

**ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ
ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН В АКВАТОРІЇ ЛИМАННОГО КАНАЛУ****SIMULATION MODELING OF THE DYNAMICS OF POLLUTANT SPREADING
IN THE SEA OF ESTUARY CHANNEL**

С. С. Рижков, д-р техн. наук, проф.;
S. S. Ryzhkov, Doctor of Technical Sciences, Prof.;

І. В. Тимченко, канд. техн. наук;
I. V. Tymchenko, Candidate of Technical Sciences;

О. Л. Гіржева, канд. с.-г. наук
O. L. Girzheva, PhD of Agricultural Sciences

*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв
National University of Shipbuilding, Mykolayiv*

Анотація. Подані результати дослідження динаміки розповсюдження забруднюючих речовин в акваторії лиманного каналу на основі розроблених імітаційних моделей нестационарного процесу конвективної дифузії неконсервативних речовин. Наведені результати моделювання розповсюдження забруднення на ділянках акваторії суднохідного Дніпро-Бузького лиманного каналу, яке здійснювалося з урахуванням гідрологічних та гідрохімічних характеристик даних ділянок.

Ключові слова: екологічна безпека, імітаційна модель, забруднюючі речовини, дифузія, акваторія.

Abstract. The article presents the research results of spreading dynamics of the pollutants in the water areas of estuary channel, based on developed simulation models of convective diffusion nonstationary process of nonconservative substances. The current article contains the results of simulation of pollution spreading in the water areas of the shipping Dnieper-Bug estuary channel, that was carried out considering the hydrological and hydro-chemical characteristics of these areas.

Keywords: environmental safety, simulation model, pollutants, diffusion, water area.

Аннотация. Поданы результаты исследования динамики распространения загрязняющих веществ в акватории лиманного канала на основе разработанных имитационных моделей нестационарного процесса конвективной диффузии неконсервативных веществ. Представлены результаты моделирования распространения загрязнения на участках акватории судоходного Днепро-Бугского лиманного канала, которое осуществлялось с учетом гидрологических и гидрохимических характеристик данных участков.

Ключевые слова: экологическая безопасность, имитационная модель, загрязняющие вещества, диффузия, акватория.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

На сьогодні Дніпро-Бузький суднохідний лиманний канал (ДБЛК) характеризується інтенсивним судноплавством, розташуванням великих суднобудівних заводів, морських терміналів та інших підприємств, які є джерелами постійних й аварійних забруднень його акваторії небезпечними речовинами. Разом з тим лиман має статус рибогосподарського водойма вищої категорії, а також охоплює рекреаційні та природоохоронні об'єкти.

Аналіз стану поверхневих вод Миколаївської області [7] показує значні перевищення гранично-допустимих концентрацій (ГДК) нафтопродуктів у 2012 році до значень 16 ГДК та фенолів до 4 ГДК у лимані, обумовлені постійними скидами неочищених господарсько-побутових стічних вод. Крім того

PROBLEM STATEMENT

Currently the Dnieper-Bug estuary navigable channel (DBENC) is characterized by intense shipping, the location of large shipbuilding yards, marine terminals and other enterprises which are the sources of permanent and emergency pollution of its water area by hazardous substances. However, the estuary has the status of fishery water body of the higher category and includes recreational and environment-oriented facilities.

The analysis of the surface waters state in Mykolayiv region [7] shows significant exceeding of the maximum permissible concentrations (MPC) of oil in 2012 up to the value of 16 MPC and phenols amount of up to 4 MPC in the estuary due to permanent discharges of industrial and domestic wastewater. Also significant oil concentration in the estuary and the high probability of emergency

значні концентрації нафтопродуктів у лимані та висока ймовірність виникнення аварійних розливів пов'язані з підвищенням вантажообігу в 2012 році Миколаївського морського торгового порту.

Додатковий антропогенний вплив на акваторію лиману здійснює пилове забруднення при перевантаженні калійних та азотних добрив, фосфоритів, а також унаслідок розсіювання глиноземного червоного шламу зі шламосховища.

Усе це обумовлює важливість та необхідність розробки й вдосконалення існуючих імітаційних моделей розповсюдження забруднюючих речовин (ЗР) з урахуванням геоморфологічних та гідрологічних особливостей лиманного каналу і характеру антропогенного впливу промислових об'єктів поблизу акваторії лиманного каналу.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Розроблені сучасні математичні моделі розповсюдження забруднень на водній поверхні враховують процеси розбавлення вод і самоочищення [2, 4, 5, 9], а також достатньо адекватно описують розповсюдження поля концентрацій домішок за рахунок течії, турбулентності та біохімічних перетворень. Однак при вирішенні практичних задач виникають наступні складності:

- існуючі аналітичні розв'язки включають у себе емпіричні коефіцієнти, які вносять значну похибку в результати;

- отримані числові розв'язки вихідних диференціальних рівнянь потребують визначення вхідної інформації про початкову концентрацію та градієнт концентрацій домішок, що не завжди є можливим і крім того потребують забезпечення стійкості розв'язків за рахунок підбору відповідних кроків у часі й просторі;

- при моделюванні перенесення ЗР виникає необхідність у побудові імітаційних моделей з урахуванням гідрологічних та геоморфологічних особливостей окремих розглядуваних морських екосистем.

МЕТОЮ РОБОТИ є розробка імітаційних моделей нестационарного процесу конвективної дифузії неконсервативних речовин для окремих ділянок лиманного каналу з урахуванням особливостей гідрологічного режиму та гідроморфологічних характеристик акваторії лиману, а також характеру антропогенного впливу на даних ділянках.

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Розроблено імітаційні моделі динаміки розповсюдження поля концентрацій забруднюючих речовин для визначених [6] ділянок ДБЛК з метою вирішення задачі оцінки рівнів екологічної небезпеки прибережних районів та акваторії ДБЛК і подальшої оптимізації заходів із забезпечення екологічної безпеки.

Характеристика розглядуваних ділянок наведена в табл. 1.

leakage are caused by increase of cargo turnover in 2012 in the Mykolayiv trade seaport.

Additional anthropogenic impact on the estuary water area is made by dust pollution during transshipment of potash and nitrogen fertilizers, phosphates, and also due to scattering of alumina red mud from slime deposits.

All this stipulates the importance and necessity of development and improvement of existing simulation models of the pollutants spread which are based on geomorphological and hydrological characteristics of the estuary channel and the nature of human impacts of industrial facilities near the estuary water area of the channel.

LATEST RESEARCH AND PUBLICATIONS ANALYSIS

The developed up-to-date mathematical models of pollutants spreading on the water surface consider the dilution water and purification processes [2, 4, 5, 9], as well as adequately describe the concentrations field propagation of impurities due to flow, turbulence and biochemical transformations. However, when solving practical problems the following difficulties arise:

- existing analytical decisions include empirical factors which contribute a significant error in the results;

- derived numerical decisions of the original differential equations require definition of input information on the initial concentration and concentration gradient of impurities, which is not always possible, and in addition require the solutions stability due to choosing the proper steps in time and space;

- when modeling the pollutants transfer there is need in the development of simulation models considering hydrologic and geomorphic characteristics of certain regarded marine ecosystems.

THE ARTICLE AIM is development of simulation models of unsteady convective diffusion process of non-conservative substances for the individual areas of the estuary channel considering the special features of the hydrological regime and hydromorphological characteristics of the estuary water area and the nature of anthropogenic impact on these areas.

BASIC MATERIAL

The simulation models of the distribution dynamics of the concentrations field of pollutants for certain [6] areas of the Dnieper-Bug estuary channel have been developed to address the problem of levels estimation of the environmental hazard of coastal areas and DBENC water area and for further optimization of activities on ensuring environmental safety. The characteristics of considered areas are shown in Table 1. The research of pollutants distribution dynamics in the water area of the estuary channel was carried out at several stages.

Таблиця 1. Характеристика розглядуваних ділянок

Table 1. Characteristics of the areas under consideration

№ з/п	Ділянка / Area	Характерний розмір, м Typical Size, m	Джерела забруднення Sources of Pollution	Речовина / Substance
1	Район чорноморського суднобудівного заводу Area of the Black Sea Shipbuilding Plant	2200	Скид зворотних вод Discharge of reverse waters	Нафтопродукти (ННП) Oil Products (OP)
2	Каботажна гавань Coastwise harbor	847	Скид зворотних вод Discharge of reverse waters	ННП / OP
3	Населені пункти: Мала Корениха, Радсад Settlements: Mala Korenykha, Radsad	2000	Скид стічних вод Discharge of wastewater	Феноли / Phenols
4	Миколаївський морський торговий порт Mykolayiv sea-port	2300	Аварійні, бункерні та змішані розливи нафти, скид стічних вод, скид ляльних вод / Emergency, hopper and mixed oil spills, wastewater discharge, bilge water discharge	ННП, феноли OP, phenols
5	Нафтотермінал морпорту Oil terminal of the sea-port	672	Аварійні, експлуатаційні розливи нафти / Emergency, operational oil spills	ННП / OP
6	Рейд морпорту Roads of the seaport	1200	Аварійні, експлуатаційні розливи нафти / Emergency, operational oil spills	ННП / OP
7	Миколаївський глиноземний завод Mykolayiv alumina plant	1300	Скид зворотних вод Discharge of reverse waters	Феноли, ННП Phenols, OP
8	ПАТ «Миколаївський суднобудівний завод «Океан» PJSC «Mykolayiv Shipbuilding Plant «Ocean»	1300	Змішані розливи нафти, скид зворотних вод Mixed oil spills, the discharge of reverse waters	ННП / OP
9	«Ніка-Тера» / «Nika-Tera»	795	Аварійні, бункерні розливи, скид зворотних вод / Emergency, bunker spills, the discharge of reverse waters	ННП / OP
10	Порт «Октябрськ» «Oktyabrsk» Port	773	Аварійні, бункерні розливи, скид зворотних вод / Emergency, bunker spills, the discharge of reverse waters	ННП / OP
11	Очисні споруди Sewerage treatment facilities	1900	Скид стічних вод (максимальні концентрації) / Discharge of wastewater (maximum concentration)	ННП, феноли, нітрити OP, phenols, nitrites
12	м. Очаків / Ochakiv	3200	Скид зворотних вод Discharge of reverse waters	Феноли, ННП Phenols, OP
13	Чорноморка / Chornomorka	1500	Скид зворотних вод Discharge of reverse waters	Феноли, ННП Phenols, OP

Дослідження динаміки розповсюдження забруднюючих речовин в акваторії лиманного каналу здійснювалося в декілька етапів.

Етап 1. Дослідження чутливості до антропогенного навантаження ділянок акваторії лиманного каналу [6] включаючи:

- аналіз рекреаційної та природоохоронної значимості окремих районів лиману;
- аналіз морфологічних властивостей берегової смуги щодо чутливості до забруднень і гідроморфологічних особливостей лиману;
- визначення джерел забруднення небезпечними речовинами (табл. 1) та аналіз їх синергетичної дії.

Етап 2. Формування математичної моделі конвективної дифузії неконсервативних речовин з урахуванням наступних припущень та доповнень:

Step 1. Investigation of sensitivity to anthropogenic loading of the estuary channel areas [6] including:

- analysis of recreational and environmental significance of individual areas of the estuary;
- analysis of the morphological characteristics of the shoreline concerning sensitivity to pollution and hydro-morphological features of the estuary;
- identification of hazardous substances sources (see Table 1) and analysis of their synergistic effects.

Step 2. Formation of a mathematical model of convective diffusion of non-conservative substances with the following assumptions and additions:

- 1) consideration of the pollution transfer in the surface layer of water along the flow (in x the coordinate);

1) урахування перенесення забруднень у поверхневому шарі води вздовж течії (по координаті x);

2) урахування домінуючого впливу вітрових течій, швидкості течії, що обчислюється за аналітичним рівнянням [5]

$$V = K_{sh} V_v \sqrt{3+10h}, \quad (1)$$

де K_{sh} — коефіцієнт, що залежить від урахування схилу дна русла (табличні дані); V_v — швидкість вітру на висоті 2 м над водою, м/с; h — середня висота хвилі, м;

3) з урахуванням того, що коефіцієнт дифузії дуже складно визначається в натурних умовах, для його розрахунку використовується наступний аналітичний розв'язок [5]:

$$A_x = \frac{gHV}{fK_{sh}}, \quad (2)$$

де g — прискорення вільного падіння, м/с; H — середня глибина лиману, м; f — функція, що залежить від схилу дна (табличні дані);

4) модель включає в себе компоненти, які описують самоочищення водойми для стічних вод в умовах незначного вітрового збурення та випаровування для аварійних розливів нафтопродуктів з урахуванням домінуючого впливу цих процесів;

5) похибка розрахунків (11...12%) в умовах прийнятих припущень є допустимою, враховуючи поставлені задачі розрахунку найбільш небезпечних джерел викиду та вразливих ділянок лиману для подальшого прийняття рішень щодо підвищення екологічної безпеки, оптимального розподілу ресурсів на відповідні заходи.

Етап 3. Корегування отриманої моделі з урахуванням особливостей гідрологічних і гідроморфологічних характеристик ділянок та особливостей антропогенного впливу.

При цьому з урахуванням особливостей промислової діяльності на прибережних ділянках визначено речовини – забруднювачі (ЗР), за якими спостерігається перевищення ГДК [7]: нафтопродукти, феноли та нітрити.

Для моделювання розповсюдження нафтопродуктів у результаті аварійних розливів модель урахує функцію випаровування [8]. Швидкість зміни концентрації внаслідок випаровування береться квазістаціонарною на відповідному проміжку часу та залежить від властивостей окремих фракцій нафти $\frac{\partial C}{\partial t} = \text{const} = \varepsilon$:

$$\varepsilon = \sum_{l=1}^4 \frac{K_{al} P_l M_l m_l}{RT_{\text{сеп}} m}, \quad (3)$$

де C — концентрація нафти в поверхневому шарі води; P_l — парціальний тиск l -ї фракції нафти, Па, при даній температурі середовища над поверхнею плями $T_{\text{сеп}}$, °C; M_l — молярна маса нафти, г/моль; R — універсальна газова стала, Дж/(моль·К); m_l і m — маса відповідно l -ї фракції та нафти в цілому, г;

2) consideration of the dominant influence of wind flows, flow velocity which is calculated through the analytical equation [5]

$$V = K_{sh} V_v \sqrt{3+10h}, \quad (1)$$

where K_{sh} is a coefficient which depends on the slope of the bottom channel (tabular data); V_v is the wind velocity at the height of 2 m above the water, m/s; h is the average wave height, m;

3) as it is very difficult to define the diffusion coefficient under natural conditions, the following analytical solution is used for its calculation [5]:

$$A_x = \frac{gHV}{fK_{sh}}, \quad (2)$$

where g is the gravitational acceleration, m/s; H is the average depth of the estuary, m; f is the function which depends on the slope of the bottom (tabular data);

4) the model includes components which describe the self-purification of the water body for wastewaters in small wind perturbations and evaporation for emergency oil spills including the dominant influence of these processes;

5) the precision of calculations (11...12%) in the adopted assumptions is acceptable taking into account calculation posed objects of the most hazardous sources of emissions and vulnerable sections of the estuary for future decision-making to improve environmental safety, optimal allocation of resources for appropriate actions.

Step 3. Correction of the obtained model considering the features of hydrological and hydromorphological characteristics of the areas and features of the human impact.

Taking into account the features of industrial activity in coastal areas, the pollutants were defined which are characterized by MPC excess [7] of: oil, phenols and nitrites.

For oil distribution modeling as the result of emergency oil outflow the model considers the evaporation function [8]. The speed of concentration change is assigned as quasi-stationary due to evaporation for the proper time period and depends on the properties of separate oil fractions $\frac{\partial C}{\partial t} = \text{const} = \varepsilon$:

$$\varepsilon = \sum_{l=1}^4 \frac{K_{al} P_l M_l m_l}{RT_{\text{env}} m}, \quad (3)$$

where C is the concentration of oil in the surface water layer; P_l is the partial pressure of the l -th oil fraction, Pa, at the temperature of environment above the spot T_{aver} , °C; M_l is the molar mass of oil, g/mol; R is a universal gas constant, J/(mol·K); m_l and m are the masses respectively of the l -th fraction and oil in general, g; $K_{al} = 1,25 \cdot 10^{-3} |V|$ is the mass ratio in the atmosphere, which is calculated depending on the wind velocity and the type of oil, m/s.

$K_{at} = 1,25 \cdot 10^{-3} |V|$ — коефіцієнт масопереносу в атмосфері, що розраховується в залежності від швидкості вітру та типу нафти, м/с.

Для моделювання розповсюдження фенолів та нітритів при слабкому вітрі враховуються процеси самоочищення, де коефіцієнт самоочищення задається як $K = e^{(-K^*t)}$, де K^* — коефіцієнт неконсервативності речовин (табличні дані), t — час проходження забруднюючої речовини між визначеними створами.

Для деяких ділянок з метою отримання інформації про здатність водойми до самоочищення, наприклад ділянки «Каботажна гавань», проведено моделювання розповсюдження поля концентрацій як нестационарного процесу турбулентної дифузії з урахуванням процесу самоочищення та потужності джерела викиду (за умови штилю):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = A_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC(x) + F(x, t), \quad (4)$$

де A_x — коефіцієнт турбулентної дифузії, м²/с; x — координата водойми, на якій розглядається розповсюдження ЗР, м (уздовж течії річки), м; t — час, с; $F(x, t)$ — функція потужності скиду, кг/(м³·с).

На третьому етапі також сформовано початкові й граничні умови моделювання (початкова концентрація, градієнт концентрацій та постійні величини): початкове значення концентрації відповідає максимальному в точці викиду ($x(0), y(0)$) у момент часу $t = 0$ та складає $C[x(0), 0] = C_1$; градієнт інтенсивності зменшення концентрації в початкових координатах $\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x(0)} = -C_{1grad}$; гранична концентрація задається у вигляді умови $C[x(T), T] = C_\phi$ (значення $x(T)$ відповідають граничним координатам розповсюдження поля ЗР у момент T досягнення концентрації ЗР фонові).

Етап 4. Побудова рекурентної форми моделі за різницевою схемою [3], алгоритму та програми розрахунку концентрацій мовою *Perl*. На даному етапі також проведено дослідження стійкості числового розв'язку за визначеним числом Куранта \tilde{C} [1] та визначено співвідношення часового й просторового кроків:

$$\tilde{C} = \frac{2A_x dt}{dx^2} \leq 1,$$

де dt — часовий крок; dx — просторовий крок.

З урахуванням вищезазначеного отримано скореговану рекурентну форму моделі динаміки розповсюдження ЗР, яка в загальному вигляді враховує зміну об'єму забруднення під дією сил течії і вітру, турбулентної дифузії, випаровування (3) та біохімічної трансформації:

$$C_{ij}^{t+1} = C_{ij}^t + (-V(C_{i+1,j}^t - C_{ij}^t)/\Delta x + A_x(C_{i+2,j}^t - 2C_{i+1,j}^t + C_{ij}^t)/\Delta x^2 - \varepsilon C_{ij}^t - KC_{ij}^t)\Delta t, \quad (5)$$

де C — концентрація ЗР у поверхневому шарі води, кг/м³; $\Delta x, \Delta t$ — відповідні кроки по координатах x та

For modeling of phenols and nitrites emission in low wind self-purification processes are taken into account, where the rate of self-purification is given as $K = e^{(-K^*t)}$, where K^* is the coefficient of non-conservative substances (tabular data); t is time of pollutant passing between defined alignments.

For some areas, for example, the area of «Cabotage harbor» the modeling of field concentrations distribution was conducted as non-stationary turbulent diffusion process regarding the self-purification process and power source output (under no-wind conditions) to obtain information on the ability of the water body for self-purification:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = A_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - KC(x) + F(x, t), \quad (4)$$

where A_x is the coefficient of turbulent diffusion, m²/s; x is a coordinate of water body on which spreading of pollutants is considered, m (along the river flow), m; t is time, s; $F(x, t)$ is a function of discharge power, kg/(m³·s).

At the third step the initial and boundary conditions of modeling were also formed (initial concentration, concentration gradient and constant values); the initial value corresponds to the maximum concentration at the point of release ($x(0), y(0)$) in time $t = 0$ and is $C[x(0), 0] = C_1$; intensity gradient of decreasing concentration in the initial coordinates is $\frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=x(0)} = -C_{1grad}$; maximum concentration is given as a condition: $C[x(T), T] = C_\phi$ ($x(T)$ values correspond to the boundary coordinates of pollutants field propagation at the time T of the pollutants background concentration).

Step 4. Building a recurrent form of a model according to the difference scheme [3] of the algorithm and concentrations calculating program for calculating in *Perl*. At this stage the stability of the numerical solution considering the Courant specified number \tilde{C} [1] was studied and correlation of time and spatial steps was defined:

$$\tilde{C} = \frac{2A_x dt}{dx^2} \leq 1,$$

where dt is a time step; dx is a spatial step.

Considering the above-mentioned, the recursive form of the pollutants model of distribution dynamics was developed which in general takes into account the change in the volume of pollution under the action of flow and wind, turbulent diffusion, evaporation (3) and biochemical transformation:

$$C_{ij}^{t+1} = C_{ij}^t + (-V(C_{i+1,j}^t - C_{ij}^t)/\Delta x + A_x(C_{i+2,j}^t - 2C_{i+1,j}^t + C_{ij}^t)/\Delta x^2 - \varepsilon C_{ij}^t - KC_{ij}^t)\Delta t, \quad (5)$$

where C is pollutants concentration in the water surface layer, kg/m³; $\Delta x, \Delta t$ are appropriate steps to coordinate

часу; t, i — параметри решітки різницевої схеми; V — швидкість вітрової течії, м/с (1); A_x — коефіцієнт горизонтальної турбулентної дифузії (2).

Розроблені імітаційні моделі на основі моделей (4) та (5) дозволили створити деякі сценарії розвитку ситуацій.

Сценарій 1а. Аварійні розливи ННП в акваторії НПК у результаті пошкодження трубопроводів при перевантаженні ННП (рис. 1, а).

Сценарій 1б. Розлив дизельного палива при бункеровці суден в акваторії районів № 4, 6, 9, 10 (див. рис. 1, б).

Сценарій 2а. Скиди зворотних вод у районах № 1–3, 7, 8, 11–13 (рис. 2, а).

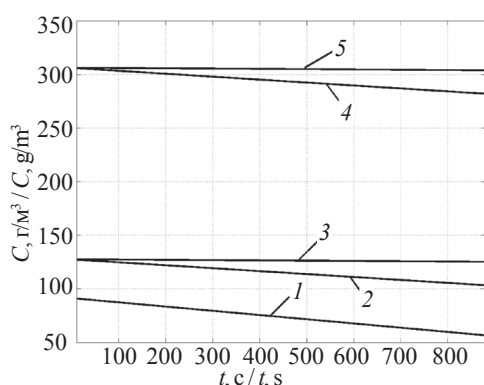
x and time; t, i are lattice parameters of the difference scheme; V is wind flow velocity, m/s (1); A_x is the coefficient of horizontal turbulent diffusion (2).

The developed simulation models based on the models (4) and (5) allow to develop several scripts of situations.

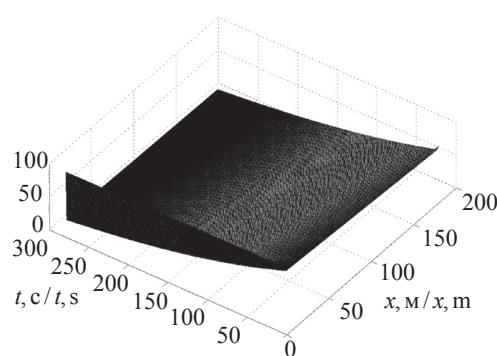
Script 1a. Emergency spills of OP in the water area of the OPC (oil products complex) due to damage of pipelines during OP transshipment (see Fig. 1, a).

Script 1b. Spilling of diesel fuel at bunker age and departure of pilots in areas number 4, 6, 9, 10 (see fig. 1, b).

Script 2a. Wastewater discharges in areas No. 1–3, 7, 8, 11–13 (Fig. 2, a).



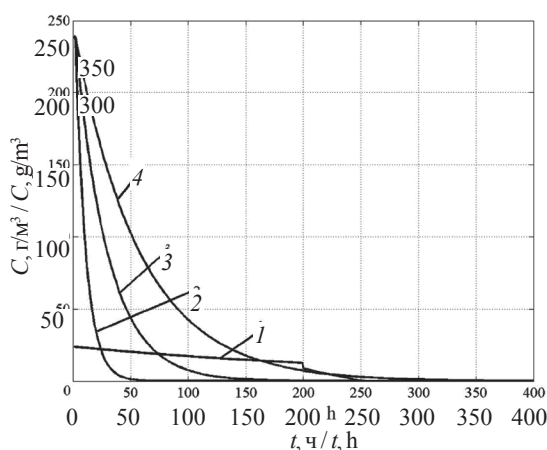
а — а)



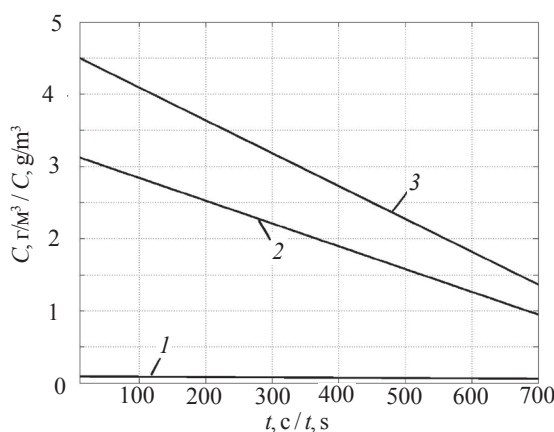
б — б)

Рис. 1. Результати моделювання: а) — зміна концентрації ННП із часом у точці 250 м від джерела згідно зі сценарієм 1а: 1 — при $m = 3$ т, $V = 5$ м/с; 2 — при $m = 3$ т, $V = 1,5$ м/с; 3 — при $m = 3$ т, $V = 0,1$ м/с; 4 — при $m = 10,6$ т, $V = 1,5$ м/с; 5 — при $m = 10,6$ т, $V = 0,1$ м/с; б) — зміна концентрації ННП з часом та координатою x згідно зі сценарієм 1б

Fig. 1. Results of the modeling: а) — change in the concentration of OP with time at the point of 250 m from the source according to the 1a script: 1 — in case $m = 3$ t, $V = 5$ m/s; 2 — in case $m = 3$ t, $V = 1,5$ m/s; 3 — in case $m = 3$ t, $V = 0,1$ m/s; 4 — in case $m = 10,6$ t, $V = 1,5$ m/s; 5 — in case $m = 10,6$ t, $V = 0,1$ m/s; б) — change in the concentration of OP with time and the x coordinate according to the 1b script.



а — а)



б — б)

Рис. 2. Результати моделювання зміни концентрації ННП, фенолів та нітритів із часом: а) — згідно зі сценарієм 2а за час моделювання 7 діб до досягнення концентрацій значень ГДК: 1 — феноли, $V = 0,1$ м/с; 2 — нітрити, $V = 0,1$ м/с; 3 — ННП, $V = 5$ м/с; 4 — ННП, $V = 0,5$ м/с; б) — згідно зі сценарієм 2б: 1 — феноли; 2 — нітрити; 3 — ННП

Fig. 2. Results of the modeling of OP, phenols and nitrites concentration change with time: а) — according to the 2a script during the 7-day modeling to achieve concentrations of MPC values: 1 — phenols, $V = 0,1$ m/s; 2 — nitrites, $V = 0,1$ m/s; 3 — OP, $V = 5$ m/s; 4 — OP, $V = 0,5$ m/s; б) — according to the 2b script: 1 — phenols; 2 — nitrites; 3 — OP.

Сценарій 2б. Скиди зворотних вод у районі № 8 (див. рис. 2, б).

Сценарій 3. Моделювання динаміки зміни концентрації ННП у полі забруднення в районах № 2, 5, 9, 10 (досліджувана забруднена ділянка 300×300 м) за моделлю (4) для наступних умов:

3а: початкова концентрація — 100ГДК, коефіцієнт дифузії — 1,14 м²/с, глибина — 11,2 м, швидкість вітру — 1,5 м/с (рис. 3, а, б);

3б: початкова концентрація — 100ГДК, коефіцієнт дифузії — 0,06 м²/с, глибина — 3 м (поблизу берега), швидкість вітру — 1,5 м/с (див. рис. 3, в);

3в: початкова концентрація — 100ГДК, коефіцієнт дифузії — 3 м²/с, глибина — 11 м, швидкість вітру — 5 м/с, ґрунт — суглинки, середній діаметр мулових частинок — 1 мм див. рис. 3, з).

Вихідні дані для моделювання за різними сценаріями наведені в табл. 2 і 3.

Script 2b. Wastewater discharges in area No. 8 (Fig. 2, b).

Script 3. The dynamics modeling of changes in the OP concentration in the pollution field in areas No. 2, 5, 9, 10 (explored polluted area 300×300 m) according to the model (4) for the following conditions:

3a: the initial concentration is 100MPC, the diffusion coefficient is 1,14 m²/s, the depth is 11,2 m, the wind velocity is 1,5 m/s (Fig. 3, a, b);

3b: the initial concentration is 100MPC, the diffusion coefficient is 0,06 m²/s, the depth is 3 m (near the coast), the wind velocity is 1,5 m/s (see Fig. 3, c);

3c: the initial concentration is 100MPC, the diffusion coefficient is 3 m²/s, the depth is 11 m, the wind velocity is 5 m/s, soil-loam, the average diameter of silt particles is 1 mm (see Fig. 3, d).

Initial data for the modeling are shown in Tables 2 and 3.

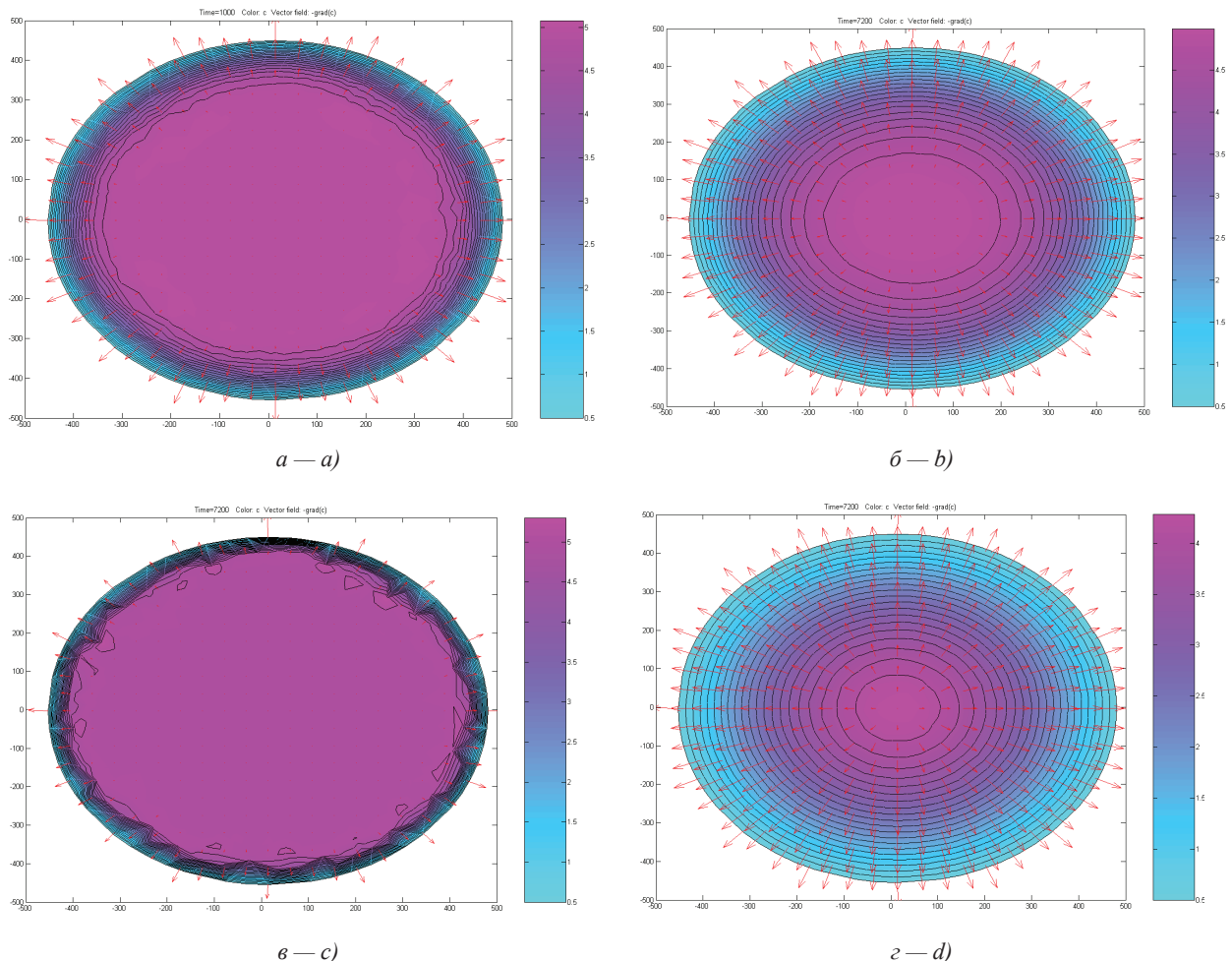


Рис. 3. Діалогові вікна програми моделювання зміни концентрації ННП згідно умов сценарію 3: а) — сценарій 3а (час моделювання 7200 с); б) — сценарій 3а (час моделювання 1000 с); в) — сценарій 3б (час моделювання 7200 с); з) — сценарій 3в (час моделювання 7200 с)

Fig. 3. Dialog boxes of the simulation program of OP concentration change according to the 3 script: а) — the 3a script (simulation time is 7200 s); б) — the 3a script (simulation time is 1000 s); в) — the 3b script (simulation time is 7200 s); з) — the 3c script (simulation time is 7200 s).

Таблиця 2. Вихідні умови імітаційного моделювання

Table 2. Initial conditions of simulation modeling

Сценарії / Scripts	Маса, кг Weight, kg	Густина, кг/м ³ Density, kg/m ³	C ₁ , г/м ³ C ₁₂ , g/m ³	h, м h, m	V _x , м/с V _{x2} , m/s	A _x , м/с ² A _{x2} , m/s ²	V _y , м/с V _y , m/s
Сценарій 1а (речовина – дизельне паливо) Script 1a (the substance is diesel)	3000	900	233	0,30	2,11	1,140	1,5
	3000	900	233	0,15	0,14	0,076	0,1
	10600	900	559	0,30	2,11	1,140	1,5
	10600	900	559	0,15	0,14	0,076	0,1
Сценарій 1б / Script 1b	660	845	150	0,30	4,42	2,380	3,0
Сценарій 2а: / Script 2a							
ННП / OP	–	–	5	0,30	2,11	1,140	1,5
Феноли / Phenols	–	–	0,1	0,30	2,11	1,140	1,5
Нітрити / Nitrites	–	–	8	0,30	2,11	1,140	1,5
Сценарій 2б: / Script 2b							
ННП / OP	–	–	233	0,15	0,55	0,290	0,5
ННП / OP	–	–	233	1,50	12,75	6,870	5,0
Феноли / Phenols	–	–	23	0,15	0,14	0,076	0,1
Нітрити / Nitrites	–	–	233	0,15	0,14	0,076	0,1

Таблиця 3. Характерні погодні умови

Table 3. Typical weather conditions

Сценарії Scripts	Температура, °С Temperature, °С		Видимість, бали Visibility, points	Льодовий покрив Ice Cover	Опади Precipitation	Напрямок вітру Wind Direction
	повітря / air	води / water				
Сценарій 1 Script 1	25	18	2	Немає absent	Немає absent	Північно-східний / SE
Сценарій 2 Script 2	20	16	1	Те ж as above	Те ж as above	Південно-східний / NE
Сценарій 3 Script 3	5	4	1	– –	– –	Те ж / as above

ВИСНОВКИ

Результати імітаційного моделювання (див. рис. 1–3) за запропонованими сценаріями розвитку ситуацій дають змогу оцінити очікувані площі забруднення для кожної ділянки лиману, час досягнення ЗР фонові концентрації, концентрації ЗР у будь-який момент часу та будь-якій координаті й, тим самим, визначити очікувані рівні екологічного ризику промислової діяльності на даній ділянці. У результаті моделювання визначено:

найбільш небезпечним джерелом забруднення водного середовища, враховуючи ймовірності виникнення розглядуваних ситуацій, є аварійні експлуатаційні та бункерні розливи ННП у районі нафтотерміналу й морського порту через особливості динаміки розповсюдження ННП у порівнянні з набагато інтенсивнішим перемішуванням фенолів та нітритів при однакових швидкостях течії (див. рис. 1);

рівні екологічної небезпеки ділянок «Порт», «Нафтотермінал» та «Рейд порту» (за результатами імітаційного моделювання) є найбільш високими внаслідок знаходження додаткового джерела забруднення неочищеними й недоочищеними стічними водами, особливостей обмеженої акваторії та переважних швидкостей

CONCLUSION

The results of the simulation modeling (see Fig. 1–3) give the opportunity to estimate the expected pollution areas for each estuary area, the time of pollutants background concentration achievement, the concentration of pollutants at any time and to any location according to the proposed scripts of situations development and, thus, to determine the expected levels of environmental risk of industrial activity in this area. As the result of modeling the following issues have been defined:

including the occurrence of situations which are considered, the most hazardous source of water pollution is emergency, maintenance and bunker spills of OP, in the area of the oil terminal and the seaport because of the special features of the OP distribution compared to more intense mixing of phenols and nitrites at the same flow velocity (see Fig. 1);

the levels of environmental hazard of areas «Port», «Oil Terminal» and «Roads of Port» (according to the results of the simulation modeling) are the highest due to the discovery of the additional pollution source by untreated sewage and incompletely untreated sewage, features of the limited water area and the preferred wind

вітру 1...5 м/с (тихий, легкий та слабкий вітер), що зменшує інтенсивність зміни концентрації ЗР;

рівні екологічної небезпеки прибережних ділянок (очисні споруди, прибережні ділянки Очакова), незважаючи на менші концентрації ЗР у стічних водах, є досить високими за рахунок значного зменшення інтенсивності перемішування та розбавлення вод унаслідок менших глибин лиману (до 3 м) та значних змін схилу дна на ділянці (див. рис. 3, в);

рівні екологічної небезпеки районів м. Очаків та Чорноморка без урахування динаміки розповсюдження ЗР дорівнюють відповідно 10 і 8 балів, індекс чутливості берегової смуги до ННП складає 8 за десятибальною шкалою (10 – найбільш небезпечний) [6], значні схили дна на таких ділянках зменшують інтенсивність розповсюдження ЗР, але, враховуючи відкриті акваторію, що характеризується переважними помірним хвилюванням та швидкістю вітру, а також суглинисто-піщаним ґрунтом, розбавлення проходить інтенсивно. Вплив діаметра мулових відкладень на турбулентне перемішування (а саме коефіцієнт турбулентного перемішування) демонструє рис. 3, г.

velocity of 1...5 m/s (quiet, light breeze), which reduces the intensity changes of the pollutants concentration;

the levels of the environmental hazard of coastal areas (treatment facilities, coastal areas of Ochakiv) despite the lower pollutants concentration in wastewaters are very high due to the significant decrease of the mixing intensity and dilution water due to lower depths of the estuary (up to 3 m) and significant changes of the bottom slope in the area (see Fig. 3, c);

the levels of the environmental hazard of Ochakiv and Chornomorka areas without taking into account the dynamics distribution of pollutants are respectively equal to 10 and 8 points, the index of the shoreline sensitivity to OP is 8 according to the ten-point scale (10 is the most hazardous) [6], significant bottom slopes decrease pollutants intensity distribution on such areas. The dilution is intensive considering the open water area, which is characterized by moderate prevailing churning of water and wind speed, and loamy-sandy soil. The Fig. 3, d shows the silt diameter effect on turbulent mixing (particularly, the coefficient of turbulent mixing).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

REFERENCES

- [1] **Кириянов, Д. В.** Вычислительная физика [Текст] / Д. Кириянов, Е. Кириянова. — М. : Полибук Мультимедиа, 2006. — 352 с.
- [2] **Лаврик, В. И.** Основы математического моделирования процессов физико-химического и биологического самоочищения водных экосистем [Текст] / В. И. Лаврик // Гидробиологический журнал. — 1999. — Т. 35, № 3. — С. 15–39.
- [3] **Підпригора, Д. М.** Рекурентна модель динаміки нафтового поля [Текст] / Д. М. Підпригора, І. В. Тимченко : матеріали Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми екології та енергосбереження в судостроєнні». — Миколаїв, 21–23 грудня 2005 р. / М-во освіти і науки України, Національний університет кораблебудування. — Миколаїв : НУК, 2005. — С. 229.
- [4] **Погребенник, В. Д.** Моделі процесів забруднення та самоочищення водного середовища [Текст] / В. Д. Погребенник, М. М. Мельник, О. О. Червінка : доклади Междунар. науч.-техн. семинара «Системы контроля окружающей среды – 2002». — Севастополь, 2002. — С. 41–47.
- [5] **Рибалов, О. О.** Збірник завдань до практичних робіт з курсу «Моделювання та прогнозування стану навколишнього середовища» : для студ. спец. 0401 «Екологія та збалансоване природокористування» усіх форм навчання [Текст] / О. О. Рибалов. — Суми : СумДУ, 2009. — 68 с.
- [6] **Рижков, С. С.** Багатофакторний аналіз рівнів екологічної небезпеки прибережних районів акваторії лиманного каналу [Текст] / С. С. Рижков, І. В. Тимченко, О. Л. Гіржева : тези доповіді 2 Міжнар. конгресу «Захист навколишнього природного середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування». — Львів, 2012. — С. 19.
- [7] Стан поверхневих вод [Електронний ресурс] / Державне управління охорони навколишнього природного середовища в Миколаївській області, 2012. — Режим доступу: <http://www.duecomk.gov.ua>.
- [8] **Тимченко, І. В.** Вдосконалення системи комп'ютеризованого екологічного моніторингу перевантаження шкідливих рідин в акваторіях морських портів [Текст] : автореф. дис. на здоб. наук. ступеня канд. техн. наук : 21.06.01 «Екологічна безпека» / І. В. Тимченко. — Миколаїв, 2010. — 21 с.
- [9] **Mokin, V.B.** Simulation of dynamics of processes of water biological purification with account of their serial-concurrent interrelation in the aquatic systems [Text] / V.B. Mokin // Hydrobiological journal. — 2012. — nr 48. — P. 100–107.

© С. С. Рижков, І. В. Тимченко, О. Л. Гіржева

Надійшла до редколегії 17.08.2012

Статтю рекомендує до друку член редколегії Вісника НУК
д-р техн. наук, проф. Ю. П. Кондратенко

Статтю розміщено у Віснику НУК №4, 2012