

УДК 628.906:504.054(045)

В.О. Повстень, д.т.н., проф.

Т.І. Дмитруха, асист.

## АНАЛІЗ ЕКОЛОГІЧНОГО СТАНУ ПРИМІЩЕНЬ ПІСЛЯ РУЙНУВАННЯ В НИХ ЛЮМІНЕСЦЕНТНИХ ЛАМП

Національний авіаційний університет

E-mail:Arnem@ukr.net

*На основі отриманих оригінальних залежностей розроблено методику визначення змінювань екологічного стану приміщень і рівнів ризику отруєння людей після потрапляння в них небезпечних забруднень, зокрема, ртуті.*

*The original dependences received and they became a basis for an elaborated calculation way which simplifies determination of environmental condition of premises and levels of risk for poisoning of people after pollution of those premises by dangerous substances, particularly mercury.*

*На основе полученных оригинальных зависимостей разработана методика определения изменения экологического состояния помещений и уровней риска отравления людей после попадания в них опасных загрязнений, в частности, ртути.*

### Постановка проблеми

Оскільки ртуть належить до найнебезпечніших для людей речовин, а прилади з її вмістом широко використовуються та нерідко руйнуються безпосередньо у приміщеннях, важливого значення набуло оцінювання рівнів ризику отруєння людей парою ртуті під час тимчасових чи регулярних перебувань у забруднених нею приміщеннях [1].

**Мета** роботи – отримання оригінальних залежностей, які б суттєво спростили аналіз змінювання екологічного стану приміщень і визначення рівнів ризику отруєння людей небезпечними забрудненнями у разі руйнування люмінесцентних ламп із вмістом ртуті.

### Експериментальна частина

Для розв'язання поставленого завдання баланс кількості ртуті, яка випаровується в приміщенні, накопичується в його повітрі та конденсується у ньому за нескінченно малий час  $d\tau$ , можна подати у такому вигляді:

$$W_{\text{вип}} S_{\text{вип}} d\tau = V_{\text{пр}} dc + \alpha V_{\text{пр}} cd\tau,$$

де  $W_{\text{вип}}$  – швидкість випаровування ртуті за її температури  $t_{\text{рт}}$ ;

$S_{\text{вип}}$  – вільна площа випаровування ртуті, яка визначається з урахуванням того, що ртуть легко розпадається на дуже дрібні кульки діаметром до 0,1 мм і менше;

$V_{\text{пр}}$  – об'єм приміщення;

$c$  – концентрація пари ртуті в повітрі;

$\alpha$  – коефіцієнт пропорційності.

Кількість ртуті, що випаровується у приміщення за час  $d\tau$ , розраховують за формулою

$$G_{\text{вип}} = W_{\text{вип}} S_{\text{вип}} d\tau.$$

Частку ртуті, що випаровувалася за час  $d\tau$ , яка залишилася у повітрі цього приміщення і призвела до зміни її концентрації у ньому на значення  $dc$ , визначають за формулою

$$G_{\text{пов}} = V_{\text{пр}} dc,$$

$$V_{\text{пр}} = S_{\text{пр}} h_{\text{пр}},$$

де  $S_{\text{пр}}$  – площа приміщення,

$h_{\text{пр}}$  – висота приміщення.

Частку ртуті, сконденсованої у приміщенні за час  $d\tau$ , яка є тим більшою, чим більший об'єм приміщення  $V_{\text{пр}}$  і вища концентрація пари ртуті у його повітрі  $c$ , визначають за формулою

$$G_{\text{ск}} = \alpha V_{\text{пр}} cd\tau.$$

Отже:

$$\frac{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{dc}{d\tau} + \alpha c.$$

В усталеному (рівноважному) стані, коли

$$\frac{dc}{d\tau} = 0,$$

концентрація пари ртуті в повітрі

$$c = c_y,$$

де  $c_y$  – усталене значення концентрації пари ртуті в приміщенні, яке відповідає насиченому стану пари ртуті за температури найхолоднішої ділянки приміщення  $t_x$ .

Відповідно

$$\frac{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}}{V_{\text{пр}}} = \alpha c_y,$$

коефіцієнт однорідності

$$\alpha = \frac{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}}{V_{\text{пр}} c_y}.$$

У результаті диференціальне рівняння набуває вигляду:

$$\frac{dc}{d\tau} + \frac{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}}{V_{\text{пр}} c_y} (c - c_y) = 0 \quad (1)$$

або

$$\frac{d\tau}{T_{\text{ек}}} = \frac{dc}{c_y - c},$$

де  $T_{\text{ек}}$  – стала часу екологічної безпеки.

Розв'язанням диференціального рівняння (1) є експоненціальна залежність:

$$c = c_y + (c_{\text{п}} - c_y) e^{-\frac{\tau}{T_{\text{ек}}}}, \quad (2)$$

де  $c_{\text{п}}$  – початкова концентрація пари ртуті у приміщенні, а саме в момент часу, який взятий як початковий ( $\tau = 0$ ).

Стала часу екологічної безпеки  $T_{\text{ек}}$  є дуже важливим екологічним параметром, оскільки визначає хід та інтенсивність небезпечного забруднення простору приміщень, який описується співвідношенням (2).

Фізично цей параметр являє собою проміжок часу, протягом якого концентрація пари ртуті чи іншого забруднення, що випаровується у приміщення об'ємом  $V_{\text{пр}}$  зі швидкістю  $W_{\text{вип}}$  із площі випаровування  $S_{\text{вип}}$ , досягла б значення, яке дорівнює усталеному значенню концентрації  $c_y$ , якби не було конденсації пари забруднення.

За  $S_{\text{вип}} \approx \text{const}$  кількість забруднення, що випариться з цієї вільної поверхні  $S_{\text{вип}}$  за деякий час  $\tau$ , дорівнює

$$G_{\text{вип}} = W_{\text{вип}} S_{\text{вип}} \tau.$$

За відсутності конденсації пари забруднення його концентрація за цей час  $\tau$  у повітрі загерметизованого приміщення об'ємом  $V_{\text{пр}}$  досягла б значення

$$c = \frac{G_{\text{вип}}}{V_{\text{пр}}} = \frac{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}} \tau}{V_{\text{пр}}},$$

а коли

$$c = c_y,$$

то

$$\tau = \frac{V_{\text{пр}} c_y}{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}},$$

тобто

$$\tau = T_{\text{ек}},$$

оскільки

$$T_{\text{ек}} = \frac{V_{\text{пр}} c_y}{W_{\text{вип}} S_{\text{вип}}}.$$

Розповсюдження пари ртуті у всьому просторі приміщення значною мірою визначає ефективна дія дифузії молекул ртуті, інтенсивність якої у певному напрямку  $x$

$$z = -D \frac{dc}{dx},$$

де  $z$  – густина дифузійного потоку молекул;  $D$  – коефіцієнт дифузії.

Значення коефіцієнта дифузії  $D$  для пари ртуті в повітрі (за температури  $0\text{ }^\circ\text{C}$  і тиску повітря  $760\text{ мм.рт.ст.}$   $D_0 = 0,1124\text{ м}^2/\text{с}$ ) навіть дещо перебільшує значення для пари етилового спирту ( $D_0 = 0,102\text{ м}^2/\text{с}$ ) і лише приблизно вдвічі є меншим, ніж для пари води ( $D_0 = 0,22\text{ м}^2/\text{с}$ ) [2].

Швидше розповсюдження пари ртуті у просторі приміщень відбувається разом з повітрям у результаті конвекційного руху останнього, зумовленого опалюванням приміщень і сонячною радіацією. Цей рух спричинений підніманням теплішого повітря вгору, а холоднішого – опусканням вниз.

Рух повітря прискорюється у приміщеннях під час різкого відкривання і закривання дверей та іншої примусової дії на повітря. До того ж за реальних значень концентрації пари ртуті у повітрі приміщень це повітря стає важчим лише приблизно на  $0,001\%$ , хоча сама пара ртуті є майже у сім разів важчою за повітря. Тому забруднене парою ртуті повітря не скопичується у нижніх зонах простору приміщень, а порівняно швидко розповсюджується й у верхні його зони.

Ступінь екологічної небезпеки приміщень з концентрацією пари ртуті чи іншого забруднення в їхньому просторі  $c$  зручно визначати відношенням  $\frac{c}{c_{\text{гдж}}}$ , а ступінь ризику отруєння людини у разі перебування її у цьому

приміщенні величиною  $\frac{c}{c_{\text{гдж}}} \tau_{\text{пер}}$ , де  $c_{\text{гдж}}$  – граничнодопустима концентрація забруднення у просторі даного приміщення;  $\tau_{\text{пер}}$  – тривалість перебування у приміщенні людини.

Теоретично перехідний процес, яким є змінювання концентрації пари забруднення (пари ртуті)  $c = f(\tau)$  у повітрі загерметизованого приміщення до стану насичення цієї пари, триває нескінченно довго.

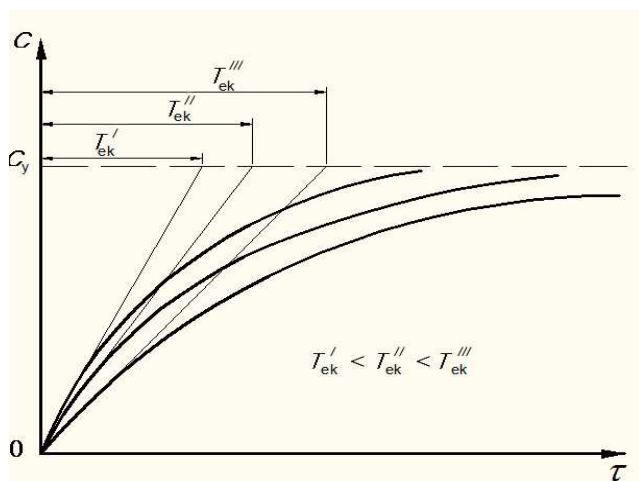
Можна вважати, що він закінчується за час  $(4 \dots 5) T_{\text{ек}}$ , оскільки  $c = 0,95c_y$  за  $\tau = 3T_{\text{ек}}$ ,  $c = 0,982c_y$  за  $\tau = 4T_{\text{ек}}$ , а за  $\tau = 5T_{\text{ек}}$  вже  $c = 0,993c_y$ .

Оскільки  $c = 0,63c_y$  за  $\tau = T_{\text{ек}}$ , то екологічну сталу часу  $T_{\text{ек}}$  можна трактувати як проміжок часу, протягом якого концентрація пари забруднення у повітрі загерметизованого приміщення в результаті його випаровування і конденсації його пари досягає значення  $0,63c_y$ , тобто  $63\%$  від усталеного значення концентрації. Як впливає зі співвідношення (2) для визначення сталої часу екологічної безпеки, за тих самих значень величин  $V_{\text{пр}}$ ,  $W_{\text{вип}}$ ,  $S_{\text{вип}}$

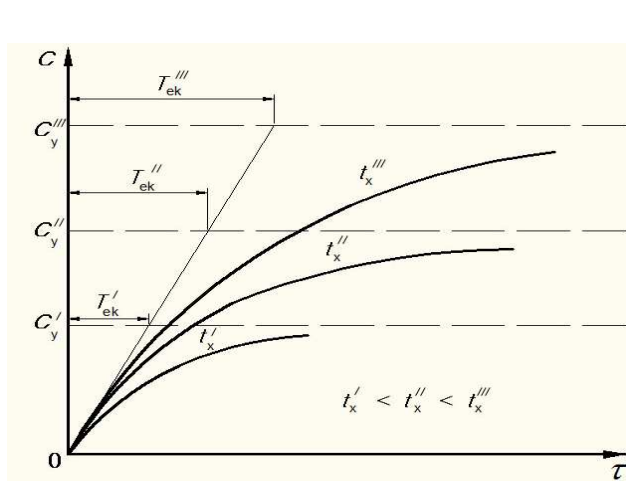
$\frac{T'_{\text{ек}}}{T''_{\text{ек}}} = \frac{c'_y}{c''_y}$ , а за тих самих значень величин  $V_{\text{пр}}$ ,  $W_{\text{вип}}$ ,  $c_y$   $\frac{T'_{\text{ек}}}{T''_{\text{ек}}} = \frac{S''_{\text{вип}}}{S'_{\text{вип}}}$ .

Графіки залежностей  $c = f(\tau)$  для певного значення усталеної концентрації пари забруднення  $c_y$  у повітрі приміщень ( $c_{\text{п}} = 0$ ) і різних значень сталої часу екологічної безпеки ( $T'_{\text{ек}}, T''_{\text{ек}}, T'''_{\text{ек}}$ ) мають вигляд кривих, показаних на рисунку (а), а для різних значень усталеної концентрації пари забруднення ( $c'_y, c''_y, c'''_y$ ) або різних значень температури найхолоднішої ділянки приміщень ( $t'_x, t''_x, t'''_x$ ) та інших аналогічних умов – вигляд кривих, показаних на рисунку (б).

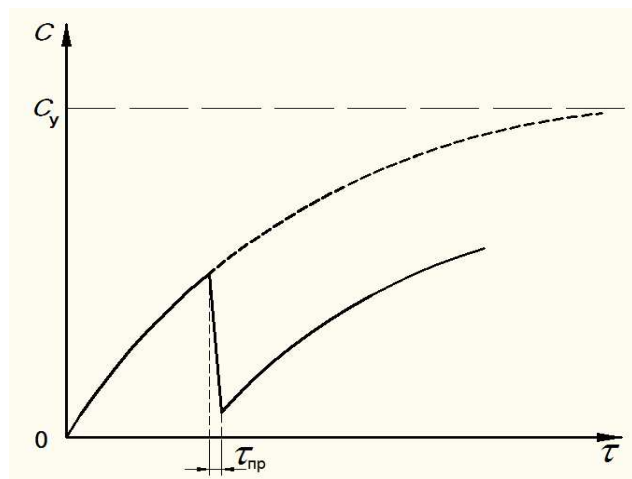
Значення сталої часу екологічної безпеки  $T_{\text{ек}}$  легко визначаються графічним шляхом. Для цього від початкової або будь-якої іншої точки кривої  $c = f(\tau)$  достатньо провести дотичну і перпендикуляр до осі часу. Тоді довжина відрізка, який відсікається проведеними лініями на прямій, що відповідає значенню концентрації  $c_y$ , у певному масштабі буде визначати сталу часу екологічної безпеки ( $T_{\text{ек}}, T'_{\text{ек}}, T''_{\text{ек}}, T'''_{\text{ек}}$  на рисунку, а).



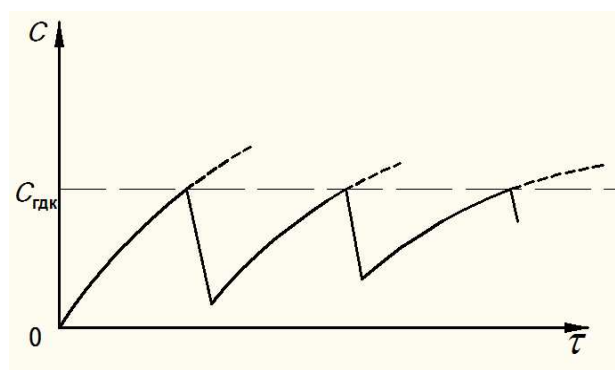
а



б



в



г

Залежності  $c = f(\tau)$ :

а – за певного значення усталеної концентрації пари забруднення  $c_y$ ,  $c_{II} = 0$

і різних значеннях сталої часу екологічної безпеки  $T_{ек}$ ;

б – за різних значеннях усталеної концентрації пари забруднень та інших аналогічних умов;

в – одноразове провітрювання;

г – багаторазове провітрювання

Оскільки через випаровування кількість рідкої фази ртуті, що була вилита в приміщенні, зменшується, значення сталої часу екологічної безпеки  $T_{ек}$  може помітно зростати.

Для урахування цих змін можна процес випаровування ртуті розділити в часі на певні проміжки і послідовно для кожного з них визначити відповідне (зокрема, середнє) значення сталої часу екологічної безпеки (вільної площі випаровування ртуті).

При цьому середні для окремих проміжків значення сталої часу екологічної безпеки неважко визначаються шляхом повторних розрахунків. Аналогічно можна врахувати й інші зміни, які також можуть помітно впливати на динаміку накопичення ртуті у просторі приміщення.

Під час проведення розрахунків із застосуванням викладеної методики для підвищення достовірності отриманих результатів

важливо врахувати те, що інтенсивність накопичування ртуті у повітрі приміщень значно зменшується у разі забруднення й окиснювання поверхні ртуті та накривання забруднених нею ділянок різними покриттями.

Урахувати ці фактори можна відповідним зменшенням розрахункової поверхні випаровування ртуті  $S_{\text{вип}}$ . Вільна площа випаровування ртуті зменшується за наявності крупніших кульок ртуті та через потрапляння дрібних у різні щілини.

Наслідком останнього є утворення в приміщеннях дуже довготривалих небезпечних ртутних забруднень.

Випаровування ртуті прискорюється у разі потрапляння її краплинок на різні прилади, що містяться у приміщенні та під час роботи суттєво нагріваються.

Під час провітрювання приміщення протягом деякого часу  $\tau_{\text{пр}}$  в результаті видалення пари забруднення разом з повітрям концентрація її у цьому приміщенні різко зменшується, але надалі внаслідок продовження випаровування вона поступово відновлюється, а під час чергового провітрювання знову різко зменшується.

Кожне провітрювання приміщення починається, коли  $c = c_{\text{гдк}}$  (див. рисунок,  $z$ ).

Проте провітрювання забруднених приміщень призводять до небажаних забруднень навколишнього середовища та сусідніх приміщень. У разі цього кількість видаленого з повітрям забруднення під час одноразового повного провітрювання приміщення об'ємом  $V_{\text{пр}}$  становить

$$G_{\text{вид}} = V_{\text{пр}} c.$$

Отже, з екологічного погляду провітрювання забруднених ртуттю приміщень для їх охолодження та зменшення в них концентрації пари ртуті у повітрі повинно вважатися недопустимим через утворення нових (вторинних) осередків ртутних забруднень.

Більш того, забруднене ртуттю приміщення для попередження розповсюдження цього забруднення потрібно навпаки якомога ретельніше загерметизувати, зокрема за допомогою липких стрічок, і відразу у цьому приміщенні вжити ефективні запобіжні та демеркуризаційні заходи.

Для зменшення кількості ртуті, що поступово надходить у повітряний простір забрудненого нею приміщення, і зменшення накопичення ртуті його стінами, стелею, підлогою та речами, що містяться у цьому приміщенні, доцільно відразу після появи в ньому ртутної пари створити певну охолоджену ділянку чи декілька ділянок з якомога нижчою температурою, а не намагатися охолоджувати все приміщення, тим більше, що це охолодження може бути досить тривалим.

При цьому створюються ефективні умови примусового дифузійного спрямування молекул ртуті від осередку забруднення на створені локальні охолоджені ділянки.

На невеликій ділянці можна швидко знизити температуру, зокрема, за рахунок внесення у приміщення посудин з дуже холодною водою, льоду, акумуляторів холоду з морозильних камер та ін. Тоді завдяки значно меншій концентрації ртуті у повітрі біля охолодженої зони дифузійний потік молекул ртуті спрямовується переважно саме в цю зону, де пару ртуті внаслідок охолодження і конденсації збирають. Коли штучну зміну концентрації забруднення у певному напрямку можна вважати лінійною, для проведення розрахунків і отримання необхідних рішень скористаємося співвідношенням

$$j = \frac{c_1 - c_2}{\delta} \cdot D$$

або

$$jS = \frac{c_1 - c_2}{\delta} = Q_{\text{диф}}, \quad DS$$

де  $j$  – густина дифузійного потоку молекул (частинок) будь-якого забруднення,

$c_1, c_2$  – концентрація забруднення на початку і в кінці ділянки довжиною  $\delta$ ;

$S$  – площа поперечного перерізу цієї ділянки на шляху руху забруднення у повітрі, тобто кількість забруднення, що переноситься через ізоконцентраційну поверхню в одиницю часу;

$$\frac{\delta}{SD} = R_{\text{диф}} - \text{дифузійний опір.}$$

Із застосуванням співвідношень (1), (2) і запропонованої методики розрахунку проведено всебічний аналіз впливу ртутних забруднень на екологічний стан приміщень залежно від кількості ртуті, що потрапляє в них в результаті руйнувань розрядних ламп, температури рідкої ртуті у приміщеннях і площі поверхонь її випаровування, об'єму приміщень і температури найхолоднішої ділянки в них, одноразових і багаторазових провітрювань приміщень.

На підставі проведеного аналізу зроблено відповідні висновки і подано певні рекомендації для мінімізації впливу ртутних забруднень приміщень на здоров'я людей.

Зокрема, було визначено, що в разі виливу з люмінесцентної лампи 50 мг ртуті у приміщення об'ємом 50 м<sup>3</sup>, тобто площею 20 м<sup>2</sup>, за температури рідкої ртуті 20 °С і температурі найхолоднішої ділянки приміщення 10 °С граничнодопустиме значення концентрації пари ртуті у просторі цього приміщення без його провітрювань може досягнути менш, ніж за 10 год.

За тиждень вона знову без провітрювань вже може перебільшувати граничнодопустиме значення майже у 50 разів, а за місяць – у 200 разів. Кількість рідкої фази ртуті через її випаровування за місяць при цьому зменшиться приблизно на 6%.

Стала часу екологічної безпеки становить близько 2500 діб, а за температури найхолоднішої ділянки 0 °С – близько 600 діб.

У разі продовження проживання людей у цьому приміщенні після руйнування в ньому подібної лампи, якщо не взяти спеціально передбачених для цього випадку демеркураційних заходів, для попередження нанесення серйозної шкоди здоров'ю людей необхідно незважаючи на визначені раніше застереження ретельно провітрювати це приміщення через кожні 3–4 год.

### Висновки

Отримано оригінальні залежності та з їх застосуванням запропоновано методику розрахунку, яка дозволяє досить просто оцінювати змінювання у часі екологічного стану приміщень після руйнування в них люмінесцентних ламп та інших приладів із вмістом ртуті.

Застосування складеної методики визначення змінювань екологічного стану приміщень дає можливість визначати рівні ризику отруєння людей парою ртуті залежно від розмірів приміщень, їх періодичних провітрювань, різних температурних та інших умов, а також від змінювань цих умов у часі.

Запропонована методика розрахунку є загальною і придатна для визначення аналогічним чином динаміки змінювань екологічного стану приміщень у разі їх забруднювань шкідливою парою різних речовин.

### Література

1. *Трахтенберг И.М.* Ртуть и ее соединения в окружающей среде (гигиенические и экологические аспекты) / И.М. Трахтенберг, М.Н. Коршун. – К.: Вища шк., 1990. – 232 с.
2. *Мацак В.Г.* Гигиеническое значение скорости испарения и давления пара токсических веществ, применяемых в производстве / В.Г. Мацак. – М.: Медгиз, 1959. – 230 с.