

УДК 614.841

М. В. Білошицький, канд. хім. наук, Н. В. Кравченко, О. М. Тесленко,  
Д. О. Добряк, С. З. Цимбалістий,  
Український науково-дослідний інститут цивільного захисту

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ ТОКСИЧНОЇ ДІЇ ПРОДУКТІВ ГОРІННЯ НА ЛЮДИНУ

У даній статті наведено аналіз газоподібних токсичних продуктів горіння, які утворюють дисперсійне середовище, а також розглянуто їх вплив на людину. Визначені ефекти адитивності, синергізму та антагонізму при комбінованій дії на людину токсичних продуктів горіння.

Дисперсною фазою диму є тверді частинки сажі, золи і смоляні частинки, дисперсійним середовищем - газ, тобто газоподібні продукти повного і неповного згорання.

На сьогоднішній день небезпеку диму оцінюють окремо по кожній його фазі: визначають щільність диму без врахування складу продуктів горіння або термічного розкладання, і окремо досліджують склад продуктів горіння не враховуючи стану і властивості дисперсної фази. По кожному з названих показників оцінюють небезпеку того чи іншого органічного матеріалу в умовах пожежі, причому окремо отримані результати поки не об'єднуються будь-яким єдиним критерієм небезпеки диму. Таке роздільне дослідження небезпеки диму пов'язано з технічними труднощами визначення загальної небезпеки диму. В умовах пожежі людина буде піддаватися комбінованій дії складної суміші токсичних речовин тому недостатньо знати, які гази і в якій кількості містяться в повітрі, потрібно ще знати, як вони будуть діяти спільно, причому вплив залежить не тільки від видів горючих органічних матеріалів, а й від умов горіння. Одночасне потрапляння продуктів горіння матеріалів, які складаються з значної кількості хімічних елементів, може мати неоднозначні ефекти такі як синергізм або антагонізм.

Ідея проведення такого дослідження виникла під час виконання науково-дослідної роботи – провести дослідження щодо удосконалення методики розрахунку часу евакуації людей з будинків та споруд під час пожежі «Евакуація-методика». Під час виконання даної науково-дослідної роботи проводився детальний аналіз всіх чинників, які впливають на евакуацію людей з приміщень та споруд різного призначення та граничних значень небезпечних чинників пожежі. За результатами проведеної роботи виникло питання більш ретельного вивчення впливу газоподібних токсичних продуктів горіння на людину. Адже, перелік речовин та матеріалів, які використовуються в будівництві та в побуті значно збільшився, а вплив взаємодії хімічних продуктів горіння цих матеріалів один з одним має недостатнє дослідження.

Метою даного дослідження є визначення переліку газоподібних продуктів горіння речовин і матеріалів, які широко використовуються у будівництві і побуті, їх вплив на людину, а також пошук даних щодо комбінованої дії токсичних продуктів горіння на людину.

**Ключеві слова:** адитивність, синергізм, антагонізм, токсичність, концентрація.

Під час пожежі внаслідок горіння природних, синтетичних і полімерних матеріалів (далі – органічні матеріали) утворюється складна суміш різних речовин зі своїми фізико-хімічними властивостями, яка є надзвичайно токсичною для людини.

Найбільшу небезпеку, з точки зору токсичності продуктів горіння, являють собою органічні матеріали, достатньо поширені у сучасному будівництві і побуті.

Згідно з численними дослідженнями, горіння органічних матеріалів в умовах

пожежі супроводжується значним димоутворенням.

Відомо, що дим – це дисперсна система. Дисперсною фазою диму є тверді частинки сажі, золи і смоляні частинки, дисперсійним середовищем - газ, тобто газоподібні продукти повного і неповного згорання: оксид вуглецю (IV), оксид вуглецю (II), водяна пара, азот, вуглеводні, водень тощо [1].

Під час руху від осередку пожежі дим розбавляється повітрям, і дисперсійним

середовищем диму стає суміш повітря з продуктами повного і неповного згорання [1,2].

Дисперсна фаза має розвинену поверхню, а отже, значну поверхневу енергію, і являється системою нестійкою: одночасно відбуваються процеси збільшення частинок і утворення на їх поверхні внаслідок адсорбції шару газо- і пароподібних речовин. Необхідно відзначити, що із зниженням температури диму адсорбційна здатність його збільшується.

В результаті зазначених довільних процесів частки диму збільшуються і випадають на поверхні предметів, стін, підлоги тощо.

Таким чином, можна стверджувати, що дим має певний термін «життя».

Утворення диму в процесі термічного розкладання і горіння матеріалів пов'язано з хімічними процесами окиснення, що протікають під впливом температури, а також з фізичними процесами. До числа хімічних процесів необхідно віднести хімічний недопал органічного матеріалу, тобто неповноту згорання речовин, що утворилися при термічному розкладанні органічного матеріалу внаслідок недостатності окисника і зниження температури при збільшенні віддалі від осередку пожежі, за якої не відбувається повне згорання продуктів термічного розкладання горючих речовин. Величина хімічного недопалу визначається за наявністю у складі продуктів горіння або термічного розкладання вуглецю, водню, вуглеводнів, смоляних речовин, сажі. Величина хімічного недопалу залежить від природи органічного матеріалу і умов, за яких протікає горіння [1].

До числа фізичних факторів, які впливають на процес димоутворення, у першу чергу слід віднести газодинамічні, які впливають не тільки на швидкість хімічних перетворень, а й на процес утворення диму і на його розсіювання. Газові потоки, що виникли внаслідок різниці температур і інших причин, захоплюють з собою димові частинки.

Швидкість поширення диму у приміщенні і його рух залежать від ширини прорізів і пожежної навантаги, тобто тепла, що виділяється при горінні.

Середня швидкість поширення диму на пожежі по вертикалі становить, за

даними японських дослідників, (2-3) м/с, а по горизонталі – (0,5-0,7) м/с [1].

Швидкість може значно змінюватися залежно від співвідношення площі вогнища пожежі до площі приміщення, наявності прорізів для припливу свіжого повітря.

При пожежі дим створює зону задимлення, під якою розуміють частину простору, що примикає до зони горіння і заповнена димовими газами в концентраціях, які створюють загрозу життю і здоров'ю людей або ускладнюють дію пожежних підрозділів. Зона задимлення - найбільша частина простору в умовах пожежі. Це пояснюється тим, що дим легко втягується в рух слабкими конвективними потоками, а при наявності потужних конвективних потоків дим швидко поширюється на значні відстані.

Крім того, дисперсна фаза, маючи розвинену поверхню, має велику сорбційну здатність. Багато токсичних продуктів термічного розкладання і горіння (хлорид водню, ціанід водню, хлор, фосген, двооксид вуглецю і оксид вуглецю та інші газоподібні і пароподібні продукти) здатні адсорбуватися на поверхні дисперсної фази [1].

Особливе значення зона задимлення і зміни її параметрів у часі мають на внутрішніх пожежах у будинках і приміщеннях.

Газоподібне дисперсне середовище містить продукти горіння і термічного розкладання, які є токсичними, що представляє собою головну причину смертельних випадків при пожежі (за статистикою США і Великобританії – до 70% смертельних випадків при пожежі [1]).

Склад продуктів горіння і термічного розкладання залежить головним чином від природи органічного матеріалу, а кількісний вміст продуктів - від умов горіння (температура оточуючого середовища, кількість повітря, що потрапляє під час горіння).

Частинки сажі, золи, смолоподібні речовини знижують видимість в диму, що не дає можливості швидко покинути приміщення і також знижує ефективність гасіння пожежі. Якщо видимість в диму стає менш (10-12) м, то у людей виникає панічний стан. Тверді частинки, що містяться, в диму, проникають в дихальні шляхи на різну глибину залежно від їх розміру. Газоподібні і розчинні продукти горіння швидко проникають в кров, а

нерозчинні можуть осідати в легенях або бронхах, і їх видалення з організму є досить важким.

Небезпека диму для людини в умовах пожежі виявляється у його комбінованій дії. Так, у багатьох дослідженнях відмічається, що хлорид водню, що утворюється при горінні, легко адсорбується димовими частками. Тому, тверда і рідка фаза диму є не тільки середовищем, що поглинає світло і різко знижує видимість, але також токсичною фазою диму [1].

На сьогоднішній день безпеку диму оцінюють окремо по кожній його фазі: визначають щільність диму (дисперсна фаза) без врахування складу продуктів горіння або термічного розкладання, і окремо досліджують склад продуктів горіння (дисперсне середовище), не враховуючи стану і властивості дисперсної фази. По кожному з названих показників оцінюють безпеку того чи іншого органічного матеріалу в умовах пожежі, причому окремо отримані результати поки не об'єднуються будь-яким єдиним критерієм безпеки диму.

З цієї причини оцінка органічного матеріалу за димоутворювальною здатністю (щільність диму) відрізняється від оцінки його за токсичністю продуктів горіння або термічного розкладання. Таке роздільне дослідження безпеки диму пов'язано з технічними труднощами визначення загальної безпеки диму. Слід зазначити, що перелік токсичних продуктів горіння, за якими за вимогами нормативних документів з пожежної безпеки визначають критичну тривалість пожежі  $t_{кр}$  (с) за умови досягнення кожним з газоподібних токсичних продуктів горіння гранично допустимих значень в зоні перебування людей досить обмежений: двооксид вуглецю ( $CO_2$ );- оксид вуглецю (CO) або чадний газ; хлористий водень (HCl).

Метою даного дослідження є визначення переліку газоподібних продуктів горіння речовин і матеріалів, які широко використовуються у будівництві і побуті, їх вплив на людину, а також пошук даних щодо комбінованої дії токсичних продуктів горіння на людину.

Найбільш часто утворюються і є потенційно небезпечними продуктами термічного розкладання і горіння органічних матеріалів наступні хімічні

речовини: оксид вуглецю (IV), оксид вуглецю (II), хлорид водню, сірчистий газ, сірководень, оксиди азоту, хлор, альдегіди, ціанід водню [1,2].

Експерименти показують, що при наявності кисню повітря вуглець органічної речовини, в основному, перетворюється в оксид вуглецю (IV).

Максимальне утворення оксиду вуглецю (IV) спостерігається при повному окисненні всього вуглецю, що входить до складу органічного матеріалу, і може бути обчислено за рівнянням реакції.

У реальних умовах горіння частина вуглецю, що входить до складу органічного матеріалу, перетворюється у різноманітні речовини. Це пов'язано найчастіше з нестачею кисню, що надходить на горіння, а також термічною дисоціацією оксиду вуглецю (IV) при високих температурах на оксид вуглецю (II) і кисень. Частина вуглецю органічного матеріалу при його горінні утворює дисперсну сажоподібну фазу диму. Крім того, вуглець органічного матеріалу входить до складу вуглецевого залишку (коксівого залишку).

Тому, кількісний вміст оксиду вуглецю (IV) у продуктах горіння завжди менше, ніж згідно з хімічною реакцією горіння. Оксид вуглецю (IV) здатний вступати в різні реакції (з вуглецем, металами тощо), при яких він відновлюється до оксиду вуглецю (II):



Розглянемо токсичні властивості продуктів згорання та їх вплив на людину.

Оксид вуглецю (IV) має явну наркотичну дію, подразнює шкіру і слизові оболонки. Токсичні властивості проявляються тільки при високих концентраціях. Оксид вуглецю (IV) є сильним стимулятором дихання. При концентрації, що дорівнює 3% об., легенева вентиляція подвоюється [1,2].

Оксид вуглецю (II) - безбарвний газ, без запаху і подразнювальних властивостей, малорозчинний у воді.

Оксид вуглецю (II) - продукт неповного згорання органічного матеріалу, що містить вуглець.

Оксид вуглецю легко дифундує через пористі матеріали, цегляні стіни, ґрунт тощо. У літературі описується багато випадків отруєння людей в результаті

дифузії оксиду вуглецю (II) на великі відстані від місць його утворення. Оксид вуглецю (II) погано сорбується пористими речовинами.

В умовах пожежі дим, що утворюється, під час руху від осередку пожежі охолоджується. При цьому відбувається конденсація водяної пари спільно з розчиненими в ній продуктами горіння - хлоридом водню, аміаком і іншими газоподібними продуктами.

Частина газоподібних продуктів горіння сорбується твердою фазою диму і твердими пористими тілами. У цілому це призводить до того, що концентрація цих речовин в складі диму знижується, але вміст оксиду вуглецю (II) у димі не тільки зберігається, але і збільшується. Це призводить до того, що при пожежах утворення оксиду вуглецю (II) може представляти для людини більшу загрозу, ніж інші продукти горіння або термічного розкладання, якщо навіть за токсичністю вони перевершують оксид вуглецю (II).

Велика небезпека оксиду вуглецю (II) для людини визначається в першу чергу тим, що оксид вуглецю (II) утворює зв'язок гемоглобіном.

При цьому утворюється стійкий карбоксигемоглобін, внаслідок чого порушується і навіть припиняється нормальна функція гемоглобіну - зв'язування і перенесення кисню по організму людини. Симптоми отруєння оксидом вуглецю зіставляють з вмістом карбоксигемоглобіну в крові: якщо його вміст в крові вище 60 %, то це смертельно. Летальна концентрація оксиду вуглецю (II) при експозиції 1-3 хв становить 14 г/м<sup>3</sup>, гранично допустима - 0,02 г/м<sup>3</sup>.

Хлорид водню - продукт термічного розкладання і горіння органічних матеріалів, що містять хлор, наприклад, полівінілхлорид (ПВХ).

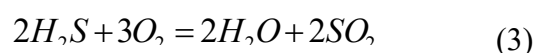
Хлорид водню легко сорбується твердою фазою диму. Експерименти показують, що до 90 % всього хлориду водню, який утворюється при горінні ПВХ разом з мікрокраплинами води, міститься на поверхні твердих димових частинок. Велика розчинність у воді, висока сорбційна здатність хлориду водню зменшують його небезпеку для людини в умовах пожежі, полегшують захист від нього. Якщо в продуктах горіння або термічного

розкладання разом з ним утворюється аміак, то при охолодженні диму (нижче 240°C) відбувається взаємодія між зазначеними речовинами. В результаті чого утворюється малотоксична речовина - хлорид амонію:



Це призводить до різкого зниження загальної токсичності продуктів розкладу або горіння органічних матеріалів. Небезпечна концентрація хлориду водню становить (1-1,6) г/м<sup>3</sup>. Хлорид водню не тільки є токсичним газом, але він викликає корозію металів, руйнування бетону, цементу. Відомі випадки, коли збиток від корозійної дії значно перевищував збитки від пожежі [1,2].

Сірководень - безбарвний газ з характерним запахом тухлих яєць. Температура кипіння його мінус 60,8 °С. Це горючий газ, при горінні утворює воду і двооксид сірки:



Область займання сірководню (4,3-46) % об., температура самозаймання 246 °С. Досить часто зустрічається у повітрі промислових підприємств. Сірководень утворюється при горінні і термічному розкладанні сірковмісних органічних матеріалів, гуми, вовни тощо. У невеликих концентраціях сірководень діє на слизові оболонки очей, дихальних шляхів, викликає печіння, сльозотечу, а також світлобоязнь. У великих концентраціях викликає судоми і швидку смерть від зупинки дихання. Концентрація 1 мг/л викликає смерть протягом 2 хв. Присутність вуглеводнів посилює токсичну дію сірководню [1,2].

Оксид сірки (IV) або сірчистий газ - безбарвний газ з характерним запахом, важче повітря. Оксид сірки (IV) утворюється всюди, де відбувається спалювання або горіння сірковмісних органічних матеріалів з різних органічних і неорганічних речовин. Оксид сірки (IV) подразнює верхні дихальні шляхи і при досить великих концентраціях - слизову оболонку легень. Фізіологічно шкідлива дія оксиду сірки (IV) складається з поглинання його вологою поверхнею слизових оболонок із послідовним утворенням на них сірчистої та сірчаної кислот. Гранично допустима

концентрація оксиду сірки (IV) у повітрі становить  $10 \text{ мг/м}^3$  [1,2].

Азотомісткі продукти термічного розкладання і горіння. Азот, що міститься в органічному матеріалі, може утворити такі газоподібні продукти термічного розкладання і горіння: молекулярний азот ( $N_2$ ), аміак ( $NH_3$ ), оксиди азоту ( $NO$ ) і ( $NO_2$ ), ціанід водню  $HCN$ , аміни  $R-CH_2-NH_2$ .

При термоокислювальному розкладанні і горінні азотовмісної органічної речовини енергетично вигідніше азоту виділитися у вигляді аміаку або молекулярного азоту. Утворення ціаніду водню і оксидів азоту - енергоємкі процеси, здатні протікати тільки при високих температурах, експериментальні дані підтверджують цю думку. Утворення ціаніду водню і оксидів азоту дійсно має місце тільки при високих температурах. Кількісне утворення ціаніду водню пов'язано не тільки з високою температурою, але і з певною кількістю присутнього у повітрі кисню [1].

Ціанід водню (синильна кислота) безбарвна рідина з температурою кипіння  $25,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ціанід водню добре розчинний у воді і органічних розчинниках. Встановлено, що розчинність ціаніду водню знижується з підвищенням температури розчину.

При температурі  $37 \text{ }^\circ\text{C}$  тобто при температурі людського тіла, розчинність ціаніду водню у воді становить  $10,1 \text{ моль/л}$ , або  $166 \text{ мл/мл}$ , відповідна розчинність для кисню, азоту, двооксиду вуглецю дорівнює  $0,023$ ,  $0,013$  і  $0,54 \text{ мл/мл}$ . Таким чином, розчинність ціаніду водню в воді в  $300$  разів вище розчинності двооксиду вуглецю і в  $7000$  разів вище розчинності кисню. Аналогічна картина спостерігається і при розчинності ціаніду водню у рідинах, що містяться в людському тілі. Це явище багато в чому пояснює токсичний ефект продуктів термічного розкладання і горіння матеріалів, що утворюють ціанід водню. При вдиханні велика частина ціаніду водню абсорбується і розчиняється у носоглотці, а також в бронхах і альвеолах легень. У чистому вигляді ціанід водню досить стійкий, але в присутності вологи і у водних розчинах лугів піддається гідролізу, утворюючи аміак і мурашину кислоту.

Перебуваючи в складі диму, ціанід водню частково сорбується твердими частинками диму, частково розчиняється у

водяних краплях, досить добре поглинається пористими матеріалами. Сорбційна здатність деяких матеріалів по відношенню до ціаніду водню,  $\text{мг на } 100 \text{ г матеріалу}$ , має наступні значення: гума -2, полотно-13,6, шкіра -36,4, перо - 49,6, фетр - 74,4, солома волога-126,3.

Це в якійсь мірі частково знижує небезпеку ціаніду водню в умовах пожежі, виводить його зі складу продуктів розкладання або горіння під час руху диму від осередку горіння. Ціанід водню є нервовою отрутою, має високу здатність проникати через шкіру. Згідно [2], концентрація  $12 \text{ мг/м}^3$  небезпечна при п'ятихвилинній експозиції через отруєння через шкіру навіть при диханні через протигаз. Токсичні концентрації ціаніду водню (синильної кислоти) для людини,  $\text{г/м}^3$ :

- 0,3 - смерть через 5 хв;
- 0,2 - смерть через 10 хв;
- 0,15 - смерть через 30 хв;
- 0,1 - небезпечна для життя, смерть

зазвичай

настає протягом першої години

- (0,05-0,06) – безпечно переноситься протягом 0,5-1 год.

Ціанід водню виділяється при термічному розкладанні і горінні матеріалів, що містять азот (вовна, поліакрилонітріл, пінополіуретан, поліаміди тощо) [1,2].

Оксид азоту (II) - безбарвний газ з температурою кипіння мінус  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Оксид азоту утворюється не тільки при горінні азотовмісних органічних речовин і матеріалів, але і при спалюванні палива.

Оксид азоту (IV) - жовтувато-бурий газ з різким запахом. Відчуття запаху спостерігається при концентраціях  $200 \text{ мг/м}^3$ . При температурі нижче  $140 \text{ }^\circ\text{C}$  диоксид азоту (IV) частково перетворюється в  $N_2O_4$ . Вище  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  оксид азоту (IV) розкладається на оксид азоту (II) і кисень. При дії води і вологи повітря утворює азотну і азотисту кислоти. Оксид азоту (IV) має виражену подразнювальну дію на дихальні шляхи, особливо глибокі, що у важких випадках може привести до токсичного набряку легень. Має загальнотоксичну дію. Гранично допустима концентрація в перерахунку на  $N_2O_5$  становить  $5 \text{ мг/м}^3$ .

Аміак ( $NH_3$ ) – безбарвний газ з різким запахом, добре розчинний у воді. Аміак викликає сильну подразнювальну і

пекучу дію на слизові оболонки. Викликає сильну сльозотечу і біль в очах, задуху, напад кашлю, запаморочення, блювоту, можливі набряки легень і голосових зв'язок. Концентрація  $0,350 \text{ г/м}^3$  -  $0,700 \text{ г/м}^3$  небезпечна для життя людини.

Під час пожежі аміак може виділятися у складі продуктів горіння вовни, шовку, поліакрилонітрилу, поліаміду і поліуретану [1,2].

Фосген (хлороокис вуглецю,  $\text{COCl}_2$ ) – безбарвний газ з запахом прілих фруктів і сіна. Відноситься до числа надзвичайно токсичних сполук. У невеликих концентраціях викликає подразнення слизових оболонок верхніх дихальних шляхів і очей, сльозоточивість, кашель, нудоту.

Утворення фосгену можливо при термічному розкладанні ПВХ і інших органічних матеріалів, що містять хлор [2].

Вінілхлорид ( $\text{H}_2\text{C} = \text{CH}-\text{Cl}$ ) – безбарвний газ з температурою плавлення мінус  $159,7 \text{ }^\circ\text{C}$ . Кипить при температурі мінус  $13,9 \text{ }^\circ\text{C}$ . Вінілхлорид погано розчинний в воді, добре розчиняється у спиртах і ефірах. Щільність за повітрям становить 2,4, гранично допустима концентрація вінілхлориду становить  $0,03 \text{ г/м}^3$ . На початку 70-х років було виявлено, що вінілхлорид в певних дозах викликає онкологічні захворювання [1].

Альдегіди. За фізичними властивостями альдегіди являють собою газоподібні та рідкі речовини, добре розчинні у воді. На людський організм вони діють як наркотики, подразнюють слизові оболонки очей і дихальні шляхи. Частіше при термічному розкладанні і горінні органічних матеріалів утворюються альдегіди: формальдегід  $\text{CH}_2\text{O}$ , ацетальдегід  $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$  і акролеїн [1].

Формальдегід - газ з різким запахом, добре розчинний у воді. Легко конденсується з аміаком і амінами. Формальдегід - подразнювальний газ, викликає кон'юнктивіт, нежить, бронхіт, запалення або підвищену чутливість шкіри до подразнень, слабкість і безсоння, відчуття сп'яніння. Легка подразнювальна дія спостерігається при концентраціях від  $0,001$ - $0,095 \text{ мг/л}$  гранично допустима концентрація формальдегіду становить  $0,001 \text{ г/м}^3$ .

Ацетальдегід (етаналь) - легко кипляча рідина (температура кипіння  $+20 \text{ }^\circ$

$\text{C}$ ) з сильним запахом (поріг сприйняття близько  $0,0001 \text{ мг/л}$ ), їдкий запах відчувається вже при концентрації  $0,004 \text{ мг/л}$ . Ацетальдегід змішується зі спиртами та ефірами. Ацетальдегід здатний доволно окислюватися в оцтову кислоту. При високих концентраціях (більше  $0,4 \text{ мг/л}$ ) ацетальдегід викликає ядуху, різкий кашель, головні болі, запалення, бронхіти. Гранично допустима концентрація становить  $0,005 \text{ г/м}^3$ .

Акролеїн (пропеналь) [3] - безбарвна рідина з запахом присмаленого жиру. Молекула акролеїну має подвійний зв'язок, що обумовлює його високу реакційну здатність. Внаслідок своєї високої реакційної здатності акролеїн є токсичною сполукою, що сильно подразнює слизові оболонки очей і дихальних шляхів. Максимально разова гранично допустима концентрація в повітрі  $0,03 \text{ мг/м}^3$ . Середньодобова гранично допустима концентрація у повітрі  $0,01 \text{ мг/м}^3$  [1].

Поріг сприйняття  $0,004 \text{ г/м}^3$ . При короткочасному впливі викликає печіння в очах, сльозотечу, набряк повік, кашель, при великих концентраціях - запаморочення, болі в животі, нудоту, блювоту, у важких випадках - уповільнення пульсу, зниження рівня цукру в крові, похолодання кінцівок, оніміння кінчиків пальців, розширення зіниць, втрата свідомості.

Можлива втрата свідомості і набряк легень. Встановлено, що концентрація акролеїну  $0,013 \text{ г/м}^3$  переноситься не більше 1 хв,  $0,002 \text{ г/м}^3$  – протягом 2-3 хв викликає подразнення слизової оболонки носа. Через 5 хв подразнення стає нестерпним. Летальні концентрації у разі дії акролеїну становлять ( $0,075$  –  $0,350$ )  $\text{г/м}^3$  [1].

Джерелами виділення парів акролеїну являються деревина, поліетилен, поліпропілен, поліметилметакрилат, папір, нафтопродукти.

Відомо, що при певних умовах горіння деяких органічних матеріалів (безполум'яне при температурі  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ ) акролеїн може представляти більшу небезпеку, ніж монооксид вуглецю [3].

Дослідження проб повітря в умовах реальних пожеж дозволило виявити пари акролеїну у такій концентрації, яка може викликати подразнювальну і загально-токсичну дію, а в деяких випадках привести до смерті [1,2].

Антипірени, що підвищують стійкість оброблених матеріалів до високої температури, нерідко збільшують рівень утвореного при безполуменовому горінні акролеїну в 3-5 і більше разів [1].

У таблиці 1 наведено типові концентрації продуктів згорання при пожежі у жилих будинках (одиниці вимірювання концентрації ppm, частин на мільйон).

Таблиця 1 – Типові концентрації продуктів згорання при пожежі у жилих будинках [3]

Продукти горіння	Концентрація, ppm, частин на мільйон		Концентрація смертельно небезпечна для життя і здоров'я, ppm, (частин на мільйон)
	Середня	Максимальна	
Акролеїн	1,9	98	5
Бензол	4.7-56	250	3000
Оксид вуглецю	246-1460	27000	1500
Хлорид водню	0,8-13	280	100
Ціанід водню	0,14-5,0	75	50
Двооксид азоту	0,04-0,7	9,5	50
Сірчаний ангідрид	2,3	42	100
Дисперсні тверді частки	232	15000	Немає даних

Таким чином, є ряд токсичних сполук, що мають високу біологічну активність, до яких відносяться такі токсичні речовини, як оксид вуглецю (II), ціанід водню, хлорид водню, оксиди азоту, акролеїн, ацетонітрил тощо. Токсичність газо-аерозольних сумішей, що утворюється в результаті згорання деяких матеріалів в сучасних будівлях, пов'язують з використанням у будівельних матеріалах, в елементах меблів і шпалер органічних композицій таких, як жорсткі поліуретани, полістирол, мінеральні та целюлозні волокна. Головною токсичною речовиною називають синильну кислоту, яка вивільняється з азотовмісних органічних матеріалів, таких як поліуретан.

Слід звернути увагу на той факт, що при практично рівних концентраціях з бензолом і сірчистим ангідридом в продуктах горіння акролеїн в даному контексті має більш високу смертельну токсичність в 600 і 20 разів у порівнянні з цими компонентами, відповідно. Цей показник не менше ніж в 10 разів є більш ймовірним джерелом смертельних отруєнь, ніж ціанід водню і двооксид азоту. Акролеїн активно утворюється при термічному розкладанні високомолекулярних органічних продуктів (наприклад, целюлози), що необхідно враховувати при оцінці ймовірних токсигенних ефектів такого роду матеріалів.

Крім того, не можна виключати і комбінованої дії акролеїну з іншими компонентами продуктів горіння органічних матеріалів, враховуючи характер взаємодії акролеїну з оксидом вуглецю (II), ціанідами та іншими токсичними продуктами згорання.

В умовах пожежі людина буде піддаватися комбінованій дії складної суміші токсичних речовин.

Недостатньо знати, які гази і в якій кількості містяться в повітрі, потрібно ще знати, як вони будуть діяти спільно. У багатьох роботах відзначається, що вивчення впливу окремих газів на тварин недостатньо, так як дим містить велику кількість різних продуктів термічного розкладання, причому вплив залежить не тільки від видів горючих органічних матеріалів, а й від умов горіння. Вказується, що одні гази можуть надавати подразнювальну дію, інші - гіпнотичну, треті - наркотичну, або анестезуючу [1].

Одночасне потрапляння продуктів горіння матеріалів, які складаються з значної кількості хімічних елементів, може мати неоднозначні ефекти, до яких відносять:

- адитивність дії токсичних газів – слід розуміти підсумовування ефектів кожного з токсичних газів, це найбільш поширений ефект;
- синергізм – кінцевий результат більше арифметичної суми окремих ефектів;

- антагонізм – зниження ефекту сумісної дії газів порівняно з передбачуваною сумою.

Проводились дослідження сумісної дії токсичних газів в різних умовах на живий організм [2].

Найбільш поширені комбінації продуктів горіння [2]:

$CO$  + знижена кількість кисню (10% концентрація кисню) – токсична дія  $CO$  суттєво збільшується;

$CO+CO_2$  - така суміш утворюється при горінні практично всіх органічних матеріалів, токсичність  $CO$  у присутності  $CO_2$  знижується і тим більше, чим більше концентрація  $CO_2$  у діапазоні 2-8 %;

$CO + HCl$  - при значних концентраціях обох компонентів можливий летальний результат, хлорид водню посилює дію  $CO$ :

$CO+CO_2+ HCl$  – токсичність  $CO$  збільшується;

$CO + HCN$  - токсична дія посилюється в результаті підсумовування:

$CO + HCN+ CO_2$  + знижена кількість кисню: при збільшенні кількості  $CO_2$  токсична дія суміші збільшується, при цьому знижена кількість кисню суттєво не впливає;

$CO+CO_2+NH_3$ : компоненти суміші надають незалежний вплив, у разі добавляння до суміші  $CO_2$  токсична дія посилюється.

$CO+CO_2+ HCl + сажа$ : у разі смертельної концентрації компонентів суміші  $CO$  має домінуючу дію, взаємодія суміші повністю не вивчена.

Таким чином, характер домінуючої дії газів залежить від значення і співвідношення їх концентрацій, що необхідно враховувати під час аналізу даних сумісної дії токсичних газів. В умовах пожежі монооксид вуглецю являється одним з головних компонентів за токсичною дією серед продуктів, що утворюються у повітрі під час пожежі.

Дослідження, проведені з метою визначення комбінованої дії на організм тварин продуктів горіння, підвищеної температури і зниженої концентрації кисню показали, що при температурі середовища (32-35) °C і концентрації кисню нижче 16 % токсична дія продуктів горіння помітно посилюється. При подальшому підвищенні температури до 45 °C і зниження концентрації кисню до 11 % залежність дії токсичних газів має лінійний характер, а час виживання піддослідних тварин скорочується у 2,5-3 рази.

Численні дослідження, присвячені комбінованій дії токсичних речовин на живий організм, показують, що найчастіше при цьому спостерігається адитивна дія. Підсумовуючи токсичність продуктів горіння можна отримати, загальну токсичність продуктів горіння органічного матеріалу [1]:

$$ІТП = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n \text{ або } ІТП = \sum X_i, \quad (4)$$

де  $\sum X_i$  - сумарна токсичність продуктів органічного матеріалу;

$X_1, X_2, \dots, X_n$  - індекс токсичності індивідуальних продуктів горіння або термічного розкладання.

Під індексом токсичності індивідуального продукту горіння розуміється відношення його концентрації до летальної концентрації. Летальна концентрація - це концентрація продукту

горіння, що викликає загибель 50 % тварин при експозиції (5-10) хв [1].

Замість летальної концентрації деякі дослідники пропонують використовувати таку концентрацію токсичної речовини, яка становить небезпеку під час дії протягом 15 хв [1].

У таблиці 2 наведено індекси токсичності індивідуальних газо- і пароподібних продуктів горіння органічних матеріалів однопроцентної концентрації.



Таблиця 2 – Індекси токсичності індивідуальних газо- і пароподібних продуктів горіння органічних матеріалів однопроцентної концентрації [1].

Продукти горіння	Летальна концентрація, г/м <sup>3</sup>	Індекс токсичності ІТ
Двооксид вуглецю	162	0,12
Оксид вуглецю	6	2,08
Хлорид водню	4,5	3,62
Ціанід водню	0,3	40,17
Хлор	0,7	45,28
Фосген	0,2	220,9
Сірководень	1.1	13,79
Бром	5,5	12.98
Етилен	1100	0,01
Оксиди азоту у перерахунку на N <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1	48,21
Бензол	65	0,53
Ацетилен	550	0,02
Оксид сірки	8	3,57
Аміак	3,5	2,16

Як вже було вказано вище, при комбінованій дії продуктів горіння органічних матеріалів може спостерігатися синергізм. Синергізм зареєстровано при гострій дії різних токсичних речовин, які можуть бути продуктами термічного розкладання й горіння органічних матеріалів: бутилен - сірководень; оксиди азоту - оксид вуглецю (II); оксид вуглецю (II) - бензол; оксид вуглецю (IV) – етилхлорокарбонат тощо. При синергізмі посилення загального ефекту токсичності може бути в 10-30 разів. Ефект синергізму може бути врахований як добуток індексів токсичності продуктів горіння, на їх коефіцієнт синергізму [1]:

$$I_{TP} = KX_1X_2, \quad (5)$$

де  $K$  - коефіцієнт синергізму;

$X_1, X_2$  - індекси токсичності продуктів горіння, які володіють синергізмом.

При комбінованій дії продуктів горіння і термічного розкладання органічних матеріалів може мати місце менш ніж адитивна дія - антагонізм. Він проявляється, в основному, за рахунок хімічної взаємодії продуктів горіння. При цьому утворюються малотоксичні продукти: наприклад, аміак і хлорид водню при взаємодії утворюють малотоксичний хлорид амонію, двооксид азоту і аміак в присутності водяної пари утворюють нітрат амонію.

Зменшення токсичності може статися за рахунок фізичного процесу сорбції. В умовах горіння цей ефект може проявитися при сорбції частинками сажі (тверда фаза диму) різних токсичних речовин, особливо хлориду водню, ціаніду водню, бромистого водню і інших речовин. Антагонізм зустрічається досить рідко, проте він може бути використаний для оздоровлення навколишнього середовища, а також для дослідження речовин, які розкладаються з виділенням активних по відношенню до токсичних продуктів горіння речовин, зниження загальної токсичності продуктів горіння.

Потрапляння токсичних продуктів в організм людини під час пожежі, як правило, відбувається в умовах підвищеної температури і зниженої концентрації кисню, які впливають на організм людини.

Дефіцит кисню супроводжується збільшенням об'єму дихання, зниженням уваги і порушенням діяльності м'язів при концентрації кисню (16-17) %. При концентрації (12-15) % спостерігається задишка, почастишання пульсу, погіршення розумової діяльності, запаморочення і швидка стомлюваність, колапс і втрата свідомості наступають при 8 %, при 6 % - смерть протягом 7 хв.

Підвищена температура у приміщенні, як вже говорилося, впливає на швидкість інтоксикації організму і сприяє

прискореному розвитку ознак отруєння. Даний процес обумовлений порушенням процесів терморегуляції організму, що супроводжується почастианням дихання і серцевих скорочень, що прискорює процес абсорбції газо- і пароподібних речовин через дихальні шляхи і збільшенню потраплянь їх у кров.

Для токсичних продуктів горіння і термоокислювального розкладання в умовах пожежі протікає при підвищених температурах, а підвищення температури, як правило, прискорює розвиток токсикологічного процесу. Підвищення температури сприяє прояву специфічних особливостей токсичної дії отрути, малопомітних при звичайних умовах, підвищує чутливість тварин до токсичної дії практично всіх досліджених продуктів горіння. Наприклад, летальна концентрація оксиду вуглецю при (18-20) °С для мишей складає 8, а при (32-34) °С - 4 мг/л. Є дані про те, що підвищення вологості і зниження парціального тиску кисню також підсилює токсичну дію токсичних продуктів на організм.

За даними [5], при підвищенні температури до 35 °С насичення крові киснем знижується в середньому на 60 %. Подальше підвищення температури до 40 °С призводить до зниження насичення крові киснем ще на (10-12) %. Гранично безпечний час перебування людини при фізичному навантаженні середньої тяжкості в умовах температури навколишнього середовища 70 °С становить 10 хвилин.

Таким чином, при горінні органічних матеріалів в умовах пожежі людина

піддається спільному впливу токсичних продуктів термічного розкладання і горіння, диму і температури.

Наведені вище дані вказують на складність обставин перебування і небезпеку для людини на пожежі. Комбінована дія токсичних газів, як правило, ускладнює перебування людей на пожежі. Завдяки новим більш складним хімічним сполукам, шкідливий вплив яких не вивчено на достатньому рівні. Досліди з токсичними сумішами показали невизначеність комбінованої дії токсичних газів, яка залежить від концентрації, хімічного складу компонентів, температури навколишнього середовища тощо [4,5].

Слід вказати, що на даний час немає даних щодо комбінованої дії диму, який містить тверді частки, на поверхні яких адсорбуються продукти горіння: токсичні гази і пари рідин, і які потрапляють у легені людини під час пожежі. Методи прогнозування небезпечних чинників пожежі не враховують комбіновану дію токсичних газів, зниження концентрації кисню та температури і виходять з того, що кожний з небезпечних чинників пожежі має шкідливий вплив на людину незалежно від інших. Такий підхід не відповідає реальним обставинам.

На даний час залишається невирішеною проблема врахування реальних фізико-хімічних процесів під час пожежі і їх впливу на людину, що потребує подальших досліджень і створення бази даних щодо виділення токсичних продуктів горіння для різних комбінацій матеріалів, які використовуються у будівництві і побуті.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Щеглов П. П., Иванников В. Л. Пожароопасность полимерных материалов. – М.: Стройиздат, 1992 – 110 с.

2. Пузач Г. В., Смагин А. В., Лебедченко О. С., Абакумов Е. С. Новые представления о расчете необходимого времени эвакуации людей и об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. Монография. – М.: Академия МЧС России, 2007 – 222 с.

3. Шафран Л. М., Басалаева Л. В., Леонова Д. И. Токсико-гигиеническая характеристика акролеина как важного компонента продуктов горения полимеров //Актуальные проблемы транспортной медицины - 2012, № 3 (29), с.112-122.

4. Фрайзер А. Г. Высокотермостойкие полимеры. - М.: Химия, 1971.

5. Петрунь Н. М. Газообмен через кожу и его значение для организма человека. – М.: Медгиз, 1961.-150 с.

## REFERENCES

1. Shcheglov P.P., Yvannykov V.L. Pozharoopasnost polymernykh materialov. – M.: Stroiyzdat, 1992 – 110 s.
2. Puzach H.V., Smahyn A.V., Lebedchenko O.S., Abakumov E.S. Новые представления о расчете необходимых времени эвакуации людей у об эффективности использования портативных фильтрующих самоспасателей при эвакуации на пожарах. Monohrafiya. – M.: Akademyia MChS Rossyyu, 2007 – 222 s.
3. Shafran L.M., Basalaeva L.V., Leonova D.Y. Toksyko-hyhyenycheskaia kharakterystyka akroleyna kak vazhnogo komponenta produktov horeniya polymerov //Aktualnye problemy transportnoi medytyny - 2012, № 3 (29), s.112-122.
4. Fraizer A. H. Vysokotermostoikye polimery. - M.: Khymiya, 1971.
5. Petrun H. M. Hazoobmen cherez kozhu u ego znachenye dlia orhanyzma cheloveka. – M.: Medhyz, 1961.-150 s.

*Н. В. Белошицкий, канд. хим. наук, Н. В. Кравченко, А. Н. Тесленко,  
Д. А. Добряк, С. З. Цимбалыстый,  
Украинский научно-исследовательский институт гражданской защиты*

## НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТОКСИЧЕСКОГО ДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ НА ЧЕЛОВЕКА

*В данной статье приведен анализ газообразных токсичных продуктов горения, которые образуют дисперсную среду, а также рассмотрены их воздействие на человека. Определены эффекты аддитивности, синергизма и антагонизма при комбинированном действии на человека токсичных продуктов горения.*

*Дисперсной фазой дыма являются твердые частицы сажи, золы и смоляные частицы, дисперсионной средой - газ, то есть газообразные продукты полного и неполного сгорания.*

*На сегодняшний день опасность дыма оценивают отдельно по каждой его фазе: определяют плотность дыма без учета состава продуктов горения или термического разложения, и отдельно исследуют состав продуктов горения без учета состояния и свойства дисперсной фазы. По каждому из названных показателей оценивают опасность того или иного органического материала в условиях пожара, причем отдельно полученные результаты пока не объединяются любым единственным критерием опасности дыма. Такое раздельное исследование опасности дыма связано с техническими трудностями определения общей опасности дыма. В условиях пожара человек будет подвергаться комбинированному действию сложной смеси токсичных веществ*

*поэтому недостаточно знать, какие газы и в каком количестве содержатся в воздухе, нужно еще знать, как они будут действовать совместно, причем влияние зависит не только от видов горючих органических материалов, но и от условий горения. Одновременное попадание продуктов горения материалов, которые состоят из большого количества химических элементов, может иметь неоднозначные эффекты такие как синергизм или антагонизм.*

*Идея проведения такого исследования возникла при выполнении научно-исследовательской работы – провести исследования по совершенствованию методики расчета времени эвакуации людей из зданий и сооружений при пожаре «Эвакуация-методика». Во время выполнения данной научно-исследовательской работы проводился детальный анализ всех факторов, влияющих на эвакуацию людей из помещений и сооружений различного назначения и предельных значений опасных факторов пожара. По результатам проведенной работы возник вопрос более тщательного изучения влияния газообразных токсичных продуктов горения на человека. Ведь перечень веществ и материалов используемых в строительстве и в быту значительно увеличился, а влияние взаимодействия химических продуктов*

горения этих материалов друг с другом имеет недостаточное исследование.

Целью данного исследования является определение перечня газообразных продуктов горения веществ и материалов, которые широко используются в строительстве и быту, их воздействие на

человека, а также поиск данных по комбинированному действию токсичных продуктов горения на человека.

**Ключевые слова:** аддитивность, синергизм, антагонизм, токсичность, концентрация.

*M. Biloshytskyi, PhD, N. Kravchenko, O. Teslenko, D. Dobriak, S. Tsymbalistyi,  
The Ukrainian Civil Protection Research Institute*

## **SOME QUESTIONS OF THE TOXIC EFFECTS OF COMBUSTION PRODUCTS ON HUMANS**

*The analysis of gaseous toxic combustion products, which form the dispersion medium, is also listed, as well as their influence on the human is considered. The effects of addiction, synergism and antagonism are determined in combination with human hazards of a fire.*

*The dispersed phase of the smoke is particulate matter, soot, ash and resin particles, the dispersion medium is gas, ie the gaseous products of complete and incomplete combustion.*

*To date, the hazard of smoke is evaluated separately for each phase: determine the density of smoke without taking into account the composition of the combustion products or thermal decomposition, and separately investigate the composition of the combustion products without considering the state and properties of the dispersed phase. For each of these indicators evaluate the hazard of a particular organic material in a fire, and the separately obtained results are not yet combined by any single criterion of hazard of smoke. Such a separate smoke hazard study is related to the technical difficulties of determining the overall smoke hazard. In a fire, a person will be exposed to the combined action of a complex mixture of toxic substances, so it is not enough to know what gases and how much are contained in the air, you still need to know how they will act together, and the impact depends not only on the types of combustible organic materials, but also on conditions of*

*combustion. Simultaneous ingress of combustion products consisting of a large number of chemical elements can have ambiguous effects such as synergism or antagonism.*

*The idea of carrying out such research arose during the implementation of the research work "To conduct research on improving the method of calculating the evacuation time of people from buildings and structures during the fire "Evacuation-Methodology" ". During the execution of this research work, a detailed analysis of all factors affecting the evacuation of people from premises and structures of different purpose and limit values of dangerous factors of fire was carried out. According to the results of the work, a more thorough study of the effect of gaseous toxic combustion products on the person was raised. After all, the list of substances and materials used in construction and in everyday life has increased significantly, and the impact of the interaction of chemical combustion products of these materials with each other is not enough research.*

*The purpose of this study is to determine the list of gaseous combustion products of substances and materials commonly used in construction and everyday life, their effects on humans, and to search for data on the combined effects of toxic combustion products on humans.*

**Keywords:** additivity, synergism, antagonism, toxicity, concentration.