

TECHNICAL SCIENCE

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ ПРИ АВАРІЙНОМУ ВИТОКУ АМІАКУ

Біляєв М. М.

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Український державний університет науки і технологій*

Берлов О. В.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Безпека життєдіяльності»,
Придніпровська державна академія будівництва та архітектури*

Машихіна П. Б.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Український державний університет науки і технологій*

Якубовська З. М.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Енергетики»,
Український державний хіміко-технологічний університет*

MATHEMATICAL MODELING OF THE ATMOSPHERE POLLUTION IN CASE OF AMMONIA ACCIDENT RELEASE

Biliaiev M.

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of The Department «Hydraulics and Water Supply»,
Ukrainian State University of Science and Technology*

Berlov O.

*PhD, Associate Professor of The Department «Workplace Safety and Health»,
Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture*

Mashykhina P.

*PhD, Associate Professor of The Department «Hydraulics and water supply»,
Ukrainian State University of Science and Technology*

Yakubovska Z.

*PhD, Associate Professor of The Department «Power engineering»,
Ukrainian State University of Chemical Technology*

Abstract:

The development of a mathematical model for the analysis of the dynamics of the formation of a zone of chemical contamination in the event of an emergency leakage of ammonia from a damaged pipeline is considered. The simulation is based on the equation of convective-diffusion propagation of the impurity. The simulation takes into account the turbulent diffusion of ammonia, the uneven vertical profile of wind speed, the intensity of ammonia emissions. Numerical integration of the modeling equation is carried out by the splitting method. An explicit scheme is used to solve the difference equations at each splitting step. The software implementation of the constructed numerical model is carried out. The results of mathematical modeling are presented.

Анотація: Розглядається розробка математичної моделі для аналізу динаміки формування зони хімічного зараження при можливому аварійному витоку аміаку з пошкодженого трубопроводу. Моделювання здійснюється на базі рівняння конвективно-дифузійного розповсюдження домішки. При моделюванні враховується турбулентна дифузія аміаку, нерівномірний вертикальний профіль швидкості вітру, інтенсивність викиду аміаку. Чисельне інтегрування моделюючого рівняння здійснюється методом розщеплення. Для рішення різницьових рівнянь, на кожному кроці розщеплення, використовується явна схема. Здійснена програмна реалізація побудованої чисельної моделі. Представлено результати математичного моделювання.

Keywords: emergency air pollution, numerical simulation, ammonia pipeline, ecology

Ключові слова: аварійне забруднення повітря, чисельне моделювання, аміакопровід, екологія

Постановка проблеми.

На території України знаходиться дуже небезпечний хімічний об'єкт – аміакопровід «Тольятті-Одеса» (рис. 1). У випадку аварії можливий інтенсивний викид в повітря аміаку і масштабне забруднення навколишнього середовища. Крім цього, при аварії виникає великий ризик отруєння і токсичного

ураження людей. Така надзвичайна ситуація може статися при розгерметизації ділянки аміакопроводу при ініційованому впливі (диверсії). Тому виникає важлива задача оцінювання інтенсивності забруднення, в першу чергу, повітря з метою визначення зон хімічного ураження.

Слід відзначити, що в Україні для прогнозування розмірів зон хімічного зараження при аварійних викидах на промислових об'єктах використовуються, як правило, дві емпіричні моделі. Перша модель – методика, що використовує Державна служба з надзвичайних ситуацій. Згідно з цією методикою площа прогнозованої зони хімічного забруднення розраховується за формулою:

$$S_{\text{прог.}} = K \cdot \Gamma^2 \cdot N^{0,2} \text{ км}^2,$$

де K – коефіцієнт, який залежить від ступеня вертикальної стійкості повітря;

N – час, на який розраховується глибина площі прогнозованої зони хімічного забруднення;

Γ – глибина зони хімічного забруднення.

Друга методика – модель М.Е. Берлянда (методика ОНД-86) [2, 3]. Обидві методики не враховують розвиток зони хімічного забруднення з часом. Тому, розробка математичних моделей, що дозволяють визначати розвиток зон хімічного зараження з часом є важливою задачею. Тому пропонується чисельна модель для здійснення прогнозування зон хімічного забруднення атмосферного повітря при аварійному викиді аміаку на аміакопроводі.

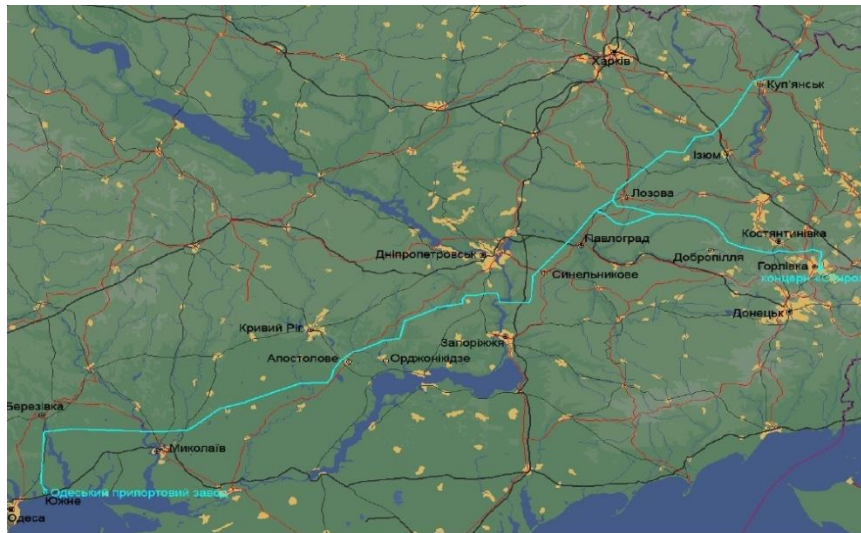


Рис.1. Схема української частини аміакопроводу «Тольятті-Одеса»

Мета. Побудова математичної моделі для оцінювання масштабу аварійного забруднення атмосферного повітря при емісії аміаку з трубопроводу.

Математична модель.

Для моделювання розповсюдження аміаку в повітрі використовується рівняння масопереносу [1, 2, 4, 6-8]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} + \frac{\partial vC}{\partial y} + \frac{\partial wC}{\partial z} + \sigma C = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \\ & + Q_i \cdot \delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i), \end{aligned} \quad (1)$$

де C – концентрація аміаку; σ – коефіцієнт, що враховує хімічний розпад домішки $u(x, y, z), v(x, y, z), w(x, y, z)$ – компоненти вектору швидкості вітру; μ_x, μ_y, μ_z – коефіцієнти атмосферної турбулентної дифузії; Q – інтенсивність емісії аміаку; $\delta(x - x_i) \cdot \delta(y - y_i) \cdot \delta(z - z_i)$ – дельта-функція Дірака; x_i, y_i, z_i – координати джерела викиду аміаку; t – час.

При проведенні розрахунків враховується нерівномірність вертикального коефіцієнта дифузії та швидкості повітря по висоті [2, 3]:

$$u = u_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^p, \quad \mu_z = k_1 \left(\frac{z}{z_1} \right)^m, \quad \mu_x = \mu_y = k_0 u,$$

В цих залежностях маємо: $p = 0,15$; $m = 1$; $k_1 = 0,2$; $k_0 = 0,1 \div 1$ [2, 3].

Для моделюючого рівняння (1) реалізуються наступні граничні умови [4, 6]:

1. На межі, де потік вітру «втікає»: $C = 0$.
2. На межі області, де потік вітру «виходить» з області: $\left. \frac{\partial C}{\partial n} \right|_{\Gamma_2} = 0$.

Початкова умова: для $t = 0: C = 0$ в розрахунковій області.

Чисельна модель.

Для чисельного розв'язання моделюючого рівняння (1) здійснимо таке розщеплення [1]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial uC}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right), \\ & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial vC}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right), \\ & \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial wC}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \sigma C = \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t)) \delta(z - z_i(t)).$$

Різницеви аналоги для похідних з системи рівнянь (2) такі:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &\approx \frac{C_{ij}^{n+1} - C_{ij}^n}{\Delta t}, \\ \frac{\partial u C}{\partial x} &= \frac{\partial u^+ C}{\partial x} + \frac{\partial u^- C}{\partial x}, \\ \frac{\partial v C}{\partial y} &= \frac{\partial v^+ C}{\partial y} + \frac{\partial v^- C}{\partial y}, \\ \frac{\partial w C}{\partial z} &= \frac{\partial w^+ C}{\partial z} + \frac{\partial w^- C}{\partial z}, \end{aligned}$$

де

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; u^- = \frac{u - |u|}{2}; v^+ = \frac{v + |v|}{2};$$

$$v^- = \frac{v - |v|}{2}; w^+ = \frac{w + |w|}{2}; w^- = \frac{w - |w|}{2}.$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) &\approx \mu_x \frac{C_{i+1,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ - \mu_x \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x^2} &= M_{xx}^- C^{n+1} + M_{xx}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) &\approx \mu_y \frac{C_{i,j+1,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ - \mu_y \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y^2} &= M_{yy}^- C^{n+1} + M_{yy}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) &\approx \mu_z \frac{C_{i,j,k+1}^{n+1} - C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z^2} - \\ - \mu_z \frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z^2} &= M_{zz}^- C^{n+1} + M_{zz}^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^+ C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^+ C_{i-1,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial u^- C}{\partial x} &\approx \frac{u_{i+1,j,k}^- C_{i+1,j,k}^{n+1} - u_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^+ C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^+ C_{i,j-1,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial v^- C}{\partial y} &\approx \frac{v_{i,j+1,k}^- C_{i,j+1,k}^{n+1} - v_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- C^{n+1}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w^+ C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^+ C_{i,j,k}^{n+1} - w_{i,j,k}^+ C_{i,j,k-1}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^+ C^{n+1}, \\ \frac{\partial w^- C}{\partial z} &\approx \frac{w_{i,j,k+1}^- C_{i,j,k+1}^{n+1} - w_{i,j,k}^- C_{i,j,k}^{n+1}}{\Delta z} = L_z^- C^{n+1}. \end{aligned}$$

Різницеву схему за допомогою якої визначається концентрація аміаку розглянемо на прикладі першого рівняння з системи (3). Ця схема записується так:

– перший крок розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^k - C_{i,j,k}^n}{\Delta t} + L_x^+ C^k = M_{xx}^+ C^k + M_{xx}^- C^n, \quad (3)$$

– другий крок розщеплення:

$$\frac{C_{i,j,k}^{n+1} - C_{i,j,k}^k}{\Delta t} + L_x^- C^{n+1} = M_{xx}^+ C^n + M_{xx}^- C^{n+1}. \quad (4)$$

Так саме записується різницева схема розщеплення для другого та третього рівняння з (2). Останнє рівняння з системи (2) розв'язується за допомогою методу Ейлера [5] наступним чином $C^{n+1} = C^n - dt * \sigma C + dt * \sum Q_i(t) \delta(x - x_i(t)) \delta(y - y_i(t))$.

Для кодування різницевих рівнянь був використаний FORTRAN.

Практичне застосування моделі.

Розроблена чисельна модель була використана для аналізу формування зони хімічного забруднення при можливому аварійному витокі на аміакопроводі «Тольятті-Одеса», на ділянці, що розташована поблизу с.м.т. Синельникове (рис. 2). Вихідні дані для проведення обчислювального експерименту були такі: швидкість вітру на висоті 10м дорівнює $u=8$ м/с; довжина розрахункової області 6000 м, ширина розрахункової області 12000 м; $\sigma = 0$; напрям вітру: західно-південний.

Для моделювання нестационарного виток аміаку з пошкодженого трубопроводу, тобто, для визначення витрати аміаку $Q(t)$ з трубопроводу, використовується методика, що наведена в роботі [1]. Місце можливої емісії аміаку показано на рис. 2, позиція 2.

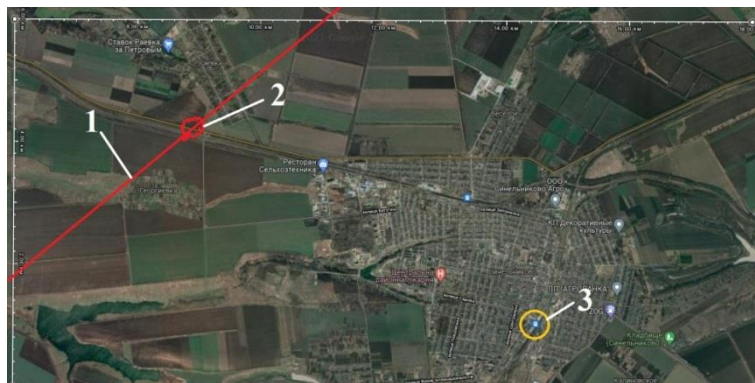


Рис.2. Розрахункова область: 1 – аміакопровід «Тольятті-Одеса»; 2 – місце емісії аміаку; 3 – залізничний вокзал с.м.т. Синельникове (Google Image, 2021)

Далі, на рисунках показано як формується з часом зона хімічного зараження (рівень $z=4$ м).

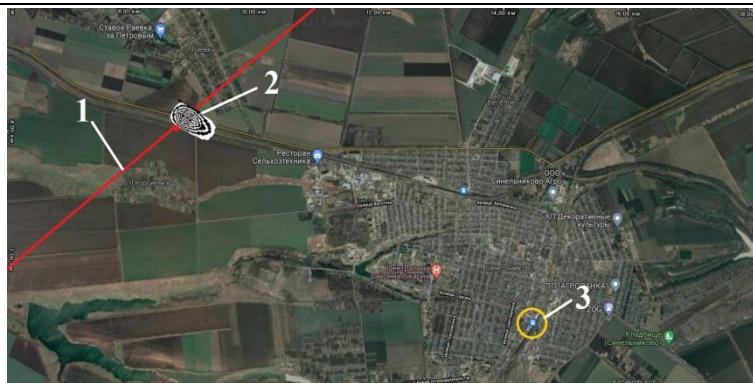


Рис. 3. Зона забруднення для моменту часу $t=60$ с

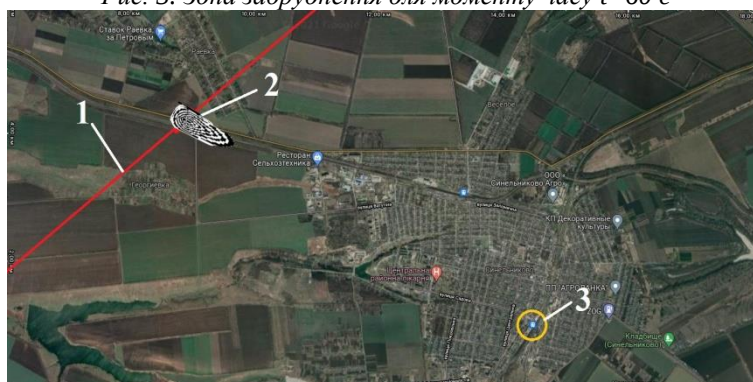


Рис. 4. Зона забруднення для моменту часу $t=125$ с



Рис.5. Зона забруднення для моменту часу $t=250$ с



Рис. 6. Зона забруднення для моменту часу $t=375$ с



Рис. 7. Зона забруднення для моменту часу $t=500$ с



Рис. 8. Зона забруднення для моменту часу $t=750$ с

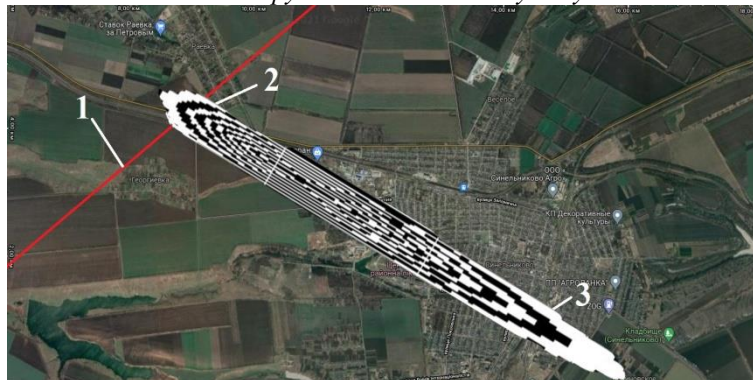


Рис. 9. Зона забруднення для моменту часу $t=1000$ с

Аналіз розрахункових даних показує, що зона хімічного зараження дуже швидко досягає селітебну зону с.м.т. Синельникове (рис. 6). Також можна бачити, що приблизно за 750 с після початку витіку аміаку виникає ризик токсичного ураження людей на залізничному вокзалі с.м.т. Синельникове (рис. 8). Слід відзначити, що с.м.т. Синельникове є великим залізничним вузлом, де на вокзальній станції знаходиться значне скупчення людей.

Таким чином, аварійний виток аміаку з пошкодженого трубопроводу призведе до можливого токсичного ураження людей в с.м.т. Синельникове. У зв'язку з цим необхідно рекомендувати:

1. Потрібно забезпечити виробничий персонал та людей, що знаходяться в селищі індивідуальними засобами захисту.

2. Потрібно створити кімнати безпеки «save room» для швидкого укриття персоналу на промислових та інших об'єктах.

3. Здійснювати підвищений контроль за станом аміакопроводу.

Відзначимо, що час розрахунку 5 с.

Висновки.

1. Розглянута чисельна модель для оперативного аналізу формування зони хімічного зараження при аварійному витіку аміаку з трубопроводу.

2. На підставі виконаного обчислювального експерименту визначено значний ризик токсичного ураження людей в с.м.т. Синельникове біля якого розташований аміакопровід «Тольятті-Одеса».

Список джерел

1. Амеліна Л. В., Біляєв М. М., Машина П. Б. Математичне моделювання наслідків аварій на потенційно небезпечних об'єктах. Журфонд: Дніпро, 2021 р. 135 с.

2. Берлянд М. Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы / Ленинград : Гидрометеиздат, 1985. – 273 с.

3. Бруцкий Е. В. Теория атмосферной диффузии радиоактивных выбросов / Киев : Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000. – 443 с.

4. Марчук Г. И. Математическое моделирование в проблеме окружающей среды / Марчук Г. И. – Москва : Наука, 1982. – 320 с.

5. Самарский А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1983. – 616 с.
6. Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде [Текст] / М. З. Згуровский, В. В. Скопецкий, В. К. Хрущ, Н. Н. Беляев. – К. : Наук.думка, 1997. – 368 с.
7. Biliaiev M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography, *Air Pollution Modeling and its Application XXI (Springer)*. – 2012. P. 87-91.
8. Biliaiev M., Pshinko O., Rusakova T., Biliaieva V., Sladkowski A. Computer Model for Simulation of Pollutant Dispersion Near the Road with Solid Barriers. *Transport Problems, Volume 16, Issue 2, Part 1*, – 2021. P.73-86. DOI: 10.21307/tp-2021-024

ОЦІНЮВАННЯ РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ВОДОЛАЗА У ВИПАДКУ РОБОТИ В АГРЕСИВНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Біляєв М. М.

*доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Український державний університет науки і технологій*

Біляєва В. В.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Аерогідромеханіка та енергомасоперенос»,
Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара*

Гулько О. Ю.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Український державний університет науки і технологій*

Козачина В. А.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Гідравліка та водопостачання»,
Український державний університет науки і технологій*

Татарко Л. Г.

*кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри «Енергетики»,
Український державний хіміко-технологічний університет*

ASSESSMENT OF THE RISK OF DIVING IN THE CASE OF WORKING IN AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

Biliaiev M.

*Doctor of Technical Sciences, Professor
Head of The Department «Hydraulics and Water Supply»,
Ukrainian State University of Science and Technology*

Biliaieva V.

*PhD, Associate Professor of The Department
«Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer»,
Dniprovsk National University after Oles Gonchar*

Gunko O.

*PhD, Associate Professor of The Department «Hydraulics and water supply»,
Ukrainian State University of Science and Technology*

Kozachyna V.

*PhD, Associate Professor of The Department «Hydraulics and water supply»,
Ukrainian State University of Science and Technology*

Tatarko L.

*PhD, Associate Professor of The Department «Power engineering»,
Ukrainian State University of Chemical Technology*

Abstract:

The development of a numerical model for assessing the risk of chemical or thermal damage to divers during repair work on damaged underwater pipelines is considered. A two-dimensional mass transfer equation is used to model the chemical pollution of the water area. The energy equation is used to model the process of thermal pollution of the water area. The calculation of flow hydrodynamics is based on the Euler equations. An explicit finite-difference scheme is used to numerically integrate the energy equation. Splitting schemes are used for numerical integration of Euler equations. An implicit difference splitting scheme is used to numerically integrate the mass transfer equation. The software implementation of the constructed numerical model is carried out. The results of a computational experiment are presented.