**Національний технічний університет України**

**“Київський політехнічний інститут”**

**Савіна Марія Юріївна**

УДК 532.5:627.13

**Двовимірна модель та метод розрахунку переносу**

**забруднюючих речовин У відкритих потоках**

01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми

**Автореферат**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Київ - 2003

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі будівництва та експлуатації дорігНаціонального транспортного університету Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор

**Савенко В’ячеслав Якович**,

Національний транспортний університет,

завідуючий кафедрою будівництва та експлуатації доріг,

декан дорожньо-будівельного факультету

**Офіційні опоненти**: доктор технічних наук, професор

**Шеренков Ігор Аркадійович**,

Харківський державний технічний університет

будівництва та архітектури,

завідуючий кафедрою безпеки життєдіяльності

та інженерної екології

кандидат технічних наук, доцент

**Рубльов Андрій Валерійович**,

Національний транспортний університет,

доцент кафедри

**Провідна установа**: Інститут гідромеханіки НАН України, відділ стратифікованих течій

Захист дисертації відбудеться “22” вересня 2003 р. о 13 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.09 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги 37, корпус 5, аудиторія 307.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, пр. Перемоги 37.

Автореферат розісланий “19” серпня 2003 р.

Вчений секретар

спеціалізованої Вченої Ради В.І. Коньшин

**Загальна характеристика роботи**

**Актуальність теми.** Збільшення масштабів діяльності людства обумовлює значне погіршення екологічної ситуації. Відбувається інтенсивне забруднення водних джерел, повітряного середовища, земельних угідь. Особлива небезпека наслідків забруднення природних вод полягає у тому, що забруднюючі речовини, коли потрапляють в ріки, переносяться на великі відстані від місця їхнього викиду. У результаті негативному впливу шкідливих речовин піддаються рослинний і тваринний світ на значних територіях.

Для організації ефективних заходів щодо охорони рік від забруднення стічними водами і викидами, необхідно знати закономірності переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках у основній зоні змішування.

Фізика переносу забруднюючих речовин у природних водотоках відрізняється особливою складністю. При моделюванні процесу необхідно врахувати особливості відкритого потоку, а саме складну морфологічну і кінематичну структуру рік, явища відриву потоку, вплив гідротехнічних споруд, що також обумовлює анізотропні властивості відкритого турбулентного потоку. В той же час існуючі одномірні моделі здебільшого мають емпіричний характер і ґрунтуються на польових чи лабораторних експериментах, що дозволяє використовувати їх тільки в обмежених випадках. Тривимірні моделі дозволяють більш точно описувати процес переносу, але складність рівнянь руху рідини і турбулентної дифузії, проблема замикання рівнянь обумовлюють значні труднощі в реалізації тривимірних задач і роблять їхнє використання недоцільним при інженерних розрахунках. Визначення процесу переносу в основній зоні змішування у двовимірній постановці є найбільш доцільним. Однак відомі двовимірні моделі не завжди точно описують наведені вище явища. Сучасний рівень моделювання турбулентності та обчислювальної гідродинаміки дає можливість створити й реалізувати модель, яка б, між іншим, враховувала нерівномірність розподілу турбулентних скалярних потоків і напружень у річковому потоці, що дозволить отримати достовірні поля розподілу швидкостей і концентрацій для рішення екологічних задач. Тому розробка двовимірної моделі і методу розрахунку переносу консервативних забруднюючих речовин у відкритих потоках з урахуванням анізотропних властивостей турбулентних течій є актуальною задачею, що становить науковий і практичний інтерес.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Матеріали дисертаційної роботи використовувалися при виконанні науково-дослідної роботи "Удосконалення принципів і методів обліку регіональних, гідрогеологічних і гідравлічних умов і підвищення на їхній основі ефективності якості проектування, будівництва й експлуатації доріг" (державна реєстрація №0100U003716), котра виконувалася згідно з планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України.

**Мета і задачі досліджень.** Мета досліджень - розробити двовимірну математичну модель переносу консервативних забруднюючих речовин у природних водотоках з урахуванням анізотропних властивостей турбулентних течій і методу її реалізації.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі задачі:

- розробити математичну модель переносу консервативних забруднюючих речовин у природних водотоках;

- обґрунтувати і вибрати для моделі переносу забруднюючих речовин замикаючу модель турбулентності;

- розробити метод чисельної реалізації створених математичних моделей з обґрунтуванням початкових і граничних умов для вирішення запропонованої задачі;

- провести експериментальні дослідження для апробації моделі переносу забруднюючих речовин і методу її реалізації.

**Об'єктом досліджень** є процеси забруднення і поширення речовин у турбулентних потоках.

**Предмет досліджень** - процес переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках.

**Методи досліджень.** Процес переносу забруднюючих речовин досліджується за допомогою математичного моделювання і подальшої чисельної реалізації розробленої моделі з використанням диференціального числення, кінцево-різницевого методу предиктор-коректор, методу послідовної верхньої релаксації. Апробація розробленого методу визначення процесу переносу забруднюючих речовин здійснюється шляхом співставлення розрахункових даних із результатами експериментальних і тестових досліджень.

**Наукова новизна одержаних результатів:**

- розроблена двовимірна модель процесу переносу консервативних забруднюючих речовин в основній зоні змішування у водотоках, особливістю якої є врахування анізотропного стану турбулентного потоку;

- вперше запропоновано при розробці замикаючої моделі для рішення двовимірної задачі використовувати разом перетворені алгебраїчні співвідношення переносу турбулентних напружень і скалярних потоків та  модель турбулентності;

- розроблено метод реалізації запропонованих моделей, що дозволяє адекватно враховувати реальні фізичні процеси у відкритих потоках.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в розробці методу визначення процесу переносу забруднюючих речовин в основній зоні змішування у водотоках, що дозволяє замінити фізичне моделювання процесу математичним і одержати коректні числові значення полів швидкостей і концентрацій забруднюючих речовин. Це дозволяє:

- прогнозувати розподіл у водотоках забруднюючих речовин, що містяться у побутових та виробничих стічних водах.

- визначати місце скидання стічних вод у річки, обґрунтовувати ступінь і характер очистки;

- виконувати оцінку проектів будівництва і реконструкції споруд дорожньо-мостового комплексу з точки зору їхнього впливу на екологію водних джерел.

Результати дисертаційної роботи було використано в інституті "Укрдіпродор" при проектуванні мостового переходу через р. Західний Буг, с. Ягодин, а також у науково-виробничій фірмі "Мостобудсервіс" при розробці проекту капітального ремонту мостового переходу через р. Дністер, м. Хотин, що засвідчують довідки про впровадження.

**Особистий внесок здобувача** в одержанні наукових результатів, викладених у дисертаційній роботі, полягає в:

- обґрунтуванні й виборі основних факторів, що впливають на поширення забруднюючих речовин в основній зоні змішування у водотоках, і розробці двовимірної математичної моделі, що описує процес переносу забруднюючих речовин з урахуванням анізотропного стану турбулентного потоку;

- перетворенні алгебраїчних співвідношень для турбулентних напружень і скалярних потоків для вирішення двовимірної задачі;

- розробці методу чисельної реалізації запропонованих моделей у водотоках на підставі сучасних методів обчислювальної гідродинаміки.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень доповідалися й обговорювалися на 56-й науковій конференції професорсько-викладацького складу і студентів Українського транспортного університету (2000р.); щорічних наукових конференціях професорсько-викладацького складу і студентів Національного транспортного університету (2001-2002р.); VІ Міжнародній конференції "Гидроаэромеханика в инженерной практике" (5-8 червня 2001р., м. Харків); міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивні технології й енергозбереження в дорожньому будівництві" (24-26 жовтня 2001р., м. Київ); VІІ Міжнародній конференції "Гидроаэромеханика в инженерной практике" (3-6 червня 2002р., м. Київ); на 152-му засіданні Українського наукового семінару з гідравліки при Національному транспортному університеті (11 квітня 2002р.)

**Публікації.** По темі дисертаційної роботи опубліковано 7 статей у спеціалізованих виданнях.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаної літератури зі 102 найменувань на 9 сторінках, 4 додатків. Загальний обсяг роботи: 156 сторінок, враховуючи 19 рисунків і 1 таблицю.

**Основний зміст роботи**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, її зв'язок з науковими програмами, сформульовано мету і задачі дослідження, відмічено наукову новизну роботи і практичне значення результатів. Також зазначено особистий внесок автора, наведено відомості про апробацію результатів дослідження, відповідні публікації, подано структурну схему роботи.

У **першому розділі** наведено аналіз стану екології водних об'єктів України та огляд методів розв’язання задачі переносу забруднюючих речовин у водотоках. Проаналізовано різноманітні методи визначення концентрацій забруднюючих речовин в водотоках і відповідні системи рівнянь, а також наведено огляд моделей замикання рівнянь руху і переносу забруднюючих речовин.

Унаслідок напруженої екологічної ситуації проблема забруднення водних джерел стічними водами стає усе більш актуальною. Над вирішенням цієї проблеми працювало багато відомих вчених. Найбільший внесок зробили В.І. Квон, А.В. Караушев, Л.Л. Пааль, Й.Д. Родзиллер, В.О. Фролов, Є.В. Бруяцький, І.А. Шеренков, А.І. Шишкін, О.Н. Мілітєєв та інші.

Математичні моделі, що описують перенос забруднюючих речовин, засновані на рівняннях руху, нерозривності і турбулентної дифузії, розв’язання яких становить проблему замикання. Дослідженнями в цьому напрямку займалися такі провідні вчені, як І. Буссінеск, Л. Прандтль, Г. Тейлор, Б.Є. Лаундер, В. Роді, П. Бредшоу, К. Ханжалик, І.А. Бєлов, Є.П. Дибань, Е.Я. Епік, А.П.Нетюхайло, Є.В. Бруяцький, В.Я. Савенко, Б.А. Коловандін та інші.

На основі аналізу робіт сформулювано мету і задачі дослідження, а також намічено шляхи розв’язання поставлених задач.

У **другому розділі** наведено результати теоретичних розробок. При формалізації процесу переносу забруднюючих речовин в річковому потоці, було виявлено фізичні явища, які необхідно враховувати при створенні моделі, що реалістично описує розповсюдження забруднюючих речовин.

Для отримання реальної картини руху відкритого потоку необхідно враховувати явища відриву, які істотно ускладнені впливом сил тертя і складною геометрією водотоків. Тобто при гідродинамічних розрахунках особливо важливим є адекватне відображення розподілу дотичних турбулентних напружень. В той же час стрибкоподібна зміна глибини русла, різнорідна шорсткість, що властива річковим потокам, вплив штучних споруд зумовлює нерівномірність розподілу напружень Рейнольдса і турбулентних потоків забруднюючих речовин, зміну їх значень у просторі. Це також визначає необхідність врахування анізотропних властивостей турбулентного потоку для адекватного опису процесів руху водяних мас і переносу консервативних забруднюючих речовин у річкових руслах.

Для багатьох практичних задач потрібно визначити закономірності розподілу забруднюючих речовин не стільки в місці стоку забруднених вод у річку, як на досить значних відстанях від нього, тобто в основній зоні змішування. Процеси розповсюдження забруднюючих речовин в цій зоні, з огляду на те, що вертикальні розміри річкового потоку істотно менше за горизонтальні, можна розглядати в двовимірній ідеалізації, що в свою чергу дозволяє значно спростити вихідні тривимірні рівняння. Однак для одержання адекватної математичної моделі при вирішенні задачі визначення концентрацій забруднюючих речовин важливо враховувати нерівномірність кінематичної та дифузійної структури течії на вертикалі.

З урахуванням вказаних вище факторів була розроблена відповідна нестаціонарна двовимірна модель переносу забруднюючих речовин для однофазного потоку.

За методикою І.А. Шеренкова та В.Я. Савенко рівняння руху, нерозривності та переносу забруднюючих речовин були отримані з тривимірних рівнянь Рейнольдса і турбулентної дифузії шляхом їхнього інтегрування по глибині потоку, тобто від позначки дна  до вільної поверхні потоку . При цьому локальні складові швидкостей і концентрацій забруднюючих речовин визначалися, відповідно до загальноприйнятого підходу, як:

, , (1)

де ,  – відхилення локальної швидкості  і локальної концентрації  від середніх значень за глибиною ( і  відповідно), при цьому величини  і  повинні тотожно підпорядковуватися умовам  і ,

 – функція розподілу швидкості по глибині,

 – безрозмірна вертикальна координата.

Для адекватного опису процесів переносу забруднюючих речовин необхідно враховувати зміну густості в подовжньому і поперечному напрямках, яка в наближенні двовимірної задачі представлена у вигляді , де  – коефіцієнт об'ємного розширення, для задачі переносу домішки – .

Відповідно до досліджень Є.В. Бруяцького, В. Роді прийнято, що нормальне турбулентне напруження  є величиною другого порядку малості в наслідок того, що представлена задача вирішується в двовимірній постановці, а явище внутрішніх течій не враховується.

З урахуванням оцінки величин доданків та відповідних умов спрощення отримані наступні рівняння руху і нерозривності:

, (2)

, (3)

, (4)

де  – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу швидкостей по вертикалі,

 – коефіцієнт, що враховує вплив форми русла і дозволяє виконувати інтегральну умову збереження імпульсу сил тертя,

 – емпіричний коефіцієнт тертя, що залежить від шорсткості дна русла.

При спрощенні вихідного тривимірного рівняння турбулентної дифузії були введені коефіцієнти , що враховують дисперсію домішки. Вказані величини визначалися з тривимірного рівняння турбулентної дифузії за методикою І.А. Шеренкова.

У результаті оцінки величин окремих доданків рівняння переносу забруднюючих речовин у річковому потоці було представлено в наступному вигляді:



, (5)

Нерівномірність розподілу швидкості по глибині визначалося за допомогою степеневого закону, як найбільш відповідного до реальних умов задачі:

, (6)

де  – динамічна швидкість.

Система рівнянь (2) – (5) визначає закономірності поширення забруднюючих речовин у природних водотоках. У рівняння входять доданки, що описують турбулентні напруження і турбулентні скалярні потоки, які є кореляційними другими моментами пульсацій швидкості і другими змішаними моментами пульсації швидкості і речовини.

Для урахуванням анізотропного стану турбулентного потоку при визначенні згаданих величин доцільно використовувати алгебраїчні співвідношення переносу турбулентних напружень і потоків речовин разом з двопараметричною дисипативною  моделлю.

При використанні підходу, запропонованого В. Роді та А. Растоджі, зміну кінетичної енергії турбулентності  і швидкості її дисипації  для величин осереднених по глибині можна описати наступними рівняннями переносу:

, (7)

, (8)

де  – коефіцієнт турбулентної в'язкості.

Генерація кінетичної енергії турбулентності визначається формулою:

. (9)

На основі спрощення тривимірних алгебраїчних співвідношень переносу турбулентних напружень, що несуть у собі багато фундаментальних властивостей точних рівнянь переносу напружень Рейнольдса, для вирішення двовимірної задачі були отримані наступні алгебраїчні співвідношення:

, ,

. (10)

Члени генерації компонент турбулентних напружень, що входять у рівняння (10), визначаються наступними виразами

,

,

. (11)

В рівняння (9), (11) входять доданки , ,  та , що описують генерацію турбулентності в придонній області. При цьому розподілення швидкості по вертикалі в цій області доцільно визначати за логарифмічним законом стінки, отже величини  і  було представлено як:

, , (12)

де – параметр, що залежить від шорсткості поверхні,

 – кут між подовжньою складовою швидкості і результуючою швидкістю,

 – величина, що призначається в межах логарифмічного шару.

Для турбулентних скалярних потоків було отримано такі алгебраїчні співвідношення:

,

, (13)

де  – турбулентне число Прандтля-Шмідта.

Для забезпечення адекватного опису анізотропного стану турбулентного потоку величина  в середині турбулентного потоку визначається залежно від співвідношення генерації кінетичної енергії турбулентності до швидкості її дисипації:

. (14)

Запропонована двовимірна модель є замкненою з точністю до емпіричних сталих і дозволяє досліджувати процес переносу забруднюючих речовин в основній зоні змішування у водотоках при заданих початкових і граничних умовах.

У **третьому розділі** представлена чисельна реалізація запропонованих двовимірних моделей переносу забруднюючих речовин.

Побудова дискретних аналогів представленої системи рівнянь при врахуванні особливостей морфології природних водотоків у первісній декартовій системі координат є досить складною задачею. Для перетворення фізичної області з рухомими границями в область постійної ширини (рис. 1) використовувалася заміна існуючої системи координат "новою" системою , що значно спрощує вибір розміру кроку розрахункової сітки , :

, , , , (15)

Рис. 1. Схема перетворення фізичної області в розрахункову

, , , (16)

де  – матричні коефіцієнти перетворення.

Внаслідок процесу перетворення координат, у вихідних рівняннях (2 – 5), (7), (8), (9), (11), (13) з'являються нові доданки зі змішаними похідними, що призводить до деякого ускладнення системи рівнянь. Проте такий підхід істотно спрощує чисельну реалізацію моделі, тому що дозволяє одержати рівномірну сітку в обчислювальній області при нерівномірному розташуванні вузлів сітки у фізичному просторі.

Для чисельної реалізації моделі переносу забруднюючих речовин і  моделі турбулентності використовувалася схема Мак-Кормака. Такий вибір визначається достатньою апробованістю даної схеми і її гнучкістю для побудови різних модифікацій. Схема має ряд властивостей, а саме: є явною консервативною схемою; двокроковою, типу предиктор-коректор, триточковою дворівневою, схемою другого порядку точності за часом і простором.

Використання методу розщеплення істотно спрощує розрахункові процедури і зменшує можливість втрати точності через накопичення великих розрахункових похибок. Тому модифікація вихідного варіанту схеми Мак-Кормака здійснювалася за допомогою розщеплення складних диференційних операторів на послідовність одновимірних, при цьому враховуються особливості апроксимації змішаних похідних.

Розв’язання в момент часу  для розрахункової точки  після модифікації за рахунок розщеплення за часом і по просторовими координатами визначалася застосуванням модифікованої кінцево-різницевої схеми Мак-Кормака в безрозмірних координатах у вигляді:

, (17)

, (18)

де  і  відповідні одновимірні кінцево-різницеві оператори,

 – інтервали дискретизації за часом, при цьому враховується, що кожний одномірний кінцево-різницевий оператор здійснюється за повний часовий крок.

Внаслідок того, що умови стійкості, записані для одномірного оператора, накладають менше обмежень, ніж умови стійкості для двовимірної схеми, використана модифікація схеми Мак-Кормака дозволяє застосовувати для даної задачі спрощену умову Куранта-Фрідріха-Леві. При цьому максимально можливий крок за часом складає:

. (19)

Чисельна реалізація рівнянь (10), (11), (13) виконувалася методом послідовної верхньої релаксації на основі методу Гаусса-Зейделя. Метод є найбільш ефективним для даного випадку, тому що він відрізняється високою збіжністю при відносно невеликому обсязі пам'яті обчислювальної машини, необхідної для проведення розрахунків.

Корекція невідомих у кожній точці на кожній ітерації проводилася за наступною залежністю:

, (20)

де , ,  – відповідно останнє значення, значення на попередній ітерації, нове значення невідомої , обчисленої за методом Гаусса-Зейделя;

 – номер ітерації;

 – параметр релаксації.

Як критерій збіжності для цього ітераційного методу використовувалася така умова:

, (21)

де  чи ,

 – необхідна точність розрахунку.

У процесі розробки методів чисельної реалізації двовимірної моделі особлива увага приділялася вибору і обґрунтуванню крайових умов, що впливають не тільки на стійкість розрахунків, але і на точність розв’язання. Було сформульовано початкові умови для нестаціонарної задачі, а також граничні умови для всіх можливих границь розрахункової області (рис. 2).

Рис. 2. Границі розрахункової області

Запропонована методика чисельної реалізації представлених у дисертації моделей дозволила створити алгоритм для визначення процесу поширення забруднюючих речовин в основній зоні змішування у водотоках.

У **четвертому розділі** наведено результати експериментальних досліджень, порівняно результати розрахункових, експериментальних і тестових даних, а також зазначено можливі області практичного застосування розробленої моделі переносу забруднюючих речовин у водотоках.

На сьогоднішній день внаслідок розвитку обчислювальної техніки задача створення ефективних методів математичного моделювання для вирішення задач гідромеханіки, що становлять практичний інтерес, є досить актуальною. Математичне моделювання дозволяє розглядати як ідеальні, так і реальні умови проходження фізичного процесу, при цьому можливо одержати докладну інформацію про всі досліджувані характеристики фізичної області. Однак для реалізації математичних моделей необхідно налагодити програмне забезпечення за допомогою зіставлення результатів розрахунків за створеними моделями з відповідними експериментальними та тестовими даними.

Для апробації математичної моделі переносу забруднюючих речовин у основній зоні змішування у водотоках та методу її чисельної реалізації, перевірки адекватності даних, що отримані в результаті розрахунків, використовувалися тестові дані А.В. Караушева, а також відповідні експериментальні дослідження.

Для вивчення і зіставлення гідродинамічних характеристик були проведені експериментальні дослідження в лабораторії Українського  державного університету водного господарства та природокористування (РДТУ).

Для виконання досліджень була побудована експериментальна установка таким чином, щоб вона забезпечувала параметри дослідів, які дозволяють використовувати експериментальні дані при розрахунках натурних споруджень. При її створенні виконувалися наступні вимоги: виконання критерію гравітаційної подоби, що передбачає рівність числа Фруда для моделі і для натури, геометрична подібність модельного спорудження річковому потоку без спотворення масштабу; дотримання числа Рейнольдса моделі в межах, що забезпечують автомодельність явища. Основні величини, що характеризують кінематичну структуру потоку, вивчалися як прямими, так і непрямими вимірами, тобто обчислювалися за результатами прямих вимірів інших параметрів.

Зіставлено і проаналізовано результати розрахунків з відповідними даними фізичного моделювання. При цьому було обрано найбільш прийнятний спосіб обробки чисельних результатів - порівняння розрахункових значень поля швидкостей і концентрацій з відповідними експериментальними і тестовими даними. Аналіз показує достатню збіжність розрахункових і експериментальних значень. Максимальна відносна похибка результатів розрахунку не перевищує 23%, що свідчить про адекватність запропонованої моделі та методу її реалізації.

Запропоновану модель і метод розрахунку переносу забруднюючих речовин у водотоках було використано при розробці технічних проектів об’єктів дорожньо-транспортного комплексу України.

Для середніх і великих мостових переходів загальний середньорічний об’єм дощової води, що збігає з водозабірного басейну, має значні обсяги, так як загальна площа водозабору складається з площ дорожнього покриття, проїзної частини мосту, розділяючої смуги, площ обочини, укосу, суміжної з укосом території. В той же час, як показують дослідження, дощові води, що збираються з території шляхів сполучення, містять зважені речовини, нафтопродукти, а також хлориди, сульфати, сполучення металів, кількість яких перевищує гранично допустимі концентрації.

Результати розрахунків по розробленому в роботі методу дали можливість проектним організаціям отримати поля розподілу швидкостей та концентрацій забруднюючих речовин у відкритих потоках, що дозволило провести оцінку проектів, більш обґрунтовано підійти до вибору оптимального варіанту інженерних рішень проектів з точки зору впливу об’єктів на екологічний стан річок.

**висновки**

У дисертаційній роботі приведене нове вирішення наукової задачі, що полягає в розробці математичної моделі, яка описує процес переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках, і методу її реалізації, що дозволяє більш точно описувати реальні фізичні процеси й одержувати достовірні розрахункові дані. Запропонований метод дає можливість визначати закономірності переносу забруднюючих речовин у водотоках і здійснювати екологічну оцінку проектів об'єктів дорожньо-будівельного комплексу.

За результатами виконаної дисертаційної роботи можна сформулювати наступні висновки.

1. Екологічна обстановка, що склалася в Україні за останні десятиліття, обумовлює необхідність підвищення ефективності заходів щодо охорони навколишнього середовища. Для розробки природоохоронних заходів водних джерел необхідно знання закономірностей поширення забруднюючих речовин у водотоках. У той же час існуючі математичні моделі або носять емпіричний характер, або не враховують ряд істотних для річкового потоку факторів, що не дозволяє коректно описувати реальні процеси переносу забруднюючих речовин у водотоках. Тому розробка математичної моделі, що описує процес переносу забруднюючих речовин у водотоках з урахуванням анізотропних властивостей відкритого потоку, і методу розрахунку є актуальною науковою задачею, що має важливе практичне значення.

2. Розроблено двовимірну модель процесу переносу забруднюючих речовин у рівнинних ріках ( від 10000 до 770000, , ), особливістю якої є врахування анізотропного стану відкритого потоку, що обумовлений складною морфологією річок, нерівномірністю розподілу по вертикалі осереднених швидкостей і концентрацій, характером опору на дні при русі потоку, явищами відриву.

3. Вперше запропоновано при вирішення двовимірної задачі використовувати разом для визначення напружень Рейнольдса і турбулентних скалярних потоків отримані в роботі алгебраїчні співвідношення для турбулентних напружень і потоків речовин та двопараметричну дисипативну  модель турбулентності, що дозволило реалістично описати турбулентні процеси.

4. Запропоновано метод розрахунку математичних моделей, який дозволяє адекватно враховувати складну геометрію водотоків, на основі модифікованого кінцево-різницевого методу типу предиктор-коректор по явній схемі Мак-Кормака, методу послідовної верхньої релаксації. Для одержання однозначного рішення конкретної задачі сформульовані крайові умови для всіх можливих границь розрахункової області.

5. Для перевірки адекватності запропонованого методу розрахунку переносу забруднюючих речовин у водотоках було проведене зіставлення розрахункових даних з експериментальними і тестовими даними (дослідження проводилися при 0.001…0.016, 16285…65399). Проведений аналіз показує достатньо задовільну збіжність отриманих розрахункових даних і результатів експериментальних досліджень, максимальна відносна похибка не перевищує 23%, що свідчить про адекватність запропонованих моделей.

6. Розроблена модель переносу забруднюючих речовин і метод її реалізації використовувалися інститутом "Укрдіпродор" при проектуванні мостового переходу через р. Західний Буг, с. Ягодин, а також науково-виробничою фірмою "Мостобудсервіс" при розробці проекту капітального ремонту мостового переходу через р. Дністер, м. Хотин. Запропонований в роботі метод визначення процесу переносу забруднюючих речовин в основній зоні змішування в природних водотоках рекомендується використовувати при екологічному обґрунтуванні й оцінці проектів будівництва і реконструкції об'єктів дорожньо-будівельного комплексу.

**Основні положення дисертації опубліковані в роботах**

1. Савенко В.Я., Савина М.Ю. Математическая модель переноса загрязняющих субстанций в плановой задаче // Технологии в машиностроении / Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”. – 2001. – Вып.129. – Часть 1. – С. 317-322.

2. Савенко В.Я., Савіна М.Ю. Чисельна реалізація двовимірної моделі переносу забруднюючих субстанцій у відкритих водотоках // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвід. наук-техн. зб. – 2001. – Вип. 61. – С. 180-185.

3.Славінська О.С., Савіна М.Ю. Математичне моделювання переносу забруднень у двовимірних відкритих потоках з урахуванням анізотропії турбулентної дифузії // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2001. – Вип. 62. – С. 247-252.

4. Савина М.Ю. Учет экологических факторов при проектировании мостовых переходов // Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення / Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвід. наук.-техн. зб. – 2002. – Вип. 64. – С. 212-214.

5. Щодро О.Є., Савіна М.Ю. Експериментальні і теоретичні дослідження структури забрудненого водного потоку за вихоровим водовипуском // Водне господарство України. – 2002. – №3-4. – С. 23-25.

6. Щодро А.Е., Савина М.Ю.Калибровка математических моделей распостранения загрязняющих веществ и деформаций дна за вихревым водовыпуском // Вісник Українського державного університету водного господарства та природокористування: Зб. наук. праць. –2002. – Вип. 4 (17). – С. 145-152.

7. Савина М.Ю. Методика оценки влияния мостовых переходов на качество воды в реках // Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення / Автомобільні дороги і дорожнє будівництво: Міжвід. наук-техн. зб. – 2002. – Вип. 65. – С. 111-116.

У статтях [1, 3] здобувачем запропоновано використовувати при розробці математичної моделі переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках двовимірні рівняння гідродинаміки та турбулентної дифузії, що враховують явища відриву потоку та нерівномірність кінематичної і дифузійної структури течії на вертикалі, в якості замикаючої моделі використовувати разом алгебраїчні співвідношення переносу турбулентних напружень і скалярних потоків та  модель турбулентності, в статті [3] також запропоновано граничні умови поблизу стінки. В роботі [2] здобувачу належить матеріал щодо чисельної реалізації двовимірної моделі переносу забруднюючих речовин на основі методу кінцевих різниць типу предиктор-коректор за явною схемою Мак-Кормака, що модифікована за допомогою методу розщеплення диференціальних рівнянь за просторовими перемінними і часом. У статтях [5, 6] автору належить обробка експериментальних досліджень швидкісного поля у відкритих руслах, тестування запропонованої двовимірної моделі та методу розрахунку на основі даних експериментальних досліджень.

**Анотація**

Савіна М.Ю. Двовимірна модель і метод розрахунку переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.02.05 – механіка рідини, газу та плазми. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2003.

У дисертації розглядаються фізичні явища, що впливають на процес переносу забруднюючих речовин у природних водотоках, запропоновано враховувати анізотропній стан відкритого турбулентного потоку. Розроблено відповідну двовимірну модель переносу забруднюючих речовин. В якості замикаючої модель запропоновано разом використовувати перетворені алгебраїчні співвідношення для турбулентних напружень і потоків речовин і  модель турбулентності. Розроблено метод реалізації отриманих моделей на основі сучасних методів обчислювальної гідродинаміки. Запропонована методика дозволяє одержати коректні числові значення швидкісного поля і поля концентрацій забруднюючих речовин. Практичне впровадження здійснювалося на реальних об'єктах дорожньо-транспортного комплексу України.

Ключові слова: перенос забруднюючих речовин, відкриті потоки, анізотропній стан, алгебраїчні співвідношення,  модель турбулентності, чисельні методи.

**The summary**

Savina M. Y. Two-dimensional model and a method of calculation of transport of polluting substances in open streams. - Manuscript.

The thesis for the candidate’s degree of technical sciences by specialty 01.02.05 – mechanics of liquid, gas and plasma. – National technical university of Ukraine “Kiev polytechnical institute”, Kiev, 2003.

In the dissertation the physical phenomena which have primary value on process of distribution of polluting substances in natural stream are specified, anisotropy condition of turbulent stream is taken into account. The appropriate two-dimensional model of carry of polluting substances is developed. As turbulent model are used algebraic ratio for turbulent stresses and turbulent substance streams with  model. The method of realization of the received models is developed on the basis of modern methods of numerical hydrodynamics. The methodic allows to receive correct numerical values of a speed field and a field of concentration of polluting substances. Practical introduction was executed in objects of the road-transport complex of Ukraine.

*Key words*: transport of polluting substances, open streams, anisotropy condition, algebraic ratio,  model of turbulence, numerical methods.

**Аннотация**

Савина М.Ю.Двумерная модель и метод расчета переноса загрязняющих веществ в открытых потоках. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости газа и плазмы. – Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт", Киев, 2003.

В диссертации рассматриваются физические явления, которые имеют преимущественное влияние на процесс распространения загрязняющих веществ в естественных водотоках.

Разработана двумерная модель переноса загрязняющих веществ в реках, учитывающая анизотропное состояние открытого турбулентного потока, обусловленное особенностями морфологии естественных потоков, неравномерностью распределения по вертикали осредненных скоростей и концентраций, характером сопротивления на дне при движении потока, явлениями отрыва потока.

В качестве замыкающей модели совместно используются преобразованные для двумерной задачи алгебраические соотношения для турбулентных напряжений и потоков веществ и  модель турбулентности, что позволяет реалистично описать анизотропное состояние открытых турбулентных потоков.

Разработан метод реализации полученных моделей на основе современных методов вычислительной гидродинамики. Для упрощения решения задачи в руслах произвольного очертания предложено перейти к безразмерным координатам в полосе постоянной ширины. Для численной реализации дискретных аналогов нестационарной модели переноса загрязняющих веществ и  модели турбулентности предложено использовать конечно-разностный метод типа предиктор-корректор по явной схеме Мак-Кормака, модифицированной при помощи метода расщепления дифференциальных уравнений по пространственным переменным и времени. Реализация алгебраических соотношений для переноса турбулентных напряжений и скалярных потоков проводится по методу последовательной верхней релаксации на основе метода Гаусса-Зейделя.

Принятые начальные и граничные условия позволяют решить задачу определения концентраций загрязняющих веществ в основной зоне смешения в естественных водотоках, учитывая ее физическую сущность, и носят достаточно универсальный характер.

В диссертации представлена проверка адекватности предложенного метода расчета переноса загрязняющих веществ в основной зоне смешения в водотоках. Было проведено сопоставление расчетных данных с экспериментальными и тестовыми исследованиями. Выполненный анализ показывает достаточно удовлетворительную сходимость полученных расчетных данных с результатами физических экспериментов, что свидетельствует об адекватности предложенной модели.

Предложенная методика позволяет получить корректные числовые значения скоростного поля и поля концентраций загрязняющих веществ, что дает возможность: определить уровень загрязнения водотоков бытовыми и производственными сточными водами; оценить эффективность функционирования существующих очистных сооружений; выполнить оценку качества проектов строительства и реконструкции сооружений дорожно-мостового комплекса.

Практическое внедрение выполнялось на реальных объектах дорожно-транспортного комплекса Украины.

*Ключевые слова*: перенос загрязняющих веществ, открытые потоки, анизотропное состояние, алгебраические соотношения,  модель турбулентности, численные методы.

‘