

ДОСЛІДЖЕННЯ ТУРБУЛЕНТНОЇ ДИФУЗІЇ ДИМОВИХ ГАЗІВ У ПОТОЦІ ПОВІТРЯНОГО СЕРЕДОВИЩА

О.М. Бортняк, М.П. Школьнік, Д.Ю. Журавльов, Р.Я. Гнатюк

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 993338,
e-mail: public@nuing.edu.ua

Розглянуті актуальні на сьогоднішній день проблеми забруднення повітряного басейну населених пунктів викидами продуктів згоряння, утворених в результаті нерегульованого спалювання газоподібних вуглеводнів промисловими установками виробничих об'єктів нафтогазового комплексу. Проведено аналіз процесів поширення шкідливих речовин у приземному шарі атмосферного повітря за межі санітарно-захисних зон підприємств. Наведено результати експериментальних досліджень турбулентного змішування димових газів у повітряному середовищі, які дали змогу встановити величину ефективного коефіцієнта турбулентної дифузії. Це в подальшому дасть можливість побудувати аналітичну модель, яка б максимально відображала зміну в просторово-часовому вимірі параметрів розсіювання шкідливих речовин.

Ключові слова: факельні установки, газоподібні вуглеводні, димові гази, продукти згоряння, розсіювання шкідливих речовин, турбулентна дифузія, ефективний коефіцієнт турбулентної дифузії.

Rассмотрены актуальные на сегодняшний день вопросы загрязнения воздушного бассейна населенных пунктов выбросами продуктов сгорания, образованных в результате нерегулируемого сжигания газообразных углеводородов технологическими установками промышленных объектов нефтегазового комплекса. Проведен анализ процессов распространения токсических веществ в приземном слое атмосферного воздуха за границы санитарно-защитной зоны предприятий. Приведены результаты экспериментальных исследований турбулентного перемешивания дымовых газов в воздушном пространстве, которые позволили установить величину эффективного коэффициента турбулентной диффузии. Это впоследствии позволит создать аналитическую модель, максимально отображающую изменение в пространственно-временном измерении параметров рассеивания вредных примесей.

Ключевые слова: факельные установки, газообразные углеводороды, дымовые газы, продукты сгорания, рассеивание вредных примесей, турбулентная диффузия, коэффициент турбулентной диффузии

The questions of environmental pollution by harmful substances that are formed by uncontrolled combustion of hydrocarbon gases are considered. The analysis of processes of distribution the toxic matters in the ground layer of atmospheric air out of the scopes of sanitary-protective area of enterprises is conducted. These problems are very actually on today. The results of experimental researches of turbulent interfusion of smoke gases in air space are resulted. These results allowed to set the size of effective coefficient of turbulent diffusion. It will give possibility afterwards to create an analytical model that would maximally represent the change in the spatially - temporal measuring of parameters of dispersion of harmful admixtures.

Keywords: flare, gas hydrocarbons, exhaust, combustion products, dispersion of toxic substances, turbulent diffusion, effective coefficient of turbulent diffusion

Сучасний стан забруднення атмосферного повітря викидами сполук сірки та азоту, легких органічних сполук і твердих частинок, а також вторинними забруднювачами, зокрема такими, як озон і продукти реакції аміаку, негативно впливає на здоров'я населення та на екосистеми в цілому, призводить до несприятливих екологічних наслідків: знищення рослинного покриву, знеліснення, підвищення кислотності води. У нижніх шарах атмосфери внаслідок реакцій легких органічних сполук та оксидів азоту утворюється приземний озон, який є потужним фотохімічним окислювачем. Збільшення його вмісту у повітрі негативно впливає на здоров'я людей, тваринний та рослинний світ. Серйозною проблемою для здоров'я, пов'язаною із забрудненням атмосферного повітря, є негативний вплив твердих частинок. Висока їх концентрація може викликати загострення симптомів у хворих на астму, скорочення об'єму легень, а також сприяти розвитку канцерогенних захворювань та підвищення рівня смертності [1].

Одними з основних забруднювачів атмосфери даними шкідливими речовинами є підприємства нафтогазової галузі. Найбільшу потенційну небезпеку з точки зору забруднення повітря, несуть об'єкти, виробничі процеси яких пов'язані, насамперед, зі спалюванням вуглеводневої сировини. Для забезпечення безаварійної роботи більшості технологічних установок необхідним є експлуатація пристроїв факельного спалювання газів, які з ряду причин не можуть бути використані підприємствами безпосередньо. Недосконалість таких технологій унеможлиблює забезпечення необхідного контролю за процесами згоряння, внаслідок чого відбувається неорганізоване спалювання газоподібних вуглеводнів, що характеризується неповним згорянням, що призводить до теплового та хімічного забруднення навколишньої території. При цьому в повітряний простір викидаються значні обсяги шкідливих речовин, найбільш небезпечними з яких є оксиди азоту та вуглецю, тверді частинки (активна сажа), сполуки сірки та метан, який є значно активнішим парниковим газом, ніж CO₂. Невиконання

підприємствами у встановлені терміни заходів щодо зниження обсягів викидів до нормативного рівня, низький темп впровадження сучасних технологій їх очищення чи енергозберігаючих замкнених технологічних процесів, обумовлюють незадовільний стан атмосферного повітря населених пунктів України. Найбільш несприятливому впливові шкідливих чинників підлягає населення, яке мешкає в межах санітарно-захисних зон промислових підприємств. За результатами проведених досліджень [2], концентрація сажі поза межами санітарно-захисної зони підприємств, технологічні процеси яких передбачають скидання хвостових газів на факельні установки, більшість яких не обладнана пристроями для бездимного згорання, складає $0,4 \text{ мг/м}^3$, що майже утричі перевищує гранично допустиму норму. На значній віддалі від факела фіксуються і суттєві концентрації оксидів азоту (до 3 км) та вуглецю (до 15 км), що призводить до підвищення рівня канцерогенної захворюваності місцевого населення, уражень органів травлення, нервової системи та зору.

У зв'язку з цим актуального значення набуває проблема кількісної оцінки розподілу концентрацій шкідливих речовин в просторі з віддаленням від джерела їх викиду. Питання розповсюдження домішок відноситься до області атмосферної дифузії. Розсіювання викидів в атмосфері є складним процесом і залежить від багатьох взаємопов'язаних факторів: фізико-хімічних властивостей речовин, що викидаються, типу джерела забруднення, метеорологічних умов, характеру місцевості тощо. На сьогоднішній день запропонована значна кількість аналітичних методів розрахунку, що пов'язують розсіювання викидів з окремими зі згаданих вище чинників. Проте жоден з цих методів не враховує їх спільного впливу. Тому необхідним є подальший розвиток розроблення математичних моделей атмосферної дифузії з метою оцінки розсіювання шкідливих речовин від джерел їх викиду.

Здебільшого такі задачі вирішуються шляхом побудови аналітичної чи регресійної моделей, які відображають зміну необхідних параметрів у просторово-часовому вимірі. Основна проблема використання аналітичного підходу є невизначеність завдання так званих коефіцієнтів турбулентної дифузії. В результаті точність отриманих оцінок техногенного забруднення виявляється незадовільною.

Одним з методів визначення величини коефіцієнта турбулентної дифузії є зіставлення аналітичних та експериментальних закономірностей розподілу концентрації газу в повітряному середовищі. Дослідження турбулентного змішування в необмеженому повітряному просторі в лабораторних умовах пов'язане з певними технологічними труднощами. Значно спрощується процес проведення експерименту, якщо простір обмежити, наприклад трубопроводом порівняно великого діаметра, що дозволить знехтувати впливом його стінок та забезпечити постійну швидкість газоповітряного потоку в площині досліджуваного простору.

Короткий аналіз літературних джерел з питань турбулентного змішування рідин і газів під час їх руху трубопроводами дає підстави зробити висновок, що даній проблемі, яка має суттєве наукове та практичне значення, вітчизняними та закордонними вченими, зокрема такими як Фролов К.Д., Нечваль М.В., Яблонський В.С., Юфін В.А., Марон В.И, Фуллер і Броун, Давідсон Дж. Ф. та ін. приділена значна увага. Однак, у порівнянні з вивченістю процесів сумішоутворення рідин, зокрема нафтопродуктів, кількість досліджень, особливо експериментальних, присвячених турбулентному змішуванню газів, є незначною.

У роботах Яблонського В.С., Юфіна В.А., Харламенко В.І, Фролова К.Д., Шульца С. та багатьох інших авторів були проведені дослідження процесів сумішоутворення нафтопродуктів у випадку їх послідовного перекачування трубопроводом за різних умов проведення експериментів (зміни параметрів трубопроводу, фізичних властивостей речовин та режимів їх руху) та встановлені аналітичні залежності для визначення коефіцієнта турбулентної дифузії. Однак, повне застосування результатів цих досліджень для процесів турбулентного змішування газів є неможливим, оскільки сумішоутворення останніх має свої особливості. В такому випадку можна отримати суттєві відхилення від реальних величин.

Фундаментальні теоретичні та експериментальні дослідження поздовжньої турбулентної дифузії в потоці рідини викладені в роботах Тейлора Г. Дж. [3], яким була запропонована формула для визначення ефективного коефіцієнта турбулентної дифузії для флюїдів

$$k = \xi r W \sqrt{\frac{\lambda}{8}}, \quad (1)$$

де: W - середня швидкість руху потоку, м/с;

r - внутрішній радіус трубопроводу, м;

λ - коефіцієнт гідравлічного опору;

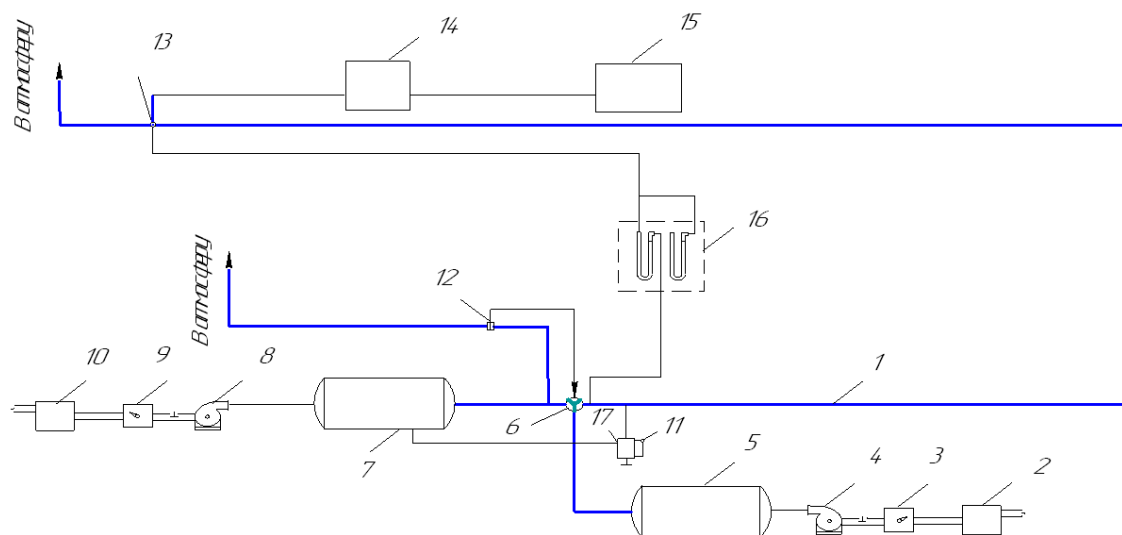
ξ - коефіцієнт, що враховує інтенсивність

змішування речовин і визначається експериментально.

У ході експериментальної перевірки даної залежності Давідсон Дж. Ф. встановив числові значення коефіцієнта ξ для змішування газів, які виявилися в 1,5-2 рази більшими, ніж у роботі Тейлора.

Таким чином, провівши аналогію процесів змішування продуктів згорання газоподібних вуглеводнів у певному об'ємі повітряного середовища з процесами сумішоутворення, що відбуваються у випадку одночасного перекачування різних газів трубопроводом, можна, спираючись на досвід авторів згаданих вище робіт, на основі експериментальних та теоретичних досліджень, встановити величину ефективного коефіцієнта змішування дифундуючих з атмосферним повітрям шкідливих речовин.

Вибір необхідної методики проведення експерименту потребує попереднього аналізу існуючих способів встановлення розподілу концентрації однієї речовини в середовищі іншої.



1 – трубопровід; 2, 10 – стабілізатор напруги 220 В; 3, 9 – лабораторний трансформатор;
4, 8 – повітряний компресор; 5, 7 – ресивер відповідно для повітря та газу;
6 – двоходовий рівнопрохідний кран; 11 – секундомір; 12 – дросельна шайба; 13 – зонд (точка заміру);
14 – прилад для вимірювання концентрації testo-350; 15 – ПК; 16 – диференційний манометр;
17 – тарирована ємність для впорскування трасера

Рисунок 1 – Схема лабораторної експериментальної установки

Достатньо відомим і широко розповсюдженим серед дослідників способом оцінки розподілу концентрації речовин, та встановлення чинників, що впливають на процеси змішування, є метод дискретно-рівномірного відбору проб суміші рідин в трубопроводі.

Принципова схема такого методу полягає в наступному. На ділянці трубопроводу в її початковій точці у потік флюїду ін'єктується трасер (флюїд іншого сорту) або організовується послідовне перекачування двох флюїдів з дещо різними фізичними властивостями. Під час руху трубопроводом у зоні контакту флюїдів відбувається їх перемішування, характер якого залежить від низки чинників: довжини ділянки трубопроводу, його діаметра, режиму течії потоку, турбулентної дифузії, в'язкості та ін. В кінцевій точці ділянки трубопроводу в зоні змішування флюїдів проводять відбір проб суміші з допомогою спеціального пристрою, який зазвичай називають пробовідбірником. Відібрані порції суміші аналізуються і визначається концентрація одного з флюїдів в кожній порції суміші. В якості критерію концентрації приймається густина, інтенсивність кольору, радіоактивність тощо.

Після чого, оскільки відбір проб проводиться з визначеним кроком часу, знаходять закономірність розподілу концентрації у часі побудовою графіка в координатах "концентрація – час". Аналізуючи отримані залежності за різних умов, оцінюють об'єм суміші в різних границях концентрації та вплив тих чи інших чинників на процес змішування флюїдів.

Даний метод може бути застосованим і для дослідження газоподібних речовин, однак реалізація пов'язана з певними труднощами вимірювання параметрів суміші газів, що характеризують розподіл концентрації. Використання

даного методу відбору проб на коротких трубопроводах, дозволених монтажем в лабораторних умовах, суттєво ускладнюється внаслідок невеликих розмірів зони суміші газів. Такі умови відбору проб суміші газів вимагають герметичності вузлів пробовідбірника, що значно ускладнює його конструкцію та проведення дослідів.

Врахування даних чинників вимагає проведення експериментальних досліджень із застосуванням іншої методики.

Більш придатним для проведення лабораторних досліджень змішування газів є метод безперервного вимірювання параметрів їх суміші безпосередньо в трубопроводі.

З метою максимального наближення експерименту до умов емісії продуктів згоряння з джерела викиду в навколишнє середовище, як "робочі" речовини вибрані атмосферне повітря та димові гази, утворені в результаті нерегульованого спалювання вуглеводневої сировини в двигунах газомотокомпресорів. Оскільки, як свідчать результати досліджень [4], вміст оксидів азоту визначає токсичність продуктів згоряння природного газу на 90-95 %, основна увага була приділена дослідженню зміни концентрації в повітряному середовищі саме цієї речовини. Оксиди азоту та повітря мають різні молекулярні маси та практично однакову кінематичну в'язкість.

Дослідження турбулентного змішування димових газів в повітряному середовищі проводилося на лабораторному стенді (рис. 1), який складався з трубопроводу умовним діаметром 300 мм, вузлів подачі та регулювання режимів повітря і газу, вузла контролю і запису параметрів змішування газів, приладів вимірювання тиску, витрати та температури.

В трубопроводі 1 повітряним компресором 4 нагніталось повітря через ресивер 5 та двоходовий кран 6. Режим руху повітря регулювався шляхом зміни обертової частоти повітряного компресора за допомогою автотрансформатора 3. Газ компресором 8 подавався в трубопроводі через ресивер 7 та двоходовий кран 6. Контроль тиску здійснювався диференційними манометрами 16, витрати – приладом 14. Подавання порції газу в потік повітря відбувалася за допомогою тарованої ємності 17. Час ін'єктування контролювався секундоміром 11.

Контроль режиму руху, вимірювання температури та концентрації токсичних речовин в димових газах проводилось газоаналізатором виробництва Німеччини (фірми "Testo"). Прилади цієї фірми сертифіковані Держстандартом України і внесені в держреєстр приладів України. Надійною і ефективною системою аналізу димових газів є модульний комплекс, який складається з промислового зонду 13, блоку пробопідготовки testo-339, газоаналізатора testo-350 та командно-вимірювального блоку 14.

Переваги газоаналізатора такого типу полягають в швидкості вимірювання, індикації параметрів аналізу, низькому рівні утворення конденсату і як наслідок досягається висока точність виміру.

Газовідбірний зонд з'єднується з блоком пробопідготовки шлангом, який обладнано автоматичним регулюванням температури та фільтром для очищення газової проби від пилу. Всі елементи з'єднання виготовлені у вигляді різьбових з'єднань. Гнучкість матеріалу, з якого виготовлено шланг, дозволяє встановлювати блок пробопідготовки в зручному місці. Шланг здатен зберігати температуру газів, що аналізуються, на рівні 150⁰С. Таким чином, волога, яка міститься в аналізованому газі, не може утворювати конденсат у фільтрі або на стінках шлангу. Саме за рахунок цього досягається точність вимірювання концентрації оксидів азоту.

Блок пробопідготовки підключається між газовідбірним зондом та газоаналізатором і працює повністю автоматично. На панелі керування встановлені індикатори (світлодіоди) для діагностування робочого стану приладу.

Останнім часом в промисловості для проведення хімічного аналізу димових газів підприємств використовуються прилади з електрорхімічними комірками. Саме такий принцип роботи має прилад testo-350. Слід відмітити, що переваги комірок очевидні і полягають в тому, що вони маленькі за габаритами; відносно дешеві; стійкі до механічного навантаження; надійні у роботі протягом тривалого часу використання. Однією з головних переваг комірок є те, що їх можна легко і швидко замінити. У блоці-аналізаторі встановлено комірки, які за електрорхімічним принципом визначають концентрацію компонентів (NO, NO₂, CO, O₂, SO₂) у газі. Комірки перетворюють вміст газу в електросигнали, які кабелем передаються в командно-вимірювальний блок.

Всі процеси вимірювання від газовідбірного зонду до блоку-аналізатора контролюються та керуються ручним командно-вимірювальним блоком. Він виводить на дисплей всі параметри аналізу, а його електроніка контролює стан всієї вимірювальної системи. До пам'яті приладу закладено характеристику палив, які використовуються найчастіше.

Використання газоаналізатора фірми Testo дозволяє не тільки скоротити час аналізу, а й використати для обробки результатів персональний комп'ютер (ПК) 15. Комп'ютерний адаптер під'єднується до серійного інтерфейсу комп'ютера і передає через нього вимірювальні значення. Використовуючи газовий аналізатор testo-350, вимірюється концентрація хімічних речовин (оксидів азоту) на дослідному стенді.

Експериментальні дослідження турбулентного змішування газів проводилися під час руху трасера (димових газів) в повітряному потоці, режим якого змінювався в межах середніх швидкостей потоку від 1 до 15 м/с. Вибір діапазону швидкостей здійснений на підставі метеорологічних спостережень в умовах природного середовища України. Ін'єктування трасера проводилося у стаціонарному режимі повітря зі швидкістю, рівною середній швидкості потоку. Послідовність дій у ході проведенні експерименту була такою: апіорі в трубопроводі встановлювався заданий стаціонарний режим руху повітряного потоку, середня швидкість якого контролювалася приладом testo. Встановивши необхідний заданий режим руху, проводилася реєстрація тиску, витрати і температури повітряного потоку. Після цього повітряний компресор відключався, і в трубопроводі подавався газ. Заданий режим руху встановлювався так само і підтримувався постійним за допомогою регулятора тиску. При цьому також проводився контроль параметрів потоку газу, після чого він переключався на лінію скиду в атмосферу, на якій встановлено регулюючий дросель 12, який дозволяє встановити гідравлічний опір, еквівалентний опору в основному трубопроводі. Далі в трубопроводі знову подавалося повітря при заданому першопочатковому режимі руху, і в потік повітря відбувалося подавання певної кількості димових газів при одночасному закритті дроселя 12. Ін'єктування трасера проводилося за допомогою тарованої ємності 17, в яку попередньо був набраний відповідний об'єм димових газів з ємності 7. Час впорскування контролювався секундоміром 11.

Момент підходу газоповітряної суміші до перерізу, в якому встановлений зонд газоаналізатора, фіксувався приладом 14, що відображалося на функціональній панелі керування модуля. Вимірюючи концентрацію NO_x по довжині зони утвореної суміші газів, була встановлена зміна концентрації NO_x в часі. Після чого дослід закінчувався, установка відключалась і за викладеною вище схемою проводилася підготовка до наступного дослідження. Всі попередні операції повторювалися вже в іншому режимі руху потоку газів.

На лабораторному стенді була проведена серія експериментів з метою дослідження турбулентного змішування газів у потоці повітряного середовища в умовах, максимально наближених до умов навколишнього середовища.

На основі отриманих експериментальних даних були побудовані криві розподілу концентрації по довжині зони суміші у випадку різних режимів руху газоповітряного потоку. На рисунку 2 наведені графічні залежності під час руху газів зі швидкістю 9,6 та 13,7 м/с.

Як видно з отриманих залежностей криві розподілу концентрації є симетричними відносно максимальної величини, що може бути пояснено близькими за значенням коефіцієнтами кінематичної в'язкості досліджуваних газів. У роботах Нечвала М.В. та Яблонського В.С. наводиться висновок про те, що розподіл концентрацій речовин з різними кінематичними в'язкостями є асиметричним відносно максимуму. Зі зменшенням швидкості руху потоку спостерігається поступове зниження максимального значення концентрації шкідливої речовини в газоповітряній суміші.

За даними експериментальних досліджень з використанням формули Тейлора проводилося визначення ефективного коефіцієнта турбулентної дифузії, за умов різних режимів руху потоку повітряного середовища в діапазоні середніх швидкостей 1-15 м/с, значення якого змінювалося в межах від 0,109 до 1,232 м²/с. В даному випадку коефіцієнт ξ у формулі (1) був прийнятим за Тейлором рівним 10,6.

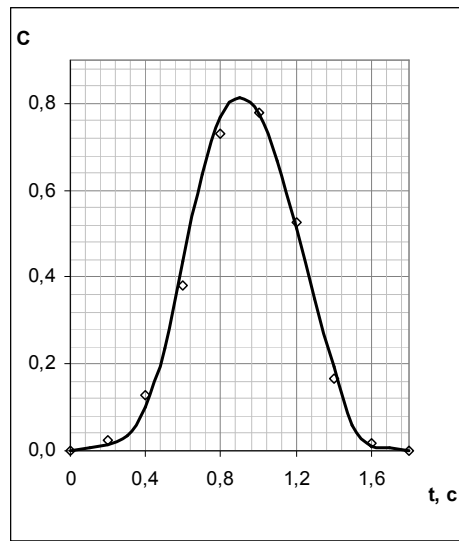
На рисунку 3 наведена графічна інтерпретація залежності відносної величини коефіцієнта змішування газів $\bar{k} = k / k_{max}$ від швидкості потоку w . Як видно залежність має прямолінійний характер і відображає збільшення даної величини зі збільшенням швидкості руху.

Вимірювання та визначення параметрів турбулентного змішування газів під час проведення дослідів на лабораторному стенді проводилося з певними похибками. З метою оцінювання отриманих відхилень використовувався метод математичної статистики [5]. Для кожного параметра приймалися до уваги кінцеві вибірки з n звітів, що містять значення x_1, x_2, \dots, x_n , отримані при повторних вимірюваннях однієї і тієї ж величини, і знаходилися їх середньоквадратичні відхилення від істинного значення параметра x_c за формулою

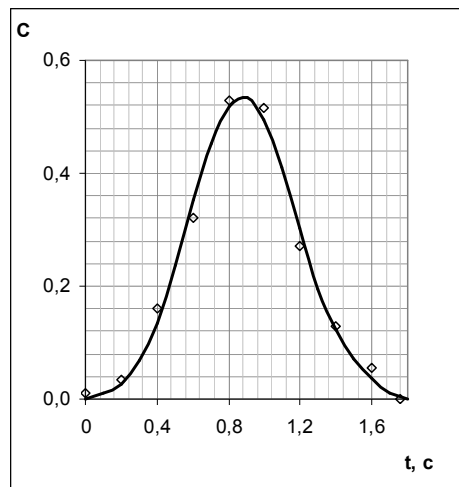
$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_c - x_i)^2}{n - 1}} \quad (2)$$

Максимальна величина середньоквадратичного відхилення у випадку проведення дослідів в лабораторних умовах склала 3,5 %.

З метою визначення коефіцієнта турбулентної дифузії були проведені зіставлення часткових рішень диференціального рівняння (3) та експериментальних залежностей розподілу концентрації оксидів азоту в повітряному середовищі.



а)



б)

а) швидкість – 13,7 м/с; б) швидкість – 9,6 м/с

Рисунок 2 – Криві розподілу концентрації шкідливих речовин у повітряному середовищі у випадку руху потоку

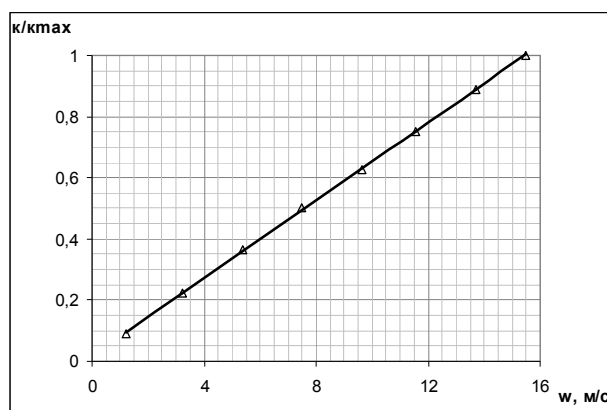


Рисунок 3 – Графічна залежність коефіцієнта турбулентної дифузії від швидкості руху повітряного середовища

Диференціальне рівняння, що описує розподіл концентрації одного газу в потоці іншого при турбулентному русі газів в трубопроводі, має вигляд [6]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + w \frac{\partial C}{\partial x} = \xi r \sqrt{\frac{\lambda}{8}} \frac{\partial}{\partial x} \left(w \frac{\partial C}{\partial x} \right), \quad (3)$$

де: C - концентрація одного з газів;
 t, x - поточні координати часу та довжини;
 w - середня швидкість руху потоку;
 λ - коефіцієнт гідравлічного опору;
 r - радіус трубопроводу;
 ξ - коефіцієнт, що враховує інтенсивність змішування газів (для рідин за Тейлором $\xi = 10,6$).

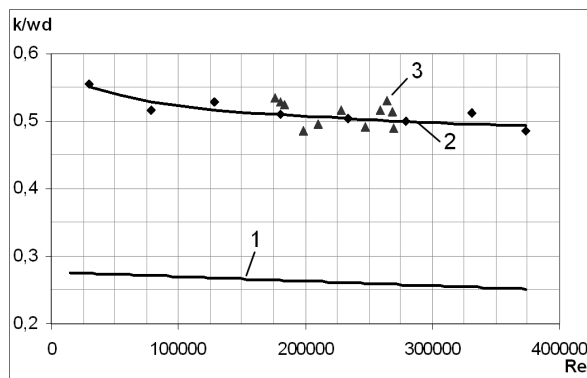
В результаті зіставлення розрахункових залежностей, отриманих шляхом розв'язання рівняння (3), з експериментальними для різних серій дослідів була знайдена величина коефіцієнта ξ у випадку змішування газоподібних речовин. Як виявилось, даний коефіцієнт залежно від режиму руху коливається в межах від 18,7 до 22,9, що в середньому в 1,96 рази більше, ніж це впливає з теорії Тейлора.

У безрозмірному вигляді формула (1), відповідно до якої проводилися розрахунки, може бути представлена як

$$\frac{k}{v} = 0,5 \xi Re \sqrt{\frac{\lambda}{8}}. \quad (4)$$

У цій формулі згідно з теорією Тейлора коефіцієнт ξ , отриманий для випадку змішування рідин, рівний 10,6. Однак, дослідження турбулентного змішування газів показали, що кращу апроксимацію експериментальних кривих розрахункові формули дають при усередненому числовому значенні ξ , рівному 20,8. Це дає підстави вважати, що формула (4) дає можливість отримати достатньо задовільні результати при визначенні коефіцієнта турбулентного змішування газів, приймаючи величину ξ у 1,96 рази більшою, ніж це впливає з теорії Тейлора.

На рисунку 4 наведені графічні залежності безрозмірного коефіцієнта турбулентної дифузії від числа Рейнольдса, отримані за дослідними даними та формулами ряду авторів (для рідин і газів).



1 – за формулою Тейлора; 2 – за даними експерименту; 3 – за даними Давідсона

Рисунок 4 – Залежність ефективного коефіцієнта турбулентної дифузії від числа Рейнольдса для рідин і газів

Як видно, експериментальні дані Давідсона узгоджуються з даними, отриманими при проведенні дослідів на лабораторному стенді і відрізняються від даних Тейлора в 1,8-2,2 рази. Аналіз кривих свідчить, що відхилення значень ефективного коефіцієнта змішування від даних, отриманих Тейлором, більш суттєво відрізняються при невеликих числах Рейнольдса, що відповідає малим швидкостям руху повітряного потоку.

Таким чином, не ставлячи за мету виведення нового аналітичного виразу для визначення коефіцієнта турбулентної дифузії, була використана для розрахунків формула, запропонована Тейлором, апіорі оцінивши можливість її застосування для умов змішування газоподібних речовин шляхом зіставлення розрахункових кривих розподілу концентрації газів з експериментальними даними і встановлення величини коефіцієнта ξ .

Література

- 1 Школьний М.П. До питання проблем енергозберігаючих технологій та забруднення навколишнього середовища / М.П. Школьний, О.М. Бортняк // Нафт. і газ. пром-сть. – 2007. – №2. – С. 53-54.
- 2 Бортняк О.М. Утилізація факельних газів як спосіб енергозбереження в газопереробній галузі // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2007. – №2(23). – С. 34-38.
- 3 Taylor G. J. Diffusion and mass transport in tubes / G. J. Taylor // Proceedings of the Royal Society. – 1954. – No 12. – V. 67.
- 4 Сигал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива / И.Я. Сигал. – Л.: Недра, 1988. – 312 с.
- 5 Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 384 с.
- 6 Марон В.И. Уравнения турбулентного перемешивания газов, движущихся в трубе / В.И. Марон // Газовая промышленность. – 1970. – №3. – С. 58-61.

Стаття надійшла до редакційної колегії 21.07.10

Рекомендована до друку професором Семчуком Я.М.