

Савенко В.Я., д-р техн. наук, Славінська О.С., д-р техн. наук, Л.П. Бондаренко, канд. техн. наук

## ПРОГНОЗУВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ НАСЛІДКІВ ВОДОВІДВЕДЕННЯ З МОСТОВИХ ПЕРЕХОДІВ ТА ПІДХОДІВ ДО НИХ НА ОСНОВІ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Анотація.** В роботі запропоновано метод оцінки впливу споруд дорожньо-транспортного комплексу на екологічний стан поверхневих вод. Метод розроблений на основі числової реалізації тривимірної математичної моделі, що враховує просторову та анізотропну структуру водного потоку в зоні змішування. Наведено приклад числового розрахунку переносу домішок з поверхні реального мостового переходу.

**Ключові слова:** мостовий перехід, водні ресурси, екологічний стан, математичне моделювання, числові методи

**Аннотация.** В работе предложен метод оценки влияния сооружений дорожно-транспортного комплекса на экологическое состояние поверхностных вод. Метод разработан на основе численной реализации трехмерной математической модели, учитывающей пространственную и анизотропную структуру водного потока в зоне смешения. Приведен пример численного расчета переноса примеси с поверхности реального мостового перехода.

**Ключевые слова:** мостовой переход, водные ресурсы, экологическое состояние, математическое моделирование, численные методы

**Annotation.** This paper proposed a method of assessing the impact of road transport facilities complex on the ecological status of surface waters. The method is based on the numerical realization of three-dimensional mathematical model that considers the spatial and anisotropic structure of the water flow in the mixing. An example of numerical calculation of the transfer of impurities from the surface of the real bridge.

**Keywords:** bridge, water resources, ecological conditions, mathematical modeling, numerical methods

**Вступ.** Охорона водного середовища майже не щодня ставить перед інженерами-проектувальниками цілий ряд складних задач, пов'язаних з необхідністю проведення екологічних експертиз проєктованих об'єктів та організації відповідних охоронних заходів.

Зокрема, така проблема є актуальною та злободенною і в дорожньо-транспортній галузі при розробці проєктів будівництва та реконструкції ділянок автомобільних доріг і мостових переходів, які поряд з промисловими об'єктами є досить потужними джерелами забруднення поверхневих водних ресурсів. Ключовим моментом на шляху вирішення даної проблеми є всебічне вивчення механізму переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках та розвиток відповідної теоретичної бази, що дозволить більш точно прогнозувати стан водоймищ і рік, а також дасть можливість підвищити науково-інженерний рівень та обґрунтованість заходів, спрямованих на їх збереження.

**Аналіз публікацій** На сьогоднішній день одним з найбільш ефективних методів дослідження процесів динаміки і переносу забруднюючих речовин у відкритих потоках є їх математичне і числове моделювання. Різноманітні математичні моделі і методи розрахунку переносу домішок у відкритих потоках запропоновано і реалізовано в роботах А.М. Айтсама, Х.А. Вельнера, Л.Л. Пааля, О.Ф. Васильєва, В.І. Квона, Й.Д. Родзіллера, Є.В. Бруяцького, І.А. Шеренкова, А.П. Нетюхайла, М.М. Беляєва, Ю.А. Малевича, В.К. Хруща, С.О. Іваненка, П.П. Корявова, О.М. Мілітеєва, Т.Е. Кулласа, Р.Е. Тамсалу, Б. Лаундера, А. Морса, В. Роді, Д. Сполдінга, А. Растоджі та інших вчених.

Однак, виконаний аналіз літературних джерел показав, що на сьогоднішній день дослідження динаміки і міграції домішок в природних руслах проводиться переважно в рамках різноманітних варіантів одновимірних або двовимірних моделей, здатних описувати ці процеси лише в областях досить віддалених від джерела викиду, залишаючи відкритим питання взаємодії струминного і безнапірного потоків безпосередньо в зоні змішування, де течія має складну просторову й анізотропну структуру. Існуючі ж тривимірні моделі не враховують складний анізотропний характер течії в природних потоках, ґрунтуються на припущенні про ізотропність коефіцієнтів турбулентної в'язкості і дифузії, що з одного боку значно спрощує математичний аналіз рівнянь турбулентного руху і переносу, з іншого – приводить до спотворення реальної картини течії, особливо поблизу джерела викиду

Не достатня вивченість процесу взаємодії струминного і безнапірного потоків в ближній зоні викиду забруднюючих речовин у відкритий потік та відсутність строгої математичної моделі для розрахунку основних характеристик потоку в ній, істотно впливають на правильність розрахунків переносу забруднюючих речовин в цілому і приводять до виникнення ряду труднощів при розв'язуванні конкретних інженерних задач. Зважаючи на ці факти в роботах [1, 2] розроблена методика розрахунку основних характеристик потоку поблизу джерела викиду забруднюючих речовин у відкритий потік, що ґрунтується на числовій реалізації тривимірної нестационарної математичної моделі і дає можливість визначити її геометричні параметри в процесі розрахунку.

**Постановка і розв'язання задачі 3** метою врахування фізичних особливостей переносу домішок у природних водотоках, в роботах [1, 2] була розроблена відповідна тривимірна математична модель, що враховує вплив початкового імпульсу забрудненої струмини, архімедові сили, анізотропний стан турбулентності і т.п.:

$$\frac{\partial \bar{v}_1}{\partial t} + \frac{1}{2} D_1 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + \frac{1}{2} D_2 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + \frac{1}{2} D_3 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{2\rho} \frac{d\bar{p}_x}{dx_1} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}'_1 \bar{v}'_2) + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}'_1 \bar{v}'_3), \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_2}{\partial t} + \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_1} + \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_2} + \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3} + D_4 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + D_5 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + D_6 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}'_2)^2 + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}'_2 \bar{v}'_3), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_3}{\partial t} + \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_1} + \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_2} + \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_3} + D_7 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} + D_8 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} + D_9 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_3} - \beta g \Delta \bar{C} + \frac{\partial}{\partial x_2} (-\bar{v}'_2 \bar{v}'_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} (-\bar{v}'_3)^2. \quad (3)$$

$$D_i = \left[ \bar{v}_{130\text{овн}} \frac{\bar{v}_i}{v_1} - \frac{\bar{v}'_i \bar{v}'_i}{v_1} \right], i = \overline{1,3}, D_j = \left[ \frac{\bar{v}_j \bar{v}_{230\text{овн}}}{v_1} - \frac{\bar{v}_2 \bar{v}_j}{v_1} - \frac{\bar{v}'_2 \bar{v}'_j}{v_1} \right], j = \overline{4,6}, D_k = \left[ \frac{\bar{v}_k \bar{v}_{330\text{овн}}}{v_1} - \frac{\bar{v}_2 \bar{v}_k}{v_1} - \frac{\bar{v}'_2 \bar{v}'_k}{v_1} \right], k = \overline{7,9}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \bar{v} \text{grad}(\bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x_i} (-\bar{v}'_i \bar{C}). \quad (5)$$

де  $\bar{v}_i, \bar{v}'_i$  – осереднені та пульсаційні складові швидкості;  $\bar{C}$  – осереднене значення концентрації забруднюючої речовини.

Модельна система рівнянь (1)-(5) є параболізованою. Еліптичний характер течії у повздовжньому напрямку врахований за допомогою апроксимації тиску по Госману і Сполдінгу, згідно якої статичний тиск в струмені представляється у вигляді суми двох складових  $p_x$  і  $p$ , причому складова тиску  $p_x$  визначається лише з рівняння руху в повздовжньому напрямку, а складова тиску  $p$  змінюється в поперечному перерізі струмини [3].

Складова тиску  $p$  змінюється в поперечному перерізі і описується рівнянням Пуассона еліптичного типу в кожному поперечному перерізі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \bar{p}}{\partial x_3^2} = \rho \left[ -\frac{\partial}{\partial x_2} \left( \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_2}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( D_4 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( D_5 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_2} \left( D_6 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} (-\bar{v}'_2)^2 + \frac{\partial^2}{\partial x_2 \partial x_3} (-\bar{v}'_2 \bar{v}'_3) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial t} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \bar{v}_1 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_1} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \bar{v}_2 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( \bar{v}_3 \frac{\partial \bar{v}_3}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( D_7 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_1} \right) - \right. \\ \left. - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( D_8 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_2} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} \left( D_9 \frac{\partial \bar{v}_1}{\partial x_3} \right) - \frac{\partial}{\partial x_3} (\beta g \Delta \bar{C}) + \frac{\partial}{\partial x_3 \partial x_2} (-\bar{v}'_2 \bar{v}'_3) + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} (-\bar{v}'_3)^2 \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Замикання математичної моделі (1)-(6) здійснено на основі спільного використання модифікованої  $k$ - $\varepsilon$ - моделі турбулентності [2]:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P - \varepsilon, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{v}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = c_\varepsilon \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + \left( c_{1\varepsilon} \frac{P}{\varepsilon} - c_{2\varepsilon} \right) \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (8)$$

і алгебраїчних співвідношень для турбулентних напружень і турбулентних потоків маси [2]:

$$\bar{v}'_i \bar{v}'_j = \frac{2}{3} \delta_{ij} k \frac{c_1 - 1}{c_1 - 1 + P/\varepsilon} + \frac{1 - c_2}{c_1 - 1 + P/\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \left( P_{ij} + \frac{c_2}{1 - c_2} \frac{2}{3} \delta_{ij} P \right) \quad (9)$$

$$\bar{v}'_i \bar{C}' = \frac{1}{c_{1c} - 1 + P/\varepsilon} \frac{k}{\varepsilon} \left[ (1 - c_{2c}) P_{ic} - \bar{v}'_i \bar{v}'_j \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right], \quad \bar{C}'^2 = -\frac{2}{c_c} \frac{k}{\varepsilon} \bar{v}'_i \bar{C}' \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i}, \quad (10)$$

$$P_{ij} = -\overline{v'_i v'_k} \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_k} - \overline{v'_j v'_k} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_k} + \beta (g_j \overline{v'_i C'} + g_i \overline{v'_j C'}), \quad (11)$$

$$P = -\overline{v'_i v'_j} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \beta g_i \overline{v'_i C'}, \quad P_{ic} = -\overline{v'_i C'} \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_k} - \overline{v'_i v'_k} \frac{\partial \overline{C}}{\partial x_k} + \beta g_i \overline{C'^2}. \quad (12)$$

Використовуючи такий підхід, коефіцієнти турбулентної в'язкості і турбулентної дифузії вважаються анізотропними величинами і визначаються із співвідношень:

$$v_{ij}^t = -\frac{\overline{v'_i v'_j}}{\left( \frac{\partial \overline{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{v}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} k}, \quad D_i^t = \frac{-\overline{v'_i C'}}{\partial \overline{C} / \partial x_i}. \quad (13)$$

Для розв'язання математичної моделі (1)-(13) був розроблений числовий метод на основі модифікованого Simple-подібного методу, методу Мак-Кормака і методу послідовної верхньої релаксації [4]. Метод доведений до обчислювальних програм для ЕОМ, тестованих на експериментальному і аналітичному матеріалі і призначених для розрахунку гідродинамічних полів, полів концентрацій домішок і турбулентних характеристик потоку в зоні змішування стічних вод з основним річковим потоком [4].

**Числова реалізація** Для інженерної практики запропонована математична модель з прийнятими початковими і граничними умовами була реалізована у вигляді програмного комплексу „RIVER”, який дає можливість:

- замінити тривалі та економічно невідповідні натурні і експериментальні дослідження процесів переносу домішок у відкритих потоках дешевим і ефективним комп'ютерним моделюванням;
- з мінімальними затратами і в короткий термін отримувати коректні числові значення гідродинамічних полів і полів концентрацій домішок в річках і водоймах;
- вибирати найбільш оптимальні варіанти водоохоронних заходів;
- обґрунтовувати місце розташування у відкритому потоці випускних споруд;
- прогнозувати наслідки різних аварійних ситуацій, пов'язаних з викидами домішок у відкриті потоки;
- проводити екологічні експертизи об'єктів дорожньо-транспортного комплексу як на стадії проектування, так і в процесі їх експлуатації.

Програмний комплекс складається з окремих модулів, що включають в себе шість функціонально незалежних, але повністю узгоджених між собою програмних одиниць (рис.1).

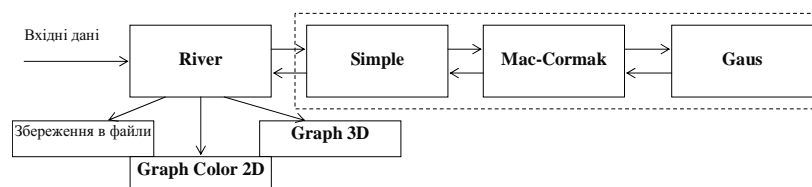


Рисунок 1 - Схема функціонування програмного забезпечення

**Модуль River** являє собою головний модуль обчислювального комплексу, який завантажує вхідні дані, будує просторову розрахункову сітку та проводить інтерполявання значень відповідних характеристик в розрахункових вузлах сітки. Далі модуль River активізує модуль розрахунку та формує результуючі файли даних. Модуль має інтуїтивний та зручний інтерфейс користувача, за допомогою якого проводиться введення вхідних даних, покроковий розрахунок значень відповідних характеристик потоку та перегляд проміжних результатів. Від користувача вимагається задавання наступних вхідних даних:

- а) гідрологічні і гідродинамічні особливості відкритого потоку, в який відбувається викид стічних вод (морфологічні характеристики і коефіцієнти шорсткості русла; витрата води у відкритому потоці; фонові концентрації домішок);
- б) конструктивні і технологічні особливості випуску стічних вод (місце розташування випускної споруди; форма і розміри випускних отворів; витрата води в початковому перерізі; концентрація домішок в стічних водах);
- в) розрахункові кроки  $\Delta x_1, \Delta x_2, \Delta x_3, \Delta t$ ;
- г) константи  $k - \varepsilon$  – моделі турбулентності та алгебраїчних співвідношень для турбулентних напружень

і турбулентних потоків маси.

В результаті роботи даного програмного забезпечення отримуються відповідні чисельні файли і графіки, що описують шукані величини в заданий момент часу в кожній точці розрахункової сітки.

Апробацію запропонованої математичної моделі, розрахункових алгоритмів та програмного комплексу „RIVER” здійснено шляхом співставлення результатів чисельних експериментів з натурними та експериментальними даними інших авторів, а також шляхом розв’язання тестових задач. Результати співставлення показали досить високу збіжність результатів, отриманих на основі комплексу „RIVER” з існуючими аналогами (відносна похибка не перевищила 18%).

**Результати числових розрахунків** В якості прикладу нижче наведено практичні аспекти застосування розробленої математичної моделі та програмного комплексу для прогнозування забруднення р. Канелка поверхневими стоками мостового переходу на автомобільній дорозі Київ-Одеса поблизу с. Соколівка.

Зворотні води, що формуються на території мостового переходу та підходів до нього, відносяться до категорії стічних та формують один випуск в р. Канелка. Згідно результатів досліджень, проведених інститутом „Укрдїпродор” якість води в стічних водах, що потрапляють в р. Канелка змінюється протягом року. Найбільша кількість забруднюючих речовин потрапляє в річку зі стічними водами навесні в період паводку внаслідок накопичення їх вздовж автомобільної дороги протягом зими (шкідливі викиди двигунів внутрішнього згоряння, протиожезедна обробка покриття дороги сульфатами та хлоридами).

Очисні споруди, згідно проекту можуть працювати як в безнапірному режимі та і в напірному (під час весняних або дощових паводків), тому необхідно розрахувати їх на максимальні пропуски стічних вод, тобто для режиму водності 1% забезпечення. Максимальний рівень стічних вод, що потрапляють в р. Канелка може становити  $121,2 \text{ м}^3$  (з урахуванням різних типів покриття).

В якості розрахункової витрати води в річці Канелка прийнято  $Q_{1\%} = 242,3 \text{ м}^3/\text{с}$ , відповідно до якої побудовано гідрограф весняного паводку 1% забезпечення (рис.2.).

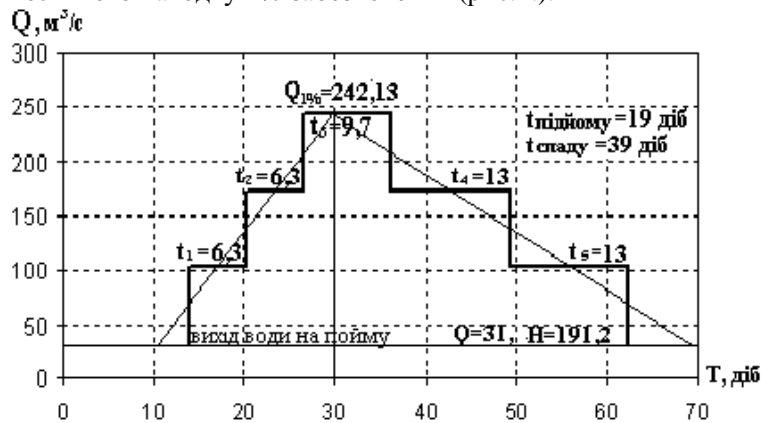
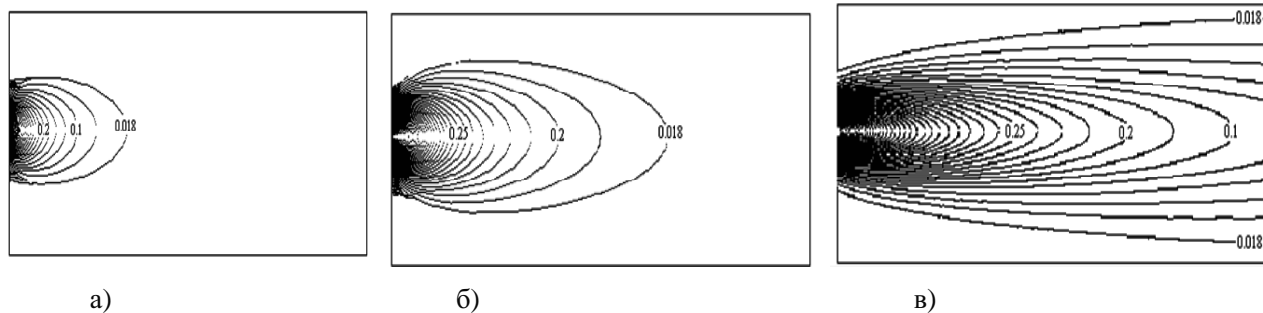


Рисунок 2 - Гідрограф паводку 1% забезпечення в р. Канелка

Розрахунок фонових концентрацій забруднюючих речовин в р. Канелка проводився шляхом співвіднесення отриманих концентрацій по кожному інгредієнту з витратами води у річці в цей період, для чого будувались графіки регресії  $C = f(Q)$ . З графіків визначалась не скоригована фонові концентрація забруднюючих речовин по витратах води у річці 1% забезпечення.

На рис. 3 представлено результати числових полів концентрацій свинцю, що попадають в р. Канелка зі зворотними стічними водами поблизу джерела викиду. Як показав аналіз результатів розрахунку, довжина струминної зони викиду змінюється в часі і досягає свого максимального значення через 6-7 хвилин після викиду, після чого струминна течія встановлюється і носить стаціонарний характер.



а)

б)

в)

Рисунок 3 - Розподіл концентрацій свинцю в зоні випуску в р. Карелка:  
а)  $t=5$  с; б)  $t=30$  с; в)  $t=60$  с.

Аналіз натурних даних інституту «Укрдїпродор» та результатів числових експериментів на основі розробленого програмного комплексу, дозволив зробити висновок про залежність довжини ближньої зони викиду від параметра спутності  $m = \bar{v}_{1,зовн} / \bar{v}_{1,0}$  і початкового густинного числа Фруда  $Fr_0 = \bar{v}_{1,0} / \sqrt{g((\rho_{зовн} - \rho_0) / \rho_0) d_0}$ . Графік даної залежності наведено на рис.4, де точки відповідають натурним даним інституту „Укрдїпродор”, суцільні лінії одержані в результаті числового експерименту (натурні і числові експерименти проводились в діапазоні  $Fr_0 = 1 \div 200$ ,  $m < 1$ , як найбільш типового для струминних викидів стічних вод у відкриті потоки). Як видно з рис.4 безрозмірна довжина ближньої зони викиду  $L_{бл}^* = L_{бл} / d_0$  при  $m < 1$  лінійно залежить від параметра спутності  $m$  і збільшується зі збільшенням числа Фруда  $Fr_0$ .

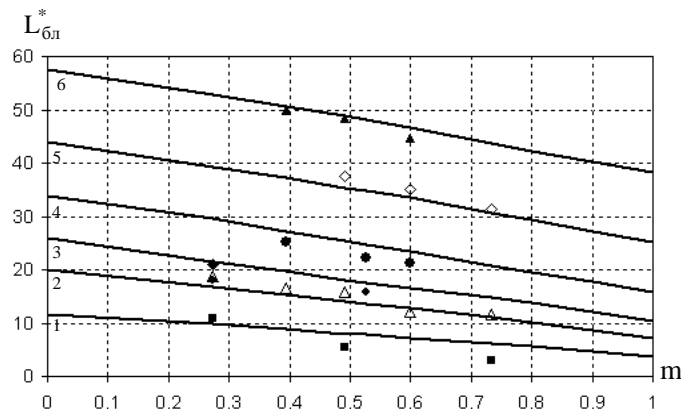


Рисунок 4 - Залежність безрозмірної довжини ближньої зони викиду від параметра спутності і початкового густинного числа Фруда:

$$1 - Fr_0 = 1; 2 - Fr_0 = 54; 3 - Fr_0 = 65; 4 - Fr_0 = 92; 5 - Fr_0 = 121; 6 - Fr_0 = 200$$

**Висновки:** Запропонована в роботі математична модель та програмний комплекс для ЕОМ дають можливість виконувати оцінку впливу об'єктів будівництва і реконструкції споруд дорожньо-транспортного комплексу на екологічний стан водних ресурсів, а також дозволяють прогнозувати наслідки різних аварійних ситуацій, пов'язаних з викидами домішок у природні водні потоки.

### Література

1. Савенко В.Я., Славінська О.С., Бондаренко Л.П. Гідродинамічний опис розповсюдження забруднюючих речовин у ближній зоні від джерела викиду в безнапірному потоці // Вісник НТУУ «КПІ» – 2002.–Вип. 42, т.1. – С. 122–127.
2. Славінська О.С., Бондаренко Л.П. Математична модель переносу забруднюючих речовин поблизу джерела викиду у відкритих потоках з урахуванням анізотропії турбулентності // Вісник НТУУ „КПІ” .– 2002. – Вип.43. – С.181 – 183.
3. Gosman A.D., Spalding D.B. The Prediction of Confined Three-dimensional Boundary Layers // Safford Symposium on Internal Flows, London. – 1971. – P. 19.
4. Бондаренко Л.П. Розрахункові алгоритми динамічних і тепломасопереносних процесів в ближній зоні викиду забруднюючих речовин у відкритий потік // Вісник Сумського державного університету. Серія технічні науки. – 2003. – №12(58). – С.113-119.