumigant phosphine and its management in insect pests of stored products: A global perspective. *Annual Review of Entomology*, 65, 333–350. doi: 10.1146/annurev-ento-011019-025047
19. Maslov, M. I. Magomedov, U. Sh. & Mordkovich, Ya. B. (2007) Osnovyi karantinnogo obezzarazhivaniya [Fundamentals of quarantine disinfection]. *Nauch. Book, Voronezh*, 196 (in Russian).
20. 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), 503. doi:10.5539/jas.v10n7p503
21. Muralitharan Venkidusamy, Rajeswaran Jagadeesan, Manoj K. Nayak, Mohankumar Subbarayalu, Chandrasekaran Subramaniam, Patrick J. Collins (2018) Relative tolerance and expression of resistance to phosphine in life stages of the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus*. *Journal of Pest Science*, 91, 277–286 doi: 10.1007/s10340-017-0875-7
22. Patent. 48293 UA, МПК C01B25/06 (2006.01), G01N7/00 (2006.01) Mamontov. V. A., Romanko V. O. (2010). Prys-trii dlia vymiriuvannia vysokikh kontsentratsii fosfinu [Device for measuring high concentrations of phosphine]. The applicant is the Transcarpathian Territorial Plant Quarantine Center of the Plant Protection Institute of the Ukrainian Agrarian Academy of Sciences. № u 200910100; was filled 5.10.2009; was published 10.03.2010. *Bulletin № 5* (in Ukrainian).
23. Rajendran, Somiahnadar (2020). Insect Pest Management in Stored Products *Outlooks on Pest Management*, 31(1), 24–35. doi: 10.1564/v31_feb_05
24. Rajeswaran Jagadeesan, Manoj K Nayak (2017) Phosphine resistance does not confer cross-resistance to sulfuryl fluoride in four major stored grain insect pests. *Pest Manag Sci.* Vol. 73. Issue 7. P.1391-1401. DOI: 10.1002/ps.4468
25. Rajeswaran, Jagadeesan, Virgine, T Singarayan & Manoj, K Nayak. (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), 4009–4015. doi.org/10.1002/ps.6424
26. Romanko, V. O. (2015). Perspektyvy zastosuvannia sumishei haziv u fumihatsii zernobobovoi produktsii proty karantynnykh vydiv rodu *Callosobruchus* [Prospects for the use of gas mixtures in the fumigation of grain and leguminous products against quarantine species of the genus *Callosobruchus*]. 15th international scientific conference “Uzhhorod

entomological readings – 2015” (abstracts of reports). September 25–27, Uzhgorod, 66 URL: https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/4194/1/UER_2015-proceedings.pdf (in Ukrainian).

27. Romanko, V.O., Zhuravchak, T.M. & Bokshan, O.Ya. (2014). Ovitsydna diia ftorystoho sulfurylu proty shkidnykiv zapasiv [Ovicidal action of sulfuryl fluoride against stock pests]. *Protection and quarantine of plants*, 60, 261–267 URL: <http://zkr.ipp.gov.ua/index.php/journal/issue/view/6/60-pdf> (in Ukrainian).

28. Sait, Erturk, Fatih, Şen & Mustafa, Alkan (2018), Effect of different phosphine gas concentrations against *Frankliniella occidentalis* (Pergande, 1895) (Thysanoptera: Thripidae) on tomato and green pepper fruit, and determination of fruit quality after application under low-temperature storage conditions. *Turkish Journal of Entomology*, 42(2), 85–92. <https://doi.org/10.16970/entoted.349683>

29. Singh, T. Boopathi (2022) *Callosobruchus chinensis* (Coleoptera: Chrysomelidae): Biology, life table parameters, host preferences, and evaluation of green gram germplasm for resistance *Journal of Stored Products Research*. Vol. 95 101912 doi.org/10.1016/j.jspr.2021.101912 [In English]

30. URL:https://www.researchgate.net/publication/288557410_Efficacy_of_a_mixture_of_phosphinecarbon_dioxide_on_eight_species_of_stored_product_insects

31. Weining Cheng, Jiaxin Lei, Ji-Eun Ahn, Yu Wang, Chaoliang Lei, Keyan Zhu-Salzman (2013). CO₂ enhances effects of hypoxia on mortality, development, and gene expression in cowpea bruchid, *Callosobruchus maculatus*. *Journal of Insect Physiology*, 59(11), 1160–1168. doi: 10.1016/j.jinsphys.2013.08.009

32. Wöhr, A. & Frey, A. (2020). Handbook for Montreal Protocol on substances that deplete the ozone layer. Freiburg in Breisgau, Germany, 936. ISBN: 978-9966-076-79-3 Access mode: URL: <https://ozone.unep.org/sites/default/files/Handbooks/MP-Handbook-2020-English.pdf>

Romanko V. O., PhD (Agricultural Sciences), Associate Professor, Uzhhorod National University, Uzhhorod, Ukraine
Fumigation with mixtures of phosphine and carbon dioxide against bean weevils at different stages of development

The work is devoted to the search for alternatives to methyl bromide – a universal fumigant, which was restricted in use at the request of the Montreal Protocol. The article presents the results of the toxic action of mixtures of phosphine gases with carbon dioxide against pests of legume products.

Purpose: study of the toxic effect of a mixture of phosphine and carbon dioxide against bean weevils at different of their stages of development and populations. Objects of research. Acanthoscelides obtectus Say at different of their stages of development and populations. The research material is the preparative form of phosphine “Magtoxin” (tablet form) produced by Detia Degesch GmbH, carbon dioxide in cylinders. Methods: analytical review of the research topics, the current regulatory framework in the field of fumigation; analysis of biological characteristics of bean weevils; experimental – establishment of 100% effectiveness of phosphine with carbon dioxide against pests in laboratory conditions with appropriate equipment; mathematical and statistical – with the help of computer mathematical functions built into the Microsoft Excel 2003 program.

During fumigation at a CT Product of 6.85 and a temperature of 30 °C, the mortality of adults, larvae, pupae and eggs of the bean weevil was determined at the level of 96.7±1.31, 89.7±1.73, 66.3±3, 97 and 58.3±3.46%, respectively. During fumigation at a CT Product of 14.26 and a temperature of 22 °C, the mortality of adults, larvae, pupae and eggs of the bean weevil was determined at the level of 79.3±2.85, 74.0±4.08, 65.3±3.54 and 60.6±4.28%, respectively. In order to ensure 100% mortality of resistant populations of Acanthoscelides obtectus in the egg stage, it was necessary to increase the indicators of a CT Product from 10.14–14.23 to 19.22–29.25 depending on the temperature.

Acanthoscelides obtectus in the egg stage was the most resistant to fumigation with gas mixtures at different temperatures. Pupae are only 7.0% less resistant to gas mixtures compared to the egg stage. The difference in mortality between active and inactive stages was 38.4 and 18.7% at temperatures of 30 and 22 °C, respectively.

The obtained results indicate the need for further research in the direction of a more detailed study of the population stability of bean weevils during fumigation with gas mixtures.

Key words: alternative to methyl bromide, concentration, populations and stages of *Acanthoscelides obtectus*.