

ТЕОРІЯ І МЕТОДИ ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ

УДК 004.415.2 : 681.533

М. Лобур, В. Теслюк, П. Денисюк, М. Перейма
Національний університет “Львівська політехніка”

РОЗРОБЛЕННЯ СТРУКТУРИ ПРОГРАМНО-МЕТОДИЧНОГО КОМПЛЕКСУ АНАЛІЗУ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ГІДРО- ТА ГАЗОДИНАМІЧНИХ СИСТЕМАХ

© Лобур М., Теслюк В., Денисюк П., Перейма М., 2004

Розглянуто проблеми, які виникають під час розроблення програмно-методичного комплексу для аналізу фізичних процесів в гідро- та газодинамічних системах.

In the article problems of program-methodical system development for physical processes analysis in hydro- and gasdynamic systems are considered.

З розвитком промисловості сучасне виробництво не можливе без широкого використання систем автоматизованого проектування (САПР) та потужної обчислювальної техніки. Розроблення системи аналізу гідро- та газодинамічних процесів у технологічному обладнанні дасть змогу моделювати їх на комп'ютері та визначати вузькі місця конструкції системи ще на етапі проектування.

Відомі системи аналізу (CosmosWorks, Fluid, Flametrix) фізичних процесів у технологічному обладнанні є дорогими та не дають змоги провести математичний аналіз фізичних процесів в елементах специфічної конструкції гідро- та газодинамічної системи (ГГДС). Саме тому виникла необхідність у розроблення нових математичних моделей елементів на основі рівнянь Нав'є–Стокса та програмно-методичного комплексу для розв'язання поставлених задач не тільки числовими, але й аналітичними методами.

Архітектура цієї системи є стандартною та складається з трьох основних складових:

- препроцесор, який забезпечує підготовку вхідного завдання;
- процесор, який призначений для організації процесу обчислень;
- постпроцесор – для відображення результатів моделювання.

Архітектура цієї системи зображена на рис. 1.

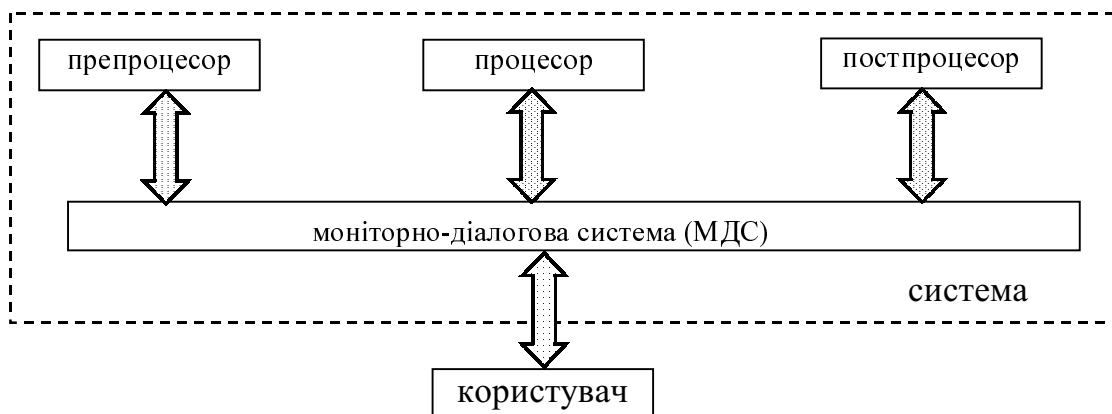


Рис. 1. Архітектура системи аналізу фізичних процесів у ГГДС

Препроцесор здійснює такі основні операції:

- формування конструкції ГГДС;
- генерація математичної моделі залежно від необхідної точності вихідних результатів;
- контроль коректності задання вхідних даних з видачею відповідних повідомлень.

Редактор для формування конструкції ГГДС реалізує таке:

- забезпечує формування конструкції системи з стандартних елементів;
- формування вхідного файла в діалоговому режимі;
- перевірка на коректність вводу вхідних даних:
 - початкових умов;
 - граничних умов;
- врахування за вибором користувача певних особливостей створюваної ГГДС:
 - можливість вибору користувачем складності математичних моделей;
 - можливість вибору методу розв'язання диференціальних рівнянь.

Схематично робота препроцесора (редактора для формування ГГДС) зображена на рис. 2. Результатом роботи якого є формування вхідного файла.

Процесор системи призначений для обчислення розподілу швидкості, тиску, температури та концентрації в елементах модельованої ГГДС (рис. 3). Разом з цим користувач має змогу контролювати та управляти обчисленням. Для прикладу, керувати точністю вихідних результатів моделювання, примусовим зменшенням кроку по координаті і часу та вибирати метод обчислення задачі.

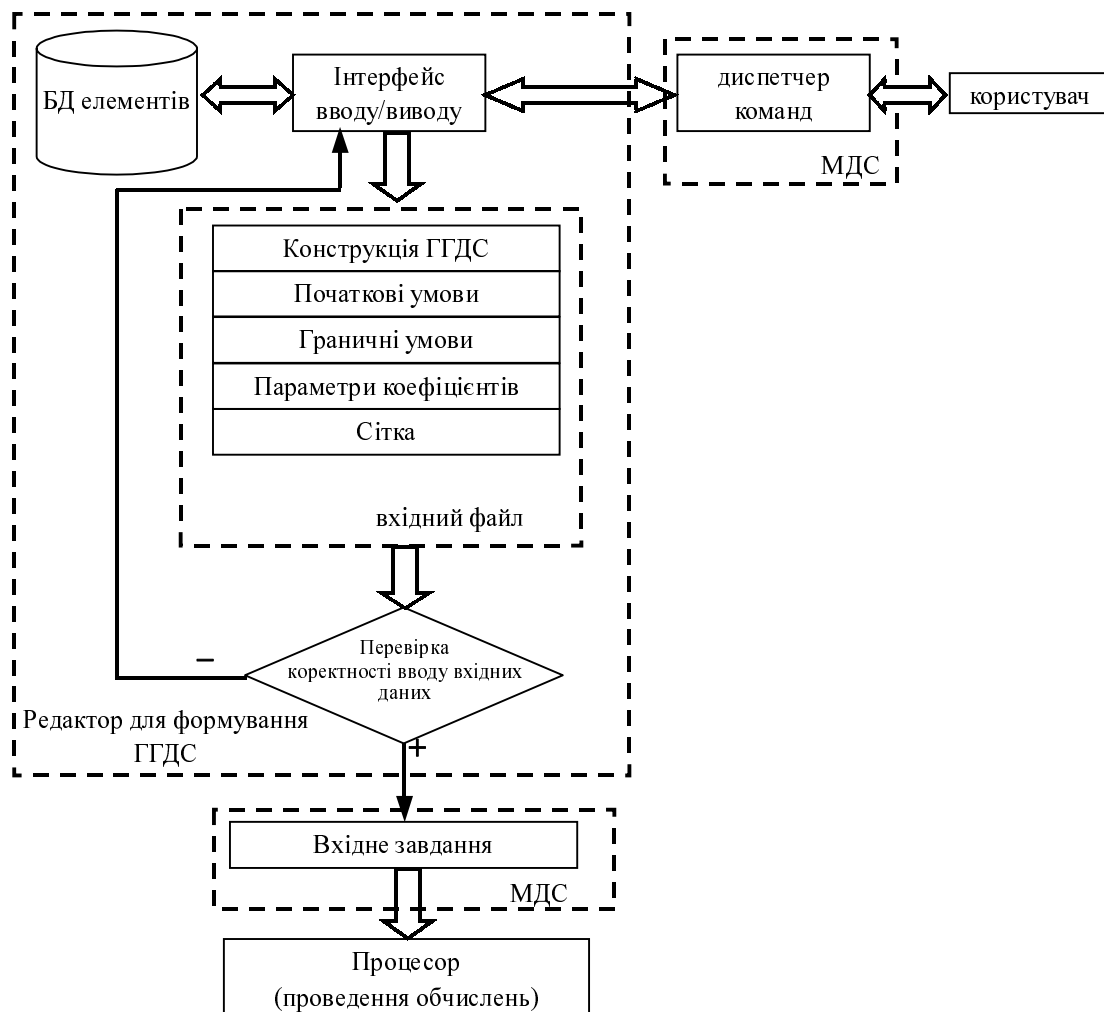


Рис. 2. Структурна схема редактора для формування ГГДС

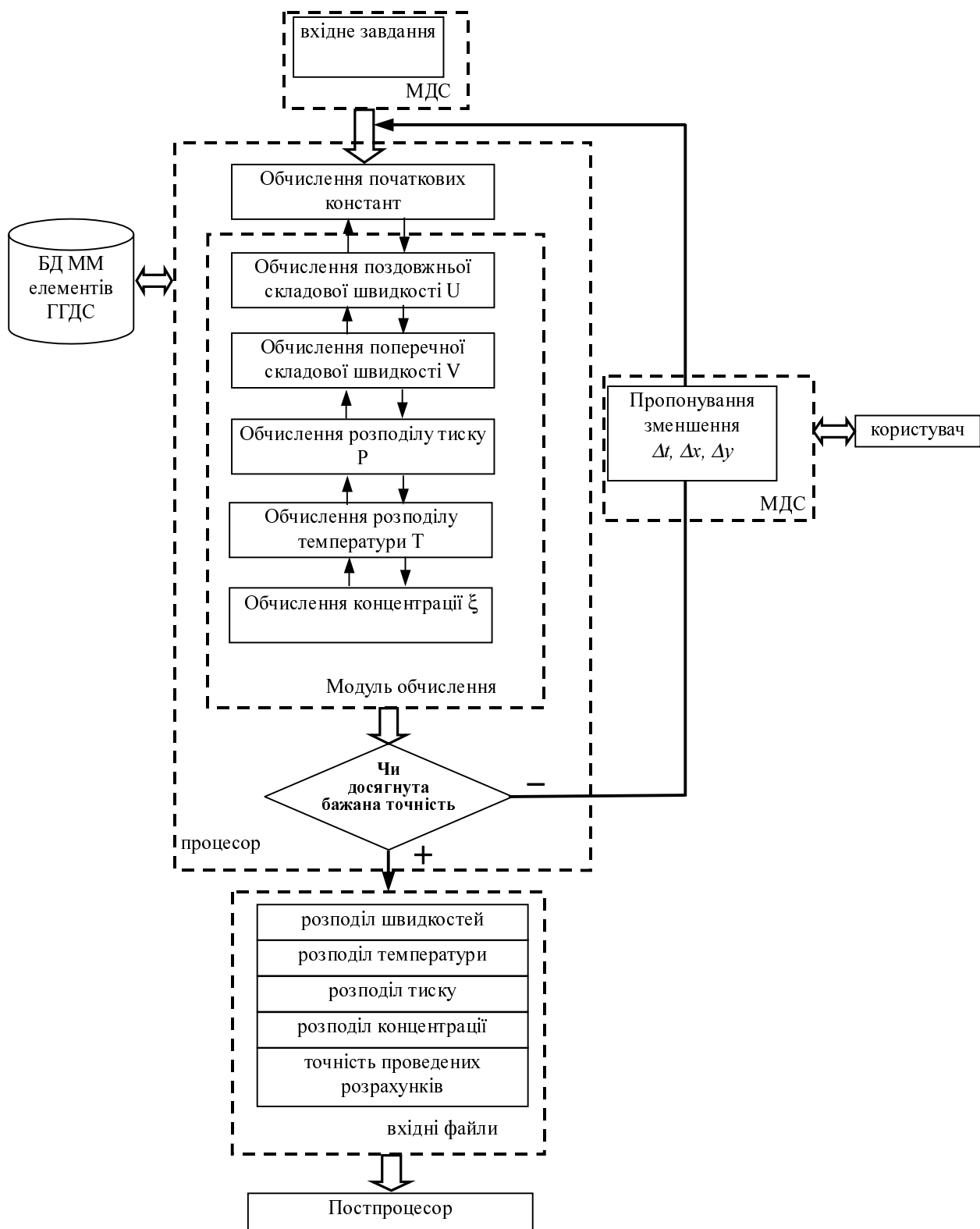


Рис. 3. Структурна схема процесора системи аналізу ГГДС

Підсистема, яка виконує функції процесора, містить такі модулі:

- модуль обчислення швидкості;
- модуль обчислення розподілу тиску P ;
- модуль обчислення розподілу температури T ;
- модуль обчислення концентрації ξ .

Постпроцесор (рис. 4) дає змогу відобразити вихідні результати моделювання у вигляді графіків, гістограм та текстових таблиць.

Для узгодження взаємодії між складовими системи використовується моніторно-діалогова система (МДС), яка забезпечує інформаційний обмін та діалогову взаємодію між користувачем і системою.

Процесор для розв'язання задач може використовувати не тільки числові, але й аналітичні методи.

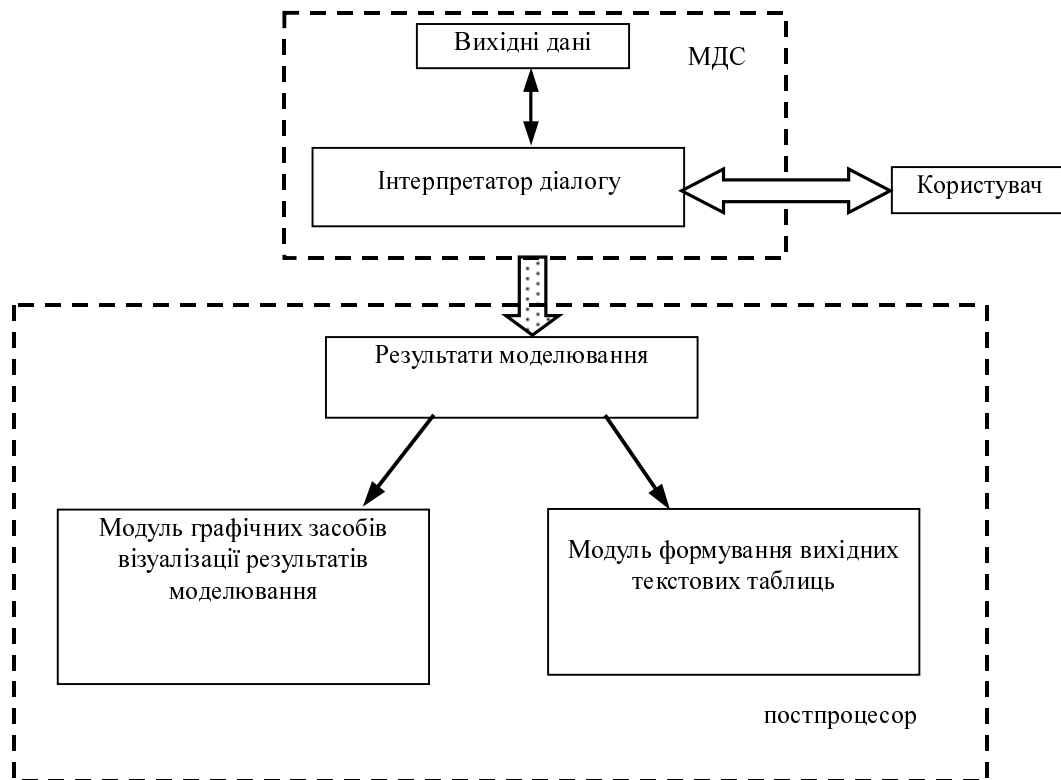


Рис. 4. Структурна схема редактора для відображення результатів моделювання системи аналізу ГГДС

Для прикладу побудуємо математичну модель елемента Т-подібної форми (рис. 5).

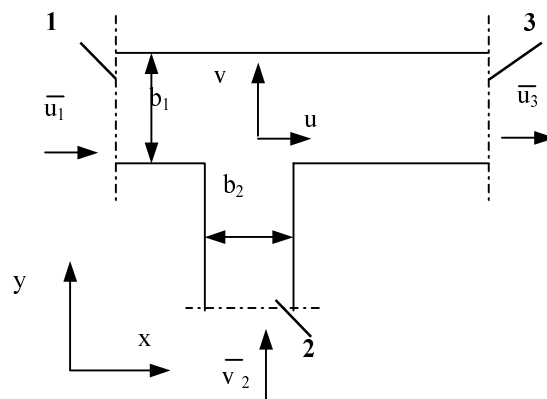


Рис. 5. Конструкція елемента Т-подібної форми

Розглянемо двовимірний стаціонарний потік у зоні претину двох взаємно-перпендикулярних каналів.

Використаємо декартову систему координат і покриємо розрахункову область моделювання прямокутною сіткою зі згущенням вузлів біля твердих поверхонь (рис. 6). Рівняння руху та масопереносу з врахуванням ламінарного режиму руху потоку запишеться у вигляді [1]:

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \\ \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\text{Re}} \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right), \\ \frac{\partial u\xi}{\partial x} + \frac{\partial v\xi}{\partial y} &= \frac{1}{\text{Re}Sc} \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} \right),\end{aligned}$$

де числа Рейнольдса та Шмідта відповідно дорівнюють: $\text{Re} = \bar{u}b_1/\nu$; $Sc = \nu/D$.

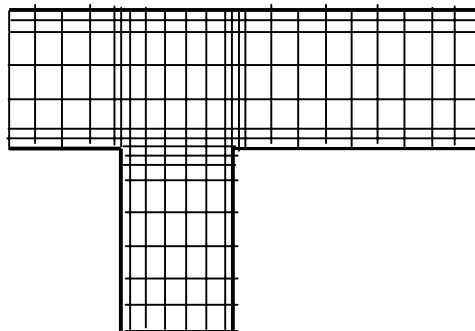


Рис. 6. Покриття елемента Т-подібної форми нерівномірною прямокутною сіткою зі згущенням вузлів біля твердих поверхонь

Після інтегрування системи рівнянь по відповідних контрольних об'ємах, отримаємо систему п'ятиточкових алгебраїчних рівнянь:

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + S_P.$$

Для числового розв'язання якої використовується метод SIMPLE, який є загальновідомим та описаний в роботі [2, 3, 4].

Згідно з цим методом в усіх вузлах сітки, включно з вузлами, які розміщені на вхідній та вихідній границі області моделювання, обчислюються початкові значення швидкості u^1 та v^1 . З використанням відомого нам до цього моменту розподілу тиску p^1 скорегуємо значення швидкості і тиску у внутрішніх вузлах сітки за формулами:

$$\begin{aligned}p_P &= p_P^1 + \delta p_P, \\ u_P &= u_P^1 - \left(A^u / a_P^u \right) (\delta p_P - \delta p_{P_W}), \\ v_P &= v_P^1 - \left(A^v / a_P^v \right) (\delta p_P - \delta p_{P_S}),\end{aligned}$$

де $A^u = vol_u / h_e$; $A^v = vol_v / h_n$, де $vol_{u,v}$ – значення контрольного об'єму.

У вузлах, які розміщені у перерізі входу та виходу, робиться коректування усереднений градієнт швидкості за допомогою залежностей:

$$\begin{aligned}(u_P)_1 &= (u_P^1)_1 + (vol_u / a_P^u) \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_1; \quad \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_1 = \left(\frac{\partial \bar{p}^1}{\partial x} \right)_1 + \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_1, \\(u_P)_3 &= (u_P^1)_3 + (vol_u / a_P^u) \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_3; \quad \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_3 = \left(\frac{\partial \bar{p}^1}{\partial x} \right)_3 + \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_3, \\(v_P)_2 &= (v_P^1)_2 + (vol_v / a_P^v) \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right)_2; \quad \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right)_2 = \left(\frac{\partial \bar{p}^1}{\partial y} \right)_2 + \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right)_2,\end{aligned}$$

де індекси 1, 2, 3 означають належність величин відповідно до отворів 1, 2, 3 $\left(\partial \bar{p}^1 / \partial x \right)_{1,3}$ та

$\left(\partial \bar{p}^1 / \partial y \right)_2$ – значення градієнтів тиску на попередньому ітераційному кроці.

Значення $\delta \left(\partial \bar{p}^1 / \partial x \right)_{1,3}$ та $\delta \left(\partial \bar{p}^1 / \partial y \right)_2$ в перерізах входу та виходу визначаються за

заданими значеннями витрат з умови виконання інтегрального рівняння неперервності:

$$\begin{aligned}\delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_1 &= (Q_1 - \sum u_{P1} \Delta y_P) / \left[\sum (vol_u / a_P^u) \Delta y_P \right] \\ \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right)_2 &= (Q_2 - \sum v_{P2} \Delta x_P) / \left[\sum (vol_v / a_P^v) \Delta x_P \right] \\ \delta \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_3 &= (Q_1 + Q_2 - \sum u_{P3} \Delta y_P) / \left[\sum (vol_u / a_P^u) \Delta y_P \right]\end{aligned}$$

Значення Q_1 та Q_2 визначають витрати газу через отвори 1 та 2.

Для розрахунку було обрано такі значення коефіцієнтів $Re = 400, K_Q = 0,66$.

Як випливає з графіка (рис. 7), при кількості ітерацій $N=150$ отримані значення

$$\beta_1 = - \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_1 = 0,0185; \quad \beta_2 = - \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right)_2 = 0,012; \quad \beta_3 = - \left(\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right)_3 = 0,0305.$$

Розраховані теоретичні значення такі: $\beta_1 = 0,018$; $\beta_2 = 0,0119$; $\beta_3 = 0,03$, що з великою точністю збігається з експериментальними значеннями.

Після проведення обчислень усі результати моделювання записуються у вихідний файл, який є вхідними даними для постпроцесора. Постпроцесор призначений для візуалізації вихідних результатів моделювання у вигляді:

- графіків;
- гістограм;
- текстових таблиць.

Редактор для відображення результатів (постпроцесор) містить такі модулі:

- модуль графічних засобів візуалізації результатів моделювання;
- модуль формування вихідних текстових таблиць;
- модуль інтерпретатора діалогу міжкористувачем та постпроцесором.

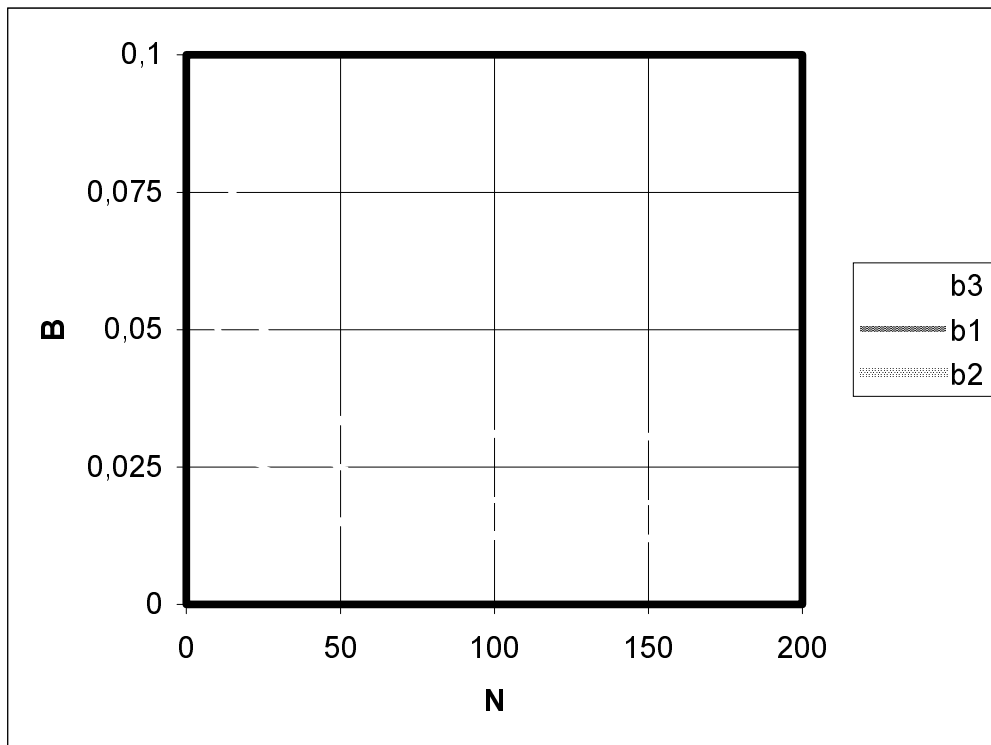


Рис. 7. Графік залежності розрахованих градієнтів тиску від кількості операцій

Користувач має змогу отримувати вихідну інформацію у формі ліній рівня, кольорової гами, текстових таблиць та гістограм (рис. 8).

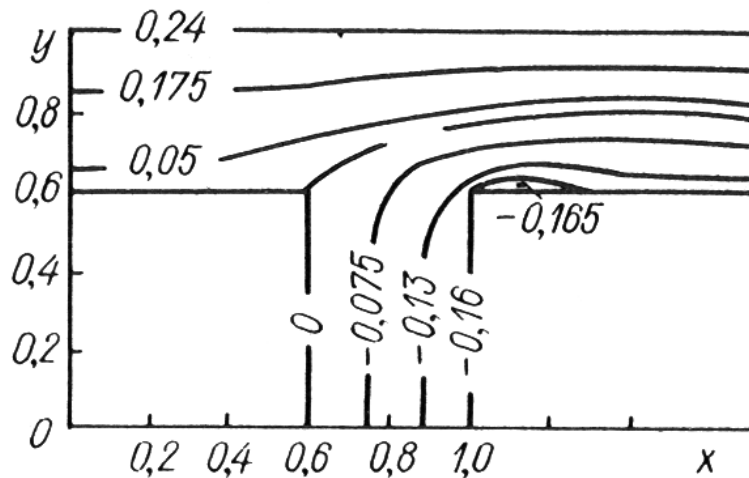


Рис. 8. Поля ліній потоку в розрахунковій області

Висновки. Розроблена система аналізу фізичних процесів у ГГДС дозволяє моделювати та досліджувати процеси, які відбуваються у технологічному обладнанні, формувати будь-яку конструкцію системи та відобразити вихідні результати у зручній формі для сприйняття її користувачем.

1. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. – Т. 1. – М.: Мир, 1991. – С. 37 – 41. 2. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. – Т. 2. – М.: Мир, 1991. – С. 423 – 430. 3. Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. – Т. 2. – М.: Мир, 1991. – С. 550 – 559. 4. Латин Ю.В., Стрелец М.Х. Внутренние течения газовых смесей. – М.: Наука, 1989. – 368 с.