

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПОШИРЕННЯ ДОМІШОК В АТМОСФЕРІ ВІД СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ

Наведено класифікацію існуючих моделей розповсюдження домішок в атмосфері, виконано аналіз цих моделей, виявлені їх переваги та недоліки, умови та можливості практичного застосування.

Розвиток методів прогнозу забруднення повітря ґрунтується на результатах теоретичного та експериментального вивчення закономірностей розповсюдження домішок від їх джерел. Причому всі існуючі моделі розповсюдження забруднення можна поділити на: 1) найпростіші моделі, які ґрунтуються на алгебраїчних залежностях; 2) статистичні моделі; 3) гаусові моделі турбулентного розсіювання домішок; 4) дифузійні моделі, які ґрунтуються на рівняннях турбулентної дифузії у граничному шарі атмосфери.

Причому за обраною системою відліку розрізняють 1) моделі з системою координат Ейлера (ейлерівські моделі) (Е) – вимірювальні прилади нерухомі щодо поверхні землі; 2) моделі з системою координат Лагранжа (Л) (лагранжеві або траєкторні моделі) – переніс домішки описується за допомогою лагранжевої траєкторії руху клуба домішки (матеріальної точки); 3) змішані (ейлерово-лагранжеві) моделі (3).

Проведемо короткий опис імітаційних моделей якості повітря від стаціонарних джерел згідно наведеної класифікації з точки зору доцільності їх практичного застосування:

1. Найпростіші алгебраїчні моделі.

1.1. **Прості детерміновані моделі (Е)** - ґрунтуються на емпіричних даних і формуються у вигляді алгебраїчних співвідношень [4].

Моделі описують зміну в часі і просторі показників забруднення повітря, а характеристики якості (попереджуючі чи небезпечні) використовують для оповіщення громадськості і навчання правилам поведінки (в епізодичних ситуаціях) при раптовому забрудненні повітря.

Наприклад, **моделі простих поверхневих джерел** співвідносять річні концентрації забруднюючих речовин над міською територією з

інтенсивностями джерел, помноженими на обернену величину середньої швидкості вітру. Для найпростішої моделі ступінь забруднення пропорційний кількості викидів. Цей коефіцієнт пропорційності використовується для розрахунку зміни концентрації забруднення атмосфери при зміні кількості викидів. Такі емпіричні моделі прогнозують ступінь майбутнього забруднення повітря в залежності від росту викидів за ретроспективними даними про якість навколишнього атмосферного повітря.

Моделі зниження до попереднього рівня – це загальний клас емпіричних моделей, що пов'язують прогноз якості повітря при зростанні викидів і ретроспективні дані щодо ступеню забруднення навколишнього повітря [4]. Поняття «зниження до попереднього рівня» введено для аналізу змін якості повітря, а не для кількісної характеристики забруднення повітряного середовища. Воно використовується при плануванні допустимих викидів забруднення в атмосферу як метод одержання оцінки ступеня необхідного скорочення викидів для узгодження із стандартами якості повітря. При цьому вважається, що існує пряма пропорційна залежність між відношенням теперішніх і майбутніх характеристик якості повітря за вирахуванням фонових забруднень.

Модифікація простої моделі зниження до попереднього рівня була використана при плануванні контролю за утворенням оксидів на основі даних контролю за неметановими вуглеводнями. Цим методом встановлена верхня гранична крива максимальних концентрацій оксидів.

Прості балансові моделі контрольного об'єму для аналізу проблем забруднення повітря в міських зонах розглянуті в роботі [4]. Ці моделі засновані на використанні контрольного об'єму з основою на поверхні землі і верхньою границею на поверхні шару інверсії (вершині шару перемішування). Бічні поверхні об'єму розташовані так, щоб охопити досліджувану міську зону.

Концентрація забруднення визначає її усереднене значення над місцем і не залежить від просторових координат вибору позиції рецептора. Це спричиняє те, що результати прогнозних оцінок мають обмежене застосування.

Моделі локального викиду і поширення хмари забруднення (3,Л). Математичні моделі локального викиду відносяться до перших найпростіших класів моделей якості повітря. Проте вони мають широке

застосування і відносяться до найбільш надійних способів аналізу і прогнозу якості повітря при наявності реальних вхідних даних про профіль вітру і відповідні коефіцієнти дифузії.

Прості моделі викиду для рівномірного вітру і заданих стабільних термальних умов мають наступні властивості:

- а) концентрації від безупинно діючого джерела змінюються в прямій пропорції від інтенсивності викиду;
- б) концентрації обернено пропорційно залежать від середньої швидкості вітру біля джерела;
- в) відстань від джерела до рецептора (місця аналізу) а також інтенсивність атмосферної турбулентності визначають висоту і ширину струменя переміщення забруднення в розглянутій зоні;
- г) концентрації можуть зменшуватися за рахунок хімічних реакцій, радіоактивного розпаду, вимивання опадами і *випадання домішки з хмари забруднення*(гравітаційні ефекти);

При використанні даного класу моделей потрібно вжити додаткових заходів обережності, щоб врахувати складну геометрію місцевості, можливий штиль та низькі рівні інверсії.

2. Дослідження мезомасштабного розсіювання (на відстані до 10 км) при стійкій температурній стратифікації над однорідною поверхнею часто проводиться за допомогою **моделі Гауса** [1, 2]. За дотримання вищевказаних умов ці моделі задовільно описують процес розсіювання (за винятком відстаней у декілька кілометрів від піднятого джерела викиду [3]). Однак їхні можливості для опису поширення домішок у турбулентному приземному шарі й особливо при наявності рельєфу обмежені [4]. Зокрема, це виявляється при дослідженні розсіювання домішок у кар'єрах. Результати експериментальних досліджень по вивченню перемішування різних «трассерів» в атмосфері над орографічно і термічно неоднорідною поверхнею показали обмеженість застосовності гаусівських моделей. Причина цього криється в складному характері орографічних процесів, які викликають збурення. Удосконалення методики обліку орографії в чисельних моделях розглядаються в роботах [2, 3, 4, 5].

Моделі локального викиду і розсіювання клубів забруднення в основному застосовуються для оцінки стратегії контролю за забрудненням повітря, при плануванні землекористування, при виборі розташування

енергетичних об'єктів чи при розробці підходів і стратегій заміни типу палива, використовуваного на цих об'єктах.

Застосування багатоджерельних моделей дозволяє генерувати корисні дані щодо розподілу не реагуючих забруднюючих речовин у міських зонах. За допомогою цих моделей одержують корисні дані щодо географічного поширення більш стійких забруднень у міських зонах, можна об'єднати ряд основних джерел забруднення й одержати важливі вказівки щодо міри необхідного контролю за викидами.

3. Статистичні моделі (Е). У статистичних моделях поширення забруднень використовуються стохастичні рівняння для встановлення співвідношень між показниками якості повітря і даними метеорології. Вони встановлюють співвідношення між оцінками концентрацій і значеннями параметрів, які дійсно вимірювалися при аналогічних обставинах.

Статистичні моделі мають невисоку вартість розробки і низькі потреби в обчислювальних ресурсах, однак, вони не можуть використовуватися поза межами початкових умов, які визначаються вихідними даними, що застосовувалися при їхній розробці й оптимізації. Ці умови звичайно містять у собі обмеження на варіації метеорологічних умов і варіацію просторового розміщення викидів. Статистичні моделі не можна застосовувати також при значних змінах у розподілі джерел викидів. Дані статистичних обробок не можуть бути перенесені на інші об'єкти без переоцінки емпіричних параметрів чи коефіцієнтів.

Статистичні моделі можна розділити на 3 категорії:

- усереднення за часом ;
- ті, що базуються на аналізі числових рядів. При цьому вивчаються два центральних питання щодо даних по якості повітря:
 - в чому полягає незалежність і кореляція між ступенем забруднення і даними метеорології.
 - яким чином можна передбачати рівень концентрації забруднення в повітрі у майбутньому для можливих метеорологічних умов за відомими статистичними даними щодо концентрацій забруднення в минулому і сьогодні.

При розв'язанні цих задач використовують кореляційний, регресійний і спектральний аналіз, а також теорію стохастичних рівнянь.

➤ *багатопараметричного* аналізу. Двома його важливими методами аналізу стану забруднення повітря є: метод рівноваги хімічних елементів і метод факторного аналізу.

- Метод рівноваги хімічних елементів – це процедура, яка відносить забруднення до індивідуальних джерел чи до класів джерел.

- Метод факторного аналізу є статистичною процедурою, яка використовує побудову ортогональних функцій, щоб виявити головні причини зміни забруднення повітря і пояснити сумарну дисперсію спостережених концентрацій за допомогою мінімальної кількості факторів.

Дифузійні моделі

Моделі контрольованих об'ємів (E, L). Клас цих моделей містить у собі інтегральні моделі контрольного об'єму та моделі рухомої частинки (стовпчикові), що базуються на записі інтегральної форми рівняння переносу і дифузії домішки для виділеного об'єму [4]. Контрольним об'ємом може бути деякий район над міською територією, область дослідження забруднення повітря в глибокій долині чи подібні характерні просторові області. Останні можуть розбиватися на ряд підоб'ємів. Вважається, що повітря і забруднюючі речовини в кожній обраній області добре перемішані, допускаються процеси хімічних та інших типів перетворень чи реакцій нейтралізації, а також випадання домішок.

Якщо обрані контрольні об'єми нерухомо пов'язані з досліджуваною територією, то враховуються потоки повітря і забруднюючих речовин через їхні границі і для побудови математичної моделі використовується ейлерова система координат. Лагранжева система координат застосовується для контрольних об'ємів, які переміщуються із середнім вітром. Для моделей, що використовують кілька контрольних об'ємів, необхідно визначати взаємовплив мас повітря, що рухаються, і характеристик його забруднення на суміжних границях. Це, з одного боку, ускладнює модель, а з іншого, - підвищує її адекватність спостережуваному явищу. Інтегральні моделі мають широке застосування в теорії примежових шарів в аеродинаміці, при розв'язанні проблем випаровування або конденсації, а також при дослідженнях багатьох інших фізичних явищ.

Методи частинок (стовпчикові) для опису поширення забруднення. Така модель базується на використанні гіпотетичного стовпця повітря, який рухається уздовж заданої траєкторії над розглянутим регіоном. Коли стовпець переміщується, то забруднюючі речовини інжектуються в його основі від тих джерел, над якими він проходить. У цей же час у

стовпцях можуть відбуватися хімічні реакції та інші перетворення. Інші основні припущення моделі зводяться до наступного:

- не відбувається ніякого горизонтального переносу забруднення через бічні грані розглянутого стовпця;
- немає змін по висоті для горизонтального вітру;
- припускається, що вертикальна конвекція є малою і нею можна знехтувати;
- потужності джерел і висота інверсії змінюються в часі;
- вершина стовпця розташовується на верхній границі інверсійного шару.

Моделі декількох контрольних об'ємів. Приземний шар повітря розділяється на двовимірні чи тривимірні ряди об'ємів з добре перемішаними домішками. Може змінюватися концентрація забруднення в кожному об'ємі від одного до іншого, а також у часі змінюватися середній вітер. Забруднене повітря надходить і залишає обрані об'єкти, але на границях об'ємів відсутній дифузійний обмін.

Перевага використання ряду контрольних об'ємів пов'язана з наступним:

- геометрія контрольних об'ємів адаптована з топографічними рисами місцевості, легко підключити варіації висот інверсії в часі;
- модель проста для інтерпретації і застосування (описується системою звичайних диференціальних рівнянь).

Недоліки моделі обумовлені:

- жорсткістю диференціальних рівнянь, якщо спостерігаються великі варіації у швидкостях переміщення макрочасток, і тому необхідно використовувати метод неявного інтегрування, що вимагає великих витрат комп'ютерного часу;
- нехтуванням вертикальною дифузією.

3.2. Скінченно-різницева сіткове моделювання поширення домішок (Е).

Сіткові моделі базуються на розв'язаннях рівнянь переносу і дифузії забруднюючих речовин з використанням різних скінченно-різницевих методів. Накопичено великий досвід та існують різноманітні способи скінченно-різницевого розв'язання рівнянь динаміки переміщень повітряних мас і динаміки переносу з ними забруднюючих домішок. В сіткових моделях найбільш важливою є метеорологічна частина комплексної проблеми прогнозу якості повітря.

Розроблено сукупність різницевих схем, які забезпечують збереження маси повітря, середньої кінетичної енергії вітру, середньої інтенсивності вихору. Схеми, описані в роботах [6], дозволяють досліджувати течії з великими градієнтами концентрації домішок і одночасно зберігати властивість позитивності (монотонності).

Широке практичне застосування знайшов метод дробових кроків, різні варіанти методу розщеплення [6], які полягають у заміні багатомірної проблеми сукупністю проблем нижчої розмірності, які більш ефективно розв'язуються на ЕОМ. При вивченні процесів забруднення атмосфери дуже важливими є методи зниження схемної (сіткової) дифузії, пов'язаної з заміною похідних розділеними різницями, особливо при апроксимації конвективних складових однобічними розділеними різницями[5, 6, 7].

Сіткові моделі варто розвивати у напрямку отримання достовірних і фізично обґрунтованих даних по розрахунку структури вітру над міськими зонами і місцевостями із складним рельєфом.

Перерахуємо найбільш важливі фізичні прояви рельєфу місцевості на характер розсіювання домішок в атмосфері, які варто вивчати на основі сіткових моделей:

- зміна структури переміщення повітряних мас над долиною;
- дослідження нестабільності течій в приземному шарі атмосфери, викликане гальмуванням на підвітряній стороні височини або натіканням повітряних мас на височину;
- перетікання холодного повітря в долину і наявність висхідного потоку на освітленій сонцем горбистій місцевості;
- динаміка термічних структур в атмосфері;
- складні інверсійні структури, їх утворення і руйнування;
- дослідження вертикального зсуву профілю вітру;
- циркуляційні переміщення повітря (бриз) над земною поверхнею поблизу границі з водною поверхнею;
- вихори після перешкоди.

Складні сіткові моделі дозволяють врахувати хімічні реакції в забрудненому повітрі, зміну аерозольних часток при конденсації або випаровуванні, сухе та вологе випадання забруднюючих речовин.

Отже, підведемо підсумок проведеного аналізу.

Найпростіші алгебраїчні моделі занадто спрощені. Порівняння їх із тривимірною моделлю дифузії чи методом контрольованих обсягів

свідчить про наявність принципових недоліків. Однак з метою попереднього аналізу вони можуть бути дуже корисними при оцінці даних про середньорічне забруднення території міст і можуть вказати на необхідність більш докладного моделювання забруднення даної території для виявлення специфічних проблем щодо якості повітря.

Дуже популярними серед моделей локального викиду є гаусівські. Але відсутність надійних метеорологічних даних і характеристик дифузійного переносу обмежує область застосування моделей локальних викидів і струменів особливо для складного рельєфу місцевості, а також при стабільному приземному інверсійному шарі.

Щодо статистичних моделей, то можна сказати, що якщо ціль, для якої була побудована статистична модель, збігається з вимогами користувача, то вона може дати кращі результати, ніж чисельна імітаційна модель. У інших випадках статистична модель не застосовна.

Перевага моделі рухомої частинки над іншими обумовлена малими витратами комп'ютерного часу в порівнянні з тривимірними просторовими моделями і здатністю врахувати вплив специфічних джерел, що притаманне методу траєкторій. Недоліки моделі пов'язані з ототожненням переміщення повітря і забруднюючих речовин, з великими спрощеннями турбулентних режимів руху повітря в атмосфері, а також не враховується вертикальна конвекція повітря.

Якість прогнозних оцінок погіршується, коли стовпець відходить від поверхневого джерела викиду, що обумовлено нехтуванням процесу дифузії в стовпчику.

Сіткові моделі, будучи найкращими з існуючих моделей для врахування складних фізичних процесів, потребують великих затрат комп'ютерного часу і пам'яті ЕОМ.

На базі сіткових моделей розробляються наступні напрямки математичного моделювання:

- моделювання конвективного і дифузійного розповсюдження домішок;
- моделювання ефектів турбулентності;
- моделювання процесів хімічних перетворень у забрудненому повітрі.

Отже, як бачимо, математичні моделі на базі диференціальних рівнянь конвективного переносу і дифузії домішок в атмосфері фізично більш реальні, ніж більшість вище описаних моделей. Вони дозволяють більш детально імітувати забруднення атмосфери міст і промислових

регіонів. Сіткові моделі дозволяють ефективно врахувати забруднення повітря реагуючими домішками і дозволяють розрахувати концентрації домішок в областях із складним рельєфом місцевості (наприклад, міської забудови, рельєф із глибокими долинами і височинами).

* *

Приведена классификация существующих моделей распространения примесей, проведен анализ этих моделей, выявлены их достоинства и недостатки, условия и возможности применения.

* *

1. Атмосферная турбулентность и моделирование распространения примесей / Под ред. Ф.Т.М.Ньистадта и Х. Ван Дона. – Л.: Гидрометеиздат, 1985.
2. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. – Л.: Гидрометеиздат. – 1985.
3. Довгий С.А., Прусов В.А., Копейка О.В. Математическое моделирование техногенных загрязнений окружающей среды. – Киев: Наук. думка, 2000.
4. Згуровский М.З., Скопецкий В.В., Хрущ В.Х. и др. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде. – К., 1997.
5. Беляев Н.Н., Хрущ В.К. Численный расчет распространения аэрозольных загрязнений. Учеб. пособие. – Днепропетровск: ДГУ, 1989.
6. Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды – М.: Наука, 1982.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем / 2-е изд., испр. – М.: Наука, 1983.

*Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ*