

УДК 65.011.56:621.79(07)

## МОДЕЛЮВАННЯ ПОШИРЕННЯ АЕРОЗОЛІВ В ПРОЦЕСІ РУЧНОГО ЗВАРЮВАННЯ ПРИ РЕМОНТІ ТА БУДІВНИЦТВІ ЛІНІЙНОЇ ЧАСТИНИ МАГІСТРАЛЬНИХ ТРУБОПРОВОДІВ У ПОЛЬОВИХ УМОВАХ

<sup>1</sup>Я.В. Куровець, <sup>2</sup>Я.М. Семчук

<sup>1</sup>Івано-Франківське управління філії ВРТП «Укргазенергосервіс» ДК «Укртрансгаз»,  
76000, м. Тисмениця, вул. Галицька, 91, тел. (0342) 552758;  
e-mail: VRTPIV@ITSIV.ua

<sup>2</sup>ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42196,  
e-mail: bzh d@ a s . n u n g . e d u . u a

*Обґрунтовано, що основними фізичними процесами, які визначають механізм поширення зварювального аерозолу в атмосферному повітрі, є дифузія у поєднанні з дисперсією та конвективним переносом.*

*Встановлено, що за відсутності вітру аерозольний дим змішується з повітрям лише за рахунок молекулярної дифузії.*

*Запропоновано профілі концентрації аерозольної хмари від безперервного точкового джерела, яким є місце ручного зварювання на відкритому повітрі.*

*Показано, що хмара аерозолу, що розповсюджується за вітром, безперервно розсіюється. При цьому частинки дифундують у всіх напрямках, і концентрація їх у хмарі швидко знижується.*

*Запропоновано модель поширення зварювального аерозолу від наземного джерела на відкритому повітрі.*

Ключові слова: магістральний трубопровід, аерозоль, моделювання.

*Обосновано, что основными физическими процессами, определяющими механизм распространения сварочного аэрозоля в атмосферном воздухе, является диффузия в сочетании с дисперсией и конвективным переносом.*

*Установлено, что при отсутствии ветра аэрозольный дым смешивается с воздухом только за счет молекулярной диффузии.*

*Предложены профили концентрации аэрозольного облака от непрерывного точкового источника, которым является место ручной сварки на открытом воздухе.*

*Показано, что облако аэрозоля, распространяющееся по направлению ветра, непрерывно рассеивается. При этом частицы диффундируют в всех направлениях, и концентрация их в облаке быстро снижается.*

*Предложена модель распространения сварочного аэрозоля от наземного источника на открытом воздухе.*

Ключевые слова: магистральный трубопровод, аэрозоль, моделирование.

*The article proves that the basic physical processes which determine the mechanism of distribution of welding aerosol in the atmosphere is the diffusion combined both with dispersion and conventional transfer.*

*It has been found that under windless condition aerosol smoke mixes with air through the process of molecular diffusion only.*

*The profiles of concentration aerosol smoke cloud were suggested achieved from continuous point source as the place of manual outdoor welding. It has been shown that the aerosol cloud spreading to the wind continuously dissipates, the particles diffuse in different directions and their concentration in the cloud decreases rapidly.*

*The model of welding aerosols distribution acquired form terrestrial open air sources.*

Keywords: main pipeline, aerosol, model.

**Постановка проблеми, актуальність та доцільність досліджень.** Система постачання в Україні є складною енергетичною системою, що характеризується великою потужністю, значною довжиною (близько 36,6 тис. км), складною структурою, різним віком і станом магістральних газопроводів. Старіння газопроводів, велика кількість аварій і ушкоджень на лінійній частині серйозно ускладнюють процес технічної експлуатації об'єктів газотранспортної системи, збільшують матеріальні витрати.

У цих умовах набуває актуальності завдання забезпечення надійності функціонування газотранспортних систем з метою безперебійного постачання газу, зниження втрат газу, запобігання аварій і забруднення навколишнього

середовища. Причому проблема безпеки і екологічності магістрального транспорту газу вимагає особливої уваги з обліком можливих катастрофічних наслідків аварій і несправностей.

З огляду на той факт, що аварійність магістральних газопроводів залишається досить високою, а темпи їх «старіння» значно випереджають темпи виконання капітального ремонту, одним з головних засобів підтримки експлуатаційної надійності лінійної частини є система технічного обслуговування і ремонту, що включає великий об'єм газозварювальних робіт і, як наслідок, збільшується ймовірність впливу процесів зварювання на здоров'я працюючих.

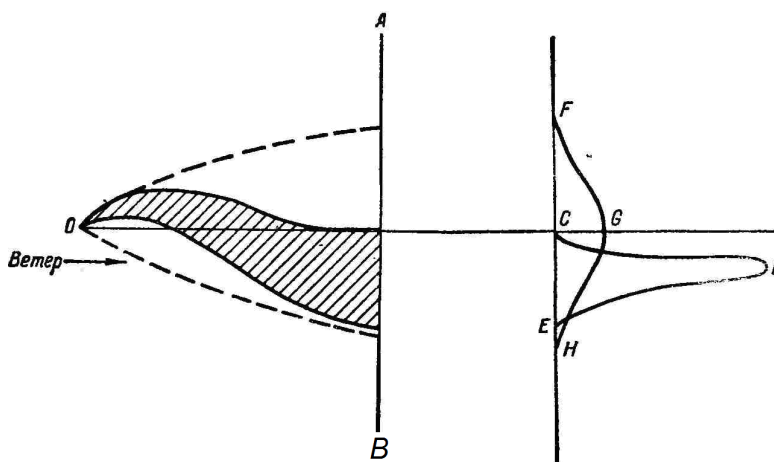


Рисунок 1 – Миттєвий (*CDE*) і усереднений за часом (*FGH*) профілі концентрації аерозольної хмари від безперервного точкового джерела

Зварювання магістральних газопроводів під час їх ремонту та будівництва проводиться як в напіввідкритому просторі (підземні трубопроводи), так і у відкритому (наземні газопроводи). У першому і другому випадку в основному застосовують ручне електрозварювання, що характеризується значним впливом шкідливих речовин на організм людини, оскільки відстань від місця зварювання до зварювальника складає всього 20-30 см. Величина впливу залежить від виду покриття електродів (основний чи целюлозний), від методів зварювання (електроконтактний, під флюсом, у середовищі захищених газів тощо).

Шкідливі речовини, що виділяються при зварюванні, утворюють у повітрі аерозоль, складовими якого є пил (розмір часток більший  $10^{-3}$  см), хрому (розмір часток  $10^{-3}$ - $10^{-5}$  см), дим (розмір частинок менший  $10^{-5}$  см). Механізм поширення аерозолів у повітрі вимагає спеціального розгляду, що можна здійснювати методом математичного моделювання, оскільки тут відіграють такі фізико-хімічні процеси, як конвективний перенос, поздовжня та поперечна дисперсія, молекулярна дифузія.

**Аналіз літературних джерел.** Закономірності утворення зварювальних аерозолів при дуговому зварюванні та механізм їх поширення у навколишньому середовищі розглянуто у роботах В.М. Ельтермана [1], Н.А. Фукса [2], Х. Гріна [3], Ю.А. Полукарпова [4], О.Г. Левченка [5], що стосуються машинобудівної та хімічної промисловості. Моделювання поширення зварювальних аерозолів на об'єктах газової промисловості, зокрема при ручному зварюванні трубопроводів, висвітлено ще недостатньо.

**Мета роботи.** Дослідити механізм поширення зварювального аерозолу в атмосферному повітрі під впливом метеорологічних чинників.

**Виклад основного матеріалу.** У процесі зварювання наземних магістральних газопроводів поведінка аерозольних хмарин в атмо-

сфері суттєво залежить від метеорологічних чинників.

Форма аерозольної хмари в атмосфері залежить, насамперед, від розташування, типу і форми її джерела, що може знаходитися практично на рівні землі (наприклад, наземний димовий генератор) або на значній висоті (наприклад, заводська труба). Це – приклади джерел, що діють безперервно. Але іноді випускання аерозольної хмари відбувається майже миттєво як, наприклад, у разі вибухання димової гранати.

У даній статті розглядаються лінійні джерела (труби), що складаються з низки точкових джерел (місця зварювання), розташованих уздовж прямої лінії, зазвичай під прямим кутом до напрямку вітру.

У процесі зварювання наземних труб при помітному вітрі аерозольний дим від точкового джерела розповсюджується за вітром у вигляді довгого конічного факела, що розширюється у вертикальному і горизонтальному напрямках.

Якщо дивитися згори, то у деякий момент часу факел має вигляд заштрихованої фігури на рисунку 1. Він коливається з одного боку в інший, і протягом декількох хвилин може покрити площу між пунктирними лініями. Якщо провести миттєвий відбір проб диму в точках, розташованих уздовж прямої АВ, і побудувати криву розподілу концентрації в поперечному перетині факела, то отримаємо криву *CDE* з високим піком і вузькою основою. Проте, якщо проводиться безперервний відбір проб в тих самих точках протягом декількох хвилин, то поперечний профіль концентрації *FGH* стає значно ширшим і нижчим. У роботі ми розглядатимемо саме ці усереднені за часом значення концентрації.

За „ламінарного” вітру дим змішувався б з повітрям лише за рахунок молекулярної дифузії, і ступінь розпливання хмари був би надзвичайно малим. Проте природний вітер зазвичай турбулентний і характеризується наявністю численних безладно рухомих вихорів різної протяжності, починаючи з декількох сантиметрів. Ми ще не маємо повного уявлення про

природу вихорів. Сучасна метеорологія намагається виразити їх структуру через співвідношення між турбулентними швидкостями в різні моменти часу або в різних точках простору, але для наших цілей простіше розглядати вихори як об'єми повітря, які, як і молекули в газі, переносять масу, момент руху і тепло з однієї ділянки простору в іншій за рахунок безперервного перемішування з навколишнім повітрям. Якщо неможливо вказати властивості, що відрізняють окремих вихорів від решти маси повітря, це означає, що він повністю „розчинився” в атмосферному повітрі. Таким чином, хмара аерозолі, що розповсюджується за вітром, безперервно розсіюється. При цьому частинки дифундують у всіх напрямках, і їх концентрація в хмарі швидко зменшується.

Турбулентність нижніх шарів атмосфери викликана як механічними, так і тепловими процесами. Внаслідок тертя шарів повітря до земної поверхні вітер стає поривчастим, а теплова турбулентність зумовлена нестійкістю повітряних шарів, що одержують тепло від нагрітої сонцем поверхні землі. Ступінь турбулентності нижніх шарів атмосфери сильно залежить від години, хмарності і топографії місцевості. Якщо нижні шари повітря не нагріваються і не втрачають тепло, то і з висотою температура змінюється дуже мало; атмосфера перебуває в стані байдужої рівноваги, і турбулентність повітря викликається, насамперед, механічними причинами. З посиленням сонячного нагрівання стійкість атмосфери порушується, падіння температури з висотою збільшується, і турбулентність значно зростає. Температурний градієнт, при якому дим швидко розсіюється у всіх напрямках, зазвичай досягається у погожі дні, приблизно за годину після сходу сонця і закінчується за годину до його заходу. У погожі тихі ночі теплове випромінювання з поверхні землі викликає інверсію температурного градієнта. Атмосферна турбулентність при цьому мінімальна, і розсіювання диму різко сповільнюється.

Таким чином, в ступені турбулентності атмосфери поблизу земної поверхні ясно виражені добові зміни. За середнього вертикального температурного градієнта і швидкості вітру можна скласти безрозмірну функцію, відому під назвою числа Річардсона. Згідно з експериментальними даними, саме це число, а не вказані вище чинники окремо, визначає ступінь турбулентності.

Турбулентність проявляється у вигляді флуктуації швидкості вітру відносно середнього значення. Крім того, флуктуації посилюються під дією перешкод на шляху вітру - дерев, будівель, пересіченої місцевості. Різко виражені топографічні особливості (горби, долини, міста) можуть викликати крупні, стійкі вихори. Коли долина нагрівається сонцем, повітря рухається вгору схилами і знову опускається вниз в центрі долини. Пізніше вітер, що дме схилом угору, стихає, і в результаті вечірнього охолодження повітря, дотичного з верхніми частинами схилів, створюється „катабатична” циркуляція, при якій повітряні потоки спрямовують-

ся схилами вниз, і за наявності джерела промислових викидів в долині можуть виникнути дуже високі місцеві концентрації повітряних забруднень.

Щоб перейти від чисто якісних описів до кількісної теорії турбулентного розсіювання в нижніх шарах атмосфери, необхідний відповідний математичний апарат. Він повинен оперувати такими вимірюваними величинами, які при відомій метеорологічній структурі нижньої атмосфери давали б можливість розрахувати концентрацію і інші властивості хмари в будь-якій точці. Цілковито задовільної теорії турбулентної дифузії ще не створено, проте існує декілька наближених теорій.

Перші моделі поширення домішок в атмосфері з'явилися в середині ХХ століття, але теоретичні основи до появи таких моделей були закладені набагато раніше – в 20-30-і роки. Вони базувались на роботах з вивчення розподілу метеоелементів в приземному шарі атмосфери і на спостереженні про схожість процесів переносу тепла, кількості руху, розсіювання домішок та можливості використовувати їх під час моделювання цих процесів [4,6,7].

Ще на початковому етапі побудови моделей, що описують дифузію домішки в атмосфері, виділяли два підходи. Перший, що базувався на розв'язанні рівняння турбулентної дифузії з постійними коефіцієнтами, описаний в роботах А. Робертса. Другий підхід ґрунтується на статистичному описі процесу поширення концентрації домішки, був запропонований М.Е. Берляндом [8]. Тут розділ домішку поблизу точкового джерела, яким власне і є точка ручного зварювання на відкритому повітрі, підпорядковується закону розподілу Гауса.

$$C(x, y, z, \tau) = \frac{M \left( \tau - \frac{x}{U_a} \right)}{2\pi U_a \sigma_y (x + x_{vy}) \sigma_z (x + x_{vz})} \times \left\{ \frac{y^2}{2\sigma_y^2 (x + x_{vy})} \right\} \cdot \left\{ \frac{(z - h_0)^2}{2\sigma_z^2 (x + x_{vz})} \right\} \quad (1)$$

де:  $C$  – концентрація зварювального аерозолі, мг/м<sup>3</sup>;

$x, y, z$  – координати;

$\tau$  – час, с;

$M$  – маса аерозолі, що викидається в атмосферу, г/с;

$U_a$  – швидкість вітру, м/с;

$\sigma_z$  – коефіцієнт поперечної дисперсії, м<sup>2</sup>/с;

$\sigma_y$  – коефіцієнт поздовжньої дисперсії, м<sup>2</sup>/с;

$x_{vz}, x_{vy}$  – відстань від джерела викиду, м.

Рівняння (1) розв'язували за початкових і граничних умов  $C(\tau = \tau^*, x = x_0, y = 0, z = h_0)$ .

Маємо:

$$C = \frac{M \left( \tau^* - \frac{x_0}{U_a} \right)}{2\pi U_a \sigma_z (x_0 + x_{vz}) \cdot \sigma_y (x_0 + x_{vy})} \quad (2)$$

тобто, за даною формулою можна визначити у певний момент часу ( $\tau^*$ ) концентрації шкідливих речовин у зоні, що відповідає висоті зварювального факела ( $h_0$ ).

Два вирази, отримані М.Е. Берляндом [8], дозволяють визначити концентрацію аерозоллю, що утворюється в димі зварювального факела, % (г/см<sup>3</sup>) у даній точці хмари, якщо відомі швидкість емісії речовини (матеріалу електрода і зварювального дроту) і деякі метеорологічні дані.

Безперервне точкове джерело, розташоване на рівні землі, продуктивністю  $Q$  г/сек дає концентрацію аерозоллю:

$$\chi_T(x, y, z) = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot \tilde{u} \cdot x^{2-n}} \times \exp \left[ -x^{n-2} \cdot \left( \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right) \right], \quad (3)$$

де:  $x, y, z$  – просторові координати, м (джерело знаходиться в початку координат), відносяться відповідно до напрямів уздовж вітру, уперек вітру і вертикально до поверхні;  $\tilde{u}$  – середня швидкість вітру, м/с;  $C_y$  і  $C_z$  – узагальнені коефіцієнти турбулентної дифузії;  $n$  – параметр, числове значення якого змінюється між 0 і 1 залежно від стійкості атмосфери (Сеттон прийняв  $n=1/5$  при сильній нестійкості,  $n=1/4$  за нейтральних умов,  $n=1/3$  для помірної інверсії і  $n=1/2$  для сильної інверсії).

На рисунку 2 наведено розрахований в середовищі Maple розділ концентрації аерозоллю від точки зварювання за вихідних параметрів:

- >  $Q := 10$  г/с
- >  $C_y := 10$
- >  $C_z := 10$
- >  $u := 5$  м/с
- >  $n := 1.5$

$$f(x, y, z) = \frac{2 \cdot Q}{\pi \cdot C_z \cdot C_y \cdot u \cdot x^{2-n}} \times e^{-x^{n-2} \cdot \left( \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right)}$$

$$f := (x, y, z) \rightarrow \frac{2Qe^{-x^{n-2} \cdot \left( \frac{y^2}{C_y^2} + \frac{z^2}{C_z^2} \right)}}{\pi \cdot C_y \cdot C_z \cdot u \cdot x^{2-n}}$$

Безперервне, нескінченно довге лінійне джерело, розташоване перпендикулярно до напрямку вітру, продуктивністю  $Q$  г/(сек·см) дає:

$$\chi_L(x, z) = \frac{2 \cdot Q}{\pi^{1/2} \cdot C_z \cdot \tilde{u} \cdot x^{1-n/2}} \times \exp \left[ -\frac{z^2}{C_z^2 \cdot x^{2-n}} \right]. \quad (4)$$

```
> plot3d(f(x, y, 0), x = 0..50, y = 0..50);
```

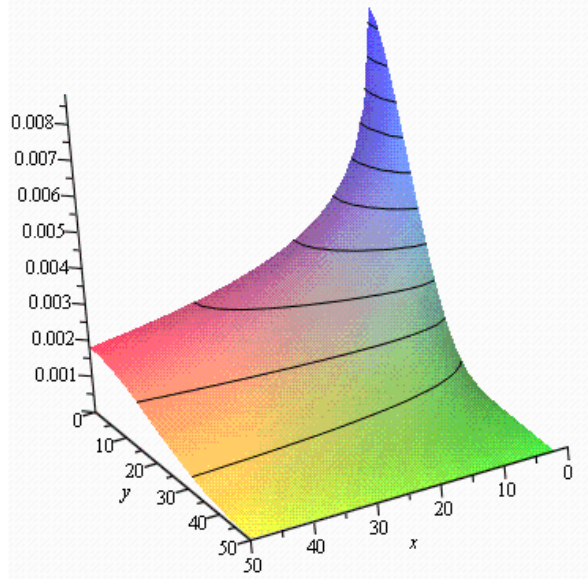


Рисунок 2 – Зміна концентрації аерозоллю, г/см<sup>3</sup> на поверхні як функція координат  $x$  та  $y$  за заданих значення узагальнених коефіцієнтів турбулентної дифузії

```
> plot3d(f(x, 0, z), x = 0..50, z = 0..5);
```

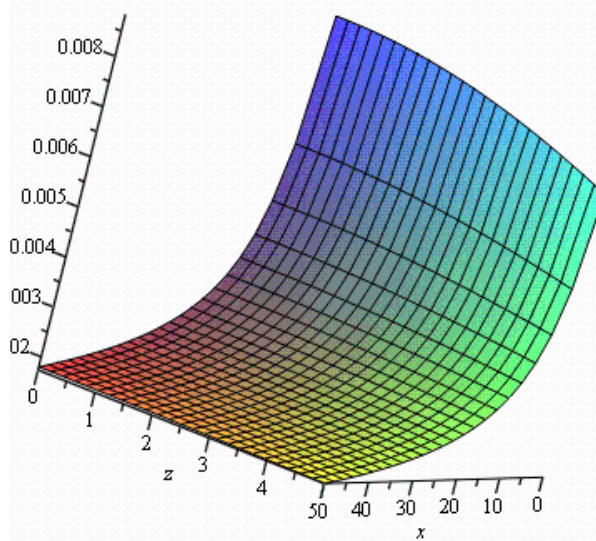


Рисунок 3 – Зміна концентрації аерозоллю, г/см<sup>3</sup> на поверхні угору як функція координат  $x$  та  $z$  за заданих значення узагальнених коефіцієнтів турбулентної дифузії

Тут просторові координати  $x, y, z$  (джерело в початку координат) відносяться відповідно до напрямів уздовж вітру, уперек вітру і до вертикального;  $\tilde{u}$  – середня швидкість вітру,  $C_y$  і  $C_z$  – узагальнені коефіцієнти турбулентної дифузії;  $n$  – параметр, числове значення якого змінюється між 0 і 1 залежно від стійкості атмосфери (Сеттон прийняв  $n=1/5$  при сильній нестійкості,  $n=1/4$  за нейтральних умов,  $n=1/3$  для помірної інверсії і  $n=1/2$  для сильної інверсії).

Інтеграція обох частин рівнянь (3) і (4) за часом дає співвідношення між загальною кількістю випущеного джерелом за певний час ре-

човиною і масою речовини, зібраної при безперервному пропусканні диму в даній точці через фільтр протягом цього ж часу. Ці співвідношення справедливі, незалежно від того, чи буде продуктивність джерела постійною в часі, чи ні, і корисні на практиці, оскільки простіше виміряти повний приріст фільтра, ніж концентрацію. Інший корисний висновок: що проінтегрована по  $y$  від  $-\infty$  до  $+\infty$  концентрація від точкового джерела продуктивністю  $Q$  чисельно рівна концентрації на такій же відстані від лінійного джерела з продуктивністю  $Q/см$ .

З аналізу цих рівнянь випливає, що концентрація прямо пропорційна продуктивності джерела і приблизно зворотно пропорційна швидкості вітру. Вимірювання в димових хмарах підтвердили, що для точкового джерела розподіл концентрації в поперечному і вертикальному напрямках приблизно описується кривою Гауса з тією лише відмінністю, що унаслідок віддзеркалення від поверхні землі вертикальний розподіл відповідає лише одній половині цієї кривої. При  $n=1/4$ , що відповідає дифузії над порослим трав'ям підвищенням в умовах адіабатичного градієнта, з рівнянь (3) і (4) випливає, що максимальна концентрація (відповідна  $y=z=0$ ) повинна зменшуватись з відстанню  $u$  напрямі вітру як  $x^{-1,75}$  – для точкового джерела і як  $x^{-0,88}$  – для нескінченного лінійного джерела. Цей висновок добре узгоджується з експериментальними даними, отриманими для газових і димових хмар на Британській військово-хімічній експериментальній станції в Портоні.

Для прогнозу абсолютних значень концентрації в широкому діапазоні метеорологічних умов формули (3) і (4) не завжди задовільні, здебільшого внаслідок складності визначення коефіцієнтів  $C$  і невизначеності у виборі параметра  $n$  по вимірюваннях профілю швидкості вітру. Проте вони дуже корисні для прогнозування розсіювання і розповсюдження аерозольних хмар, а також при аналізі експериментальних даних про поведінку таких хмар в різних атмосферних умовах.

Теорія Колдера [5] у разі дифузії в адіабатичних умовах призводить до отримання наближених формул:

$$\chi_T = \frac{Q \cdot \tilde{u} \cdot \exp\left[-\frac{\tilde{u}}{k \cdot u_* \cdot x} \left(\frac{y}{a} + z\right)\right]}{2 \cdot k^2 \cdot a \cdot u_*^2 \cdot x^2}, \quad (5)$$

$$\chi_L = \frac{Q}{k \cdot u_* \cdot x} \exp\left(-\frac{\tilde{u} \cdot z}{k \cdot u_* \cdot x}\right), \quad (6)$$

де:  $k$  – постійна Кармана;  
 $a$  – відношення поперечного і вертикального ступеня турбулентності;  $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ ;

$\tau_0$  – напруга тертя вітру до поверхні землі;  
 $\rho$  – густина повітря.

За допомогою цих рівнянь можна виразити концентрацію диму від точкового або лінійного

джерела, розташованого на рівні землі, через метеорологічні величини, які неважко визначити, а саме: із співвідношення  $a$ , яке легко визначити із записів поривчастості вітру, до швидкості тертя  $u^*$ , яку можна розрахувати за профілем вітру.

Ці дані застосовні лише до умов малих температурних градієнтів (повна хмарність, помірний або сильний вітер). Зростання градієнта різко пришвидшує розсіювання, особливо по вертикалі, тоді як перехід від позитивного градієнта до негативного (інверсії) дуже помітно зменшує швидкість дифузії.

Вплив термічної нестійкості найясніше виражений при слабкому вітрі. Хоча в теорії Колдера, поза сумнівом, усунені деякі труднощі теорії Сеттона, проте при зіставленні результатів обчислень з експериментальними даними по розповсюдженню газу і диму, аж до відстаней порядку 1000 м, виявляється, що точність формул однакова. Втім, сам Колдер указував на застосовність своєї теорії лише до відстаней порядку 1000 м, оскільки вона заснована на припущенні, що напруга тертя постійна по всій висоті атмосферного шару, в якому поміщена хмара. Для відстаней порядку декілька кілометрів і, отже, висоти хмари, вимірюваної багатьма сотнями метрів, це припущення вже не є вірним.

### Висновки

При зварюванні підземних і наземних магістральних газопроводів аерозольний дим змішується з повітрям за рахунок поперечної і поздовжньої дисперсії, конвективного переносу та молекулярної дифузії. При вітровому штилю на розповсюдження аерозольної хмари впливає тільки молекулярна дифузія.

Показано, що хмара аерозолю, що розповсюджується за вітром, безперервно розсіюється. При цьому частинки дифундують в усіх напрямках, і концентрація частинок знижується.

Аналіз виконаних розрахунків дозволив побудувати концентрації аерозольної хмари від точкового джерела, яким є місце ручного зварювання на відкритому повітрі.

### Література

- 1 Эльтерман В.М. Закономерности тепловых струй [Текст] / В.М. Эльтерман // Сборник научных работ институтов охраны труда ВЦСПС. – М.: Профиздат, 1960. – № 1. – С.18-20.
- 2 Фукс Н.А. Механика аэрозолей [Текст] / Н.А.Фукс. – М.:Изд. АН СССР, 1955. – 351 с.
- 3 Грин Х. Аэрозоли, пыли, дымы и туманы [Текст] / Х.Грин, В.Лейн. – М.: Изд-во «Химия», 1972. – 428 с.
- 4 Полукаров Ю.О. Моделирование пилового навантаження на органи дихання зварника для оцінки ризику професійної захворюваності [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 05.26.01 / Юрій Полукаров Олександрович. – Державний комітет України з нагляду за охороною праці, 2005. – 140 с.

5 Левченко О.Г. Вплив складу основного металу на гігієнічні характеристики аерозолів, що утворюються при зварюванні високолегованих сталей покритими електродами [Текст] / О.Г. Левченко, А.В. Булат, О.М. Безушко // Проблеми охорони праці в Україні: Збірник наукових праць. – 2009. – Вип. 17. – С.168 с.

6 Самсонов В.Т. Определение границ циркуляционных зон, возникающих при обтекании производственных зданий ветром [Текст] / В.Т. Самсонов // Научные работы институтов охраны труда ВЦСПС. – 1976. – Вип. 101(3). – С. 8-17.

7 Самсонов В.Т. Математическая модель процесса очистки промышленных выбросов от пыли / В.Т. Самсонов // Электронный вариант. – 2004.

8 Берлянд М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е. Берлянд – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії*  
12.12.11

*Рекомендована до друку професором*  
**Мойсишиним В.М.**