

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

До друку дозволяю

проф. Романовський О.Г.

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
«МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ У СТАЦІОНАРНОМУ ТА
НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ» ЗА КУРСАМИ
МАТЕМАТИЧНОГО ТА КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

для студентів усіх хімічних спеціальностей

Затверджено
редакційно-видавничим
відділом університету,
протокол № 1 от 07.06.13 г.

Харків
НТУ «ХПІ»
2016

Методичні вказівки до д лабораторних робіт «Моделювання гідравлічних систем у стаціонарному та нестаціонарному режимах функціонування» за курсами математичного та комп'ютерного моделювання для студентів хімічних спеціальностей усіх форм навчання / укл. Бабак Т.Г., Голубкіна О.О., Пономаренко Є.Д., Соловей Л.В. – Х. : НТУ «ХП», 2017. – 34с.

Укладачі: Т.Г. Бабак
 Голубкіна О.О
 Пономаренко Є.Д.
 Соловей Л.В.

Рецензент к.т.н., доцент кафедри ІТПА К.О.Горбунов

Кафедра інтегрованих технологій, процесів та апаратів

Лабораторна робота

Комп'ютерне моделювання

гідравлічних систем у стаціонарному режимі

Постановка задачі. Розробити математичне й програмне забезпечення для розрахунку складної гідравлічної системи із звужуючими пристроями (рис. 1).

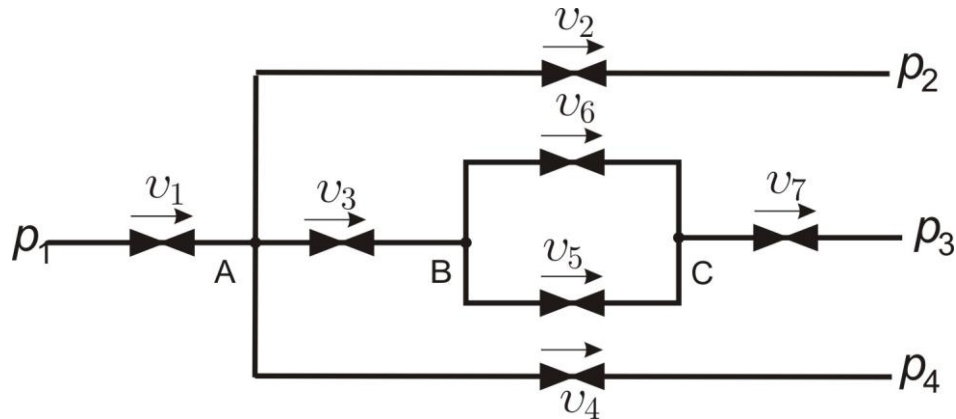


Рисунок 1 – Умовна схема гідравлічної системи:

➤ – звужуючий пристрій (вентиль, дросель, апарат, який створює місцевий гідравлічний опір потоку)

Спрошені припущення:

1. Умови ізотермічні, $T = \text{const}$.
2. Хімічні або фазові перетворення в потоці відсутні.
3. Гідравлічними опорами сполучних трубопроводів можна знехтувати.
4. Рідина нестислива, $\rho = \text{const}$.

Складання математичної моделі

Падіння тиску рідини за наявності місцевого опору в потоці визначається за формулою

$$\Delta p = \lambda_m \frac{\rho w^2}{2}, \quad (1)$$

у якій лінійна швидкість руху потоку становить

$$w = v/f. \quad (2)$$

Тут v – об’ємна витрата потоку, $\text{м}^3/\text{с}$; w – середня швидкість руху потоку, $\text{м}/\text{с}$; f – площа поперечного перерізу трубопроводу, м^2 ; ρ – густина потоку, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\lambda_{\text{м}}$ – коефіцієнт місцевого опору.

Підставимо рівняння (2) в (1), отримаємо

$$\Delta p = \frac{\lambda_{\text{м}} \cdot \rho}{2 \cdot f^2} v^2,$$

звідки

$$v = \frac{f \sqrt{2}}{\sqrt{\lambda_{\text{м}} \cdot \rho}} \sqrt{\Delta p}. \quad (3)$$

Заради зручності введемо коефіцієнт пропускної спроможності звужуючого пристрою k , $\text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$:

$$\frac{f \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{\lambda_{\text{м}} \cdot \rho}} = k. \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (3) отримаємо рівняння для розрахунку об’ємної витрати. З урахуванням того, що знаки величин v і Δp повинні збігатися, отримане рівняння матиме вигляд

$$v = k \cdot |\Delta p|^{0,5} \cdot \text{sign}(\Delta p), \quad (5)$$

де sign – функція «знак»;

$$\text{sign}(\Delta p) = \pm 1.$$

При складанні математичного опису необхідно враховувати, що кількість рівнянь повинна дорівнювати кількості невідомих. Кількість рівнянь типу (5) відповідає кількості звужуючих пристроїв.

У даній гідравлічній системі тиски в точках розгалуження трубопроводів є невідомими. Тому математичний опис доповнюється необхідною кількістю рівнянь відповідно до викладеної вище вимоги. При їх складанні враховується, що в місцях розгалуження трубопроводів виконується закон збереження маси, тобто кількість рідини, що втікає повинна дорівнювати кількості рідини, що витікає. Наприклад, для точки А $v_1 = v_2 + v_3 + v_4$.

З урахуванням цього, математичний опис гідравлічної системи, наведеної на рис. 1, набуває вигляду

$$v_1 = k_1 \cdot \sqrt{|p_1 - p_A|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_A); \quad (6)$$

$$v_2 = k_2 \cdot \sqrt{|p_A - p_2|} \cdot \text{sign}(p_A - p_2); \quad (7)$$

$$v_3 = k_3 \cdot \sqrt{|p_A - p_B|} \cdot \text{sign}(p_A - p_B); \quad (8)$$

$$v_4 = k_4 \cdot \sqrt{|p_A - p_4|} \cdot \text{sign}(p_A - p_4); \quad (9)$$

$$v_5 = k_5 \cdot \sqrt{|p_B - p_C|} \cdot \text{sign}(p_B - p_C); \quad (10)$$

$$v_6 = k_6 \cdot \sqrt{|p_B - p_C|} \cdot \text{sign}(p_B - p_C); \quad (11)$$

$$v_7 = k_7 \cdot \sqrt{|p_C - p_3|} \cdot \text{sign}(p_C - p_3); \quad (12)$$

$$v_1 = v_2 + v_3 + v_4; \quad (13)$$

$$v_3 = v_5 + v_6; \quad (14)$$

$$v_5 + v_6 = v_7. \quad (15)$$

Одержана система рівнянь (6)–(15) та (16) має єдиний розв'язок, оскільки кількість рівнянь (10) дорівнює кількості невідомих (10).

Відмітимо, що з рівнянь (14) і (15) виходить рівняння:

$$v_3 = v_7. \quad (16)$$

Тому одне з рівнянь (15), або (14) замінюємо рівнянням (16) і не будемо використовувати при розв'язанні системи рівнянь.

Метод розв'язання системи рівнянь

Отриманий математичний опис гідравлічної системи складається із системи нелінійних скінченних рівнянь. Для розробки оптимального алгоритму її розв'язання доцільно побудувати інформаційну матрицю (табл. 1), що містить повну інформацію про невідомі відповідно до таких правил:

1. Інформаційну матрицю розміщують у таблиці, у шапці якої поміщують найменування невідомих. Виняток становлять перший стовпець, в якому поміщують порядкові номери рівнянь математичного опису, та останній стовпець, у якому поміщують порядкові номери рівнянь відповідно до черговості їх розв'язання.

2. Кожному рівнянню системи (6)–(16) відповідає один рядок матриці.

3. Кожній невідомій величині відповідає один стовпець.

4. Наявність невідомої в рівнянні відзначається в матриці символом «+», розташованим в точці перетинання рядка й стовпця, відповідно до рівняння й невідомої.

Аналіз інформаційної матриці показує, що всі рядки містять дві й більш невідомих, а отже, жодне з рівнянь системи не розв'язується аналітично. Для чисельного розв'язання системи рівнянь використовується метод ітерації (послідовних наближень). Суть методу полягає в послідовному уточненні початкового наближення. Система рівнянь розв'язується таким чином, щоб останньою визначалася змінна, що одержала початкове наближення. Необхідно перетворити останнє рівняння, що буде розв'язуватися, таким чином, щоб можна було знайти нове наближення невідомої за її попереднім наближенням, тобто $v_{i+1} = f(v_i)$. Для застосування методу ітерації необхідно вибрати початкове наближення для однієї із змінних. Доцільно задати початкове наближення для однієї з об'ємних витрат v_j у рівнянні, що містить лише дві невідомі. Нехай це буде витрата v_1 . В інформаційній таблиці така змінна позначається символом \boxplus . Тоді відповідне рівняння розв'язується щодо невідомої, яка залишилася. У наведеному прикладі за умови, що значення змінної v_1 є відомим, в першому рядку матриці залишається єдина невідома величина p_A , значення якої визначається розв'язанням рівняння (6). Таку змінну позначають в інформаційній таблиці символом \boxplus . Елементи стовпця, в якому з'явився

символ \diamond , одержують непряме визначення. Їх обводять символом \oplus . Якщо у заповненій інформаційній матриці є рядок, що містить тільки символи непрямого визначення, то це означає, що дане рівняння буде використано для корекції початкового наближення.

Наведена нижче інформаційна таблиця 1, що заповнена описаним способом, дозволяє визначити черговість розв'язання рівнянь даної системи. Рядок, що відповідає рівнянню (14), містить тільки символи непрямого визначення і не включає змінну v_1 , тому рівняння (14) необхідно перетворити з урахуванням рівняння (13) до вигляду

$$v_{1,N} = v_2 + v_4 + v_5 + v_6. \quad (17)$$

Індекс N показує, що невідома змінна, отримана в результаті розв'язання корегувального рівняння, використовується для порівняння з початковим наближенням.

Оскільки метод ітерацій не завжди збігається, застосовують різні методи забезпечення стійкої його збіжності. Найбільш простим є метод ітерації з релаксацією, який полягає в тому, що при визначенні невідомої до її значення на попередній ітерації додається помножена на коефіцієнт релаксації $r < 1$ різниця між новим наближенням за методом простої ітерації і старим наближенням:

$$v_{i+1} = v_i + r(v_{i,N} - v_i), \quad (18)$$

де v_{i+1} – значення змінної v на $(i + 1)$ - ітерації; v_i – початкове значення змінної v на попередній i -й ітерації; $v_{i,N}$ – нове значення змінної v , отримане наприкінці i -ої ітерації за попереднім наближенням.

При використанні простої ітерації $r = 1$ і $v_{i+1} = v_{i,N}$.































Для даного випадку рекомендоване значення коефіцієнта релаксації $r = 0,1$. Його слід зменшити, якщо відсутня збіжність розв'язку при розрахунку. За відсутності збіжності передбачається вихід з програми з видачею повідомлення про помилку, якщо перевищена максимальна

кількість ітерацій. Розрахунок закінчується, коли відносна зміна невідомої у двох послідовних ітераціях стане за абсолютною величиною меншою від заданої точності розрахунку:

$$\left| \frac{v_{i,N} - v_i}{v_i} \right| \leq \varepsilon. \quad (19)$$

Решта всіх невідомих змінних системи рівнянь визначається й уточнюється в ході ітераційного процесу.

Таблиця 1 – Інформаційна матриця математичного опису

Номер рівняння	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7	p_A	p_B	p_C	Порядок розв'язку
6											1
7											2
8											5
9											3
10											8
11											9
12											7
13											4
14											10
15											Виключено
16											6

Використання інформаційної матриці дозволило визначити наступний порядок обчислення невідомих системи:

$$p_A = p_1 - (v_1 / k_1)^2 \cdot \text{sign}(v_1);$$

$$v_2 = k_2 \cdot \sqrt{|p_A - p_2|} \cdot \text{sign}(p_A - p_2);$$

$$v_4 = k_4 \cdot \sqrt{|p_A - p_4|} \cdot \text{sign}(p_A - p_4)$$

$$v_3 = v_1 - v_2 - v_4;$$

$$p_B = p_A - (v_3 / k_3)^2 \cdot \text{sign}(v_3);$$

$$v_7 = v_3;$$

$$p_C = p_3 + (v_7 / k_7)^2 \cdot \text{sign}(v_7)$$

$$v_5 = k_5 \cdot \sqrt{|p_B - p_C|} \cdot \text{sign}(p_B - p_C);$$

$$v_6 = k_6 \cdot \sqrt{|p_B - p_C|} \cdot \text{sign}(p_B - p_C);$$

$$v_{1,N} = v_2 + v_4 + v_5 + v_6.$$

З урахуванням методу релаксації при невиконанні умови (19) нове початкове наближення v_1 визначається за формулою (18).

Вихідні дані:

Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв, конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,026 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,004 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_6 = 0,003 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$, $k_7 = 0,002 \text{ м}^{3,5/} \text{ кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, Па: $p_1=350\ 000$, $p_2=150\ 000$, $p_3=100\ 000$, $p_4=150\ 000$. Варійований тиск p_1 , діапазон зміни: $350\ 000 \div 550\ 000$ Па, крок $50\ 000$ Па.

Нижче наведено фрагмент документа Mathcad, що ілюструє розв'язання задачі.

Розрахунок гідравлічної системи

коефіцієнти пропускної здатності звужуючих пристроїв

$$k_1 := 0.009 \quad k_2 := 0.008 \quad k_3 := 0.005 \quad k_4 := 0.026$$

$$k_5 := 0.004 \quad k_6 := 0.003 \quad k_7 := 0.002$$

тиск на виході із системи

$$p_2 := 150000 \quad p_3 := 100000 \quad p_4 := 150000$$

точність розрахунку $\epsilon := 0.001$

коефіцієнт релаксації $R := 0.01$

```

vp(p1) := | v1 ← 1
           | for i ∈ 1.. 200
           |   pa ← p1 - (v1/k1)2 · sign(v1)
           |   v2 ← k2 · √|pa - p2| · sign(pa - p2)
           |   v4 ← k4 · √|pa - p4| · sign(pa - p4)
           |   v3 ← v1 - v2 - v4
           |   pb ← pa - (v3/k3)2 · sign(v3)
           |   v7 ← v3
           |   pc ← p3 + (v7/k7)2 · sign(v7)
           |   v5 ← k5 · √|pb - pc| · sign(pb - pc)
           |   v6 ← k6 · √|pb - pc| · sign(pb - pc)
           |   v1n ← v2 + v4 + v5 + v6
           |   break if |v1 - v1n| / v1 ≤ ε
           |   v1 ← v1 + R · (v1n - v1) otherwise
           | (0 0 0 0 0 0 0 0 0 0) if i = 200
           | (v1 v2 v3 v4 v5 v6 v7 pa pb pc)

```

тиск на вході в систему $p1 := 350000, 400000.. 550000$

витрати у гілках системи

$$v1(p1) := (vp(p1)^T)_0 \quad v2(p1) := (vp(p1)^T)_1$$

$$v3(p1) := (vp(p1)^T)_2 \quad v4(p1) := (vp(p1)^T)_3$$

$$v5(p1) := (vp(p1)^T)_4 \quad v6(p1) := (vp(p1)^T)_5$$

$$v7(p1) := (vp(p1)^T)_6$$

тиск у точках розгалужень

$$pa(p1) := (vp(p1)^T)_7 \quad pb(p1) := (vp(p1)^T)_8$$

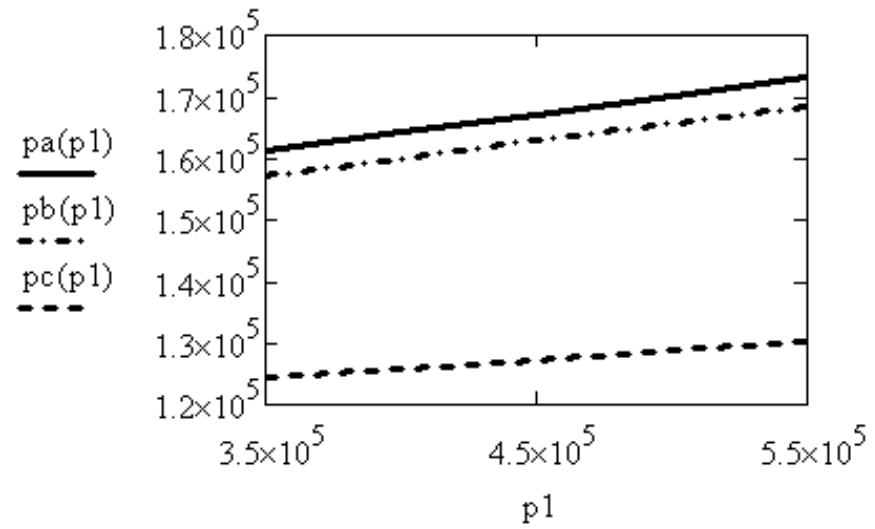
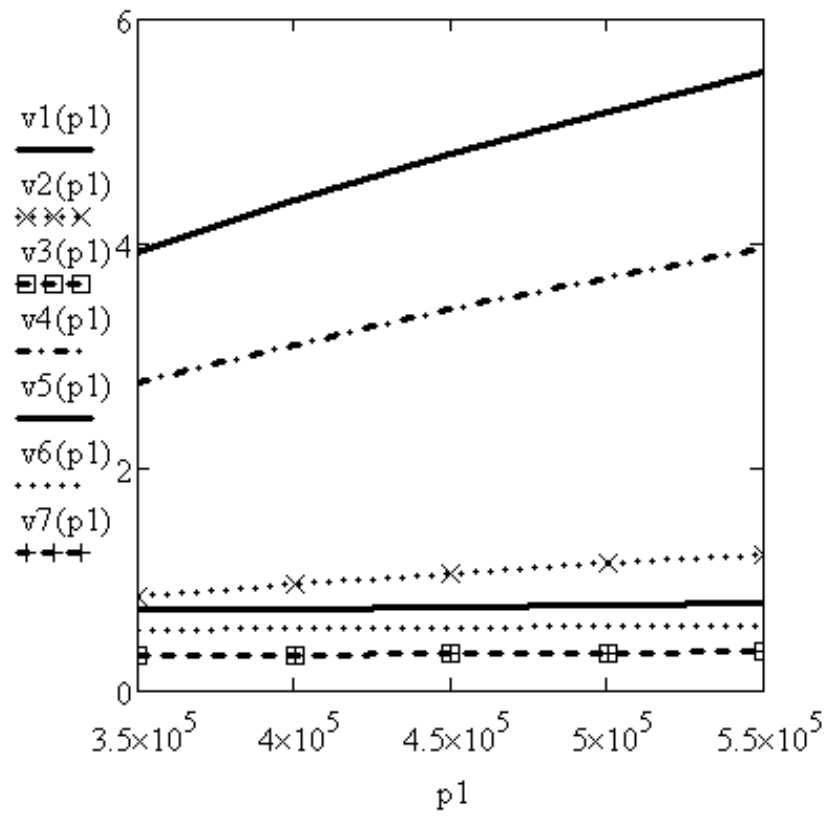
$$pc(p1) := (vp(p1)^T)_9$$

результати розрахунку

$v1(p1) =$	$v2(p1) =$	$v3(p1) =$	$v4(p1) =$
3.92	0.847	0.312	2.752
4.38	0.953	0.322	3.096
4.796	1.048	0.33	3.407
5.179	1.136	0.339	3.693
5.535	1.218	0.347	3.959

$v5(p1) =$	$v6(p1) =$	$v7(p1) =$
0.726	0.545	0.312
0.74	0.555	0.322
0.754	0.565	0.33
0.768	0.576	0.339
0.783	0.587	0.347

$pa(p1) =$	$pb(p1) =$	$pc(p1) =$
$1.612 \cdot 10^5$	$1.573 \cdot 10^5$	$1.243 \cdot 10^5$
$1.642 \cdot 10^5$	$1.6 \cdot 10^5$	$1.259 \cdot 10^5$
$1.672 \cdot 10^5$	$1.628 \cdot 10^5$	$1.273 \cdot 10^5$
$1.702 \cdot 10^5$	$1.656 \cdot 10^5$	$1.287 \cdot 10^5$
$1.732 \cdot 10^5$	$1.684 \cdot 10^5$	$1.301 \cdot 10^5$



Аналіз результатів

У досліджуваному діапазоні зміни p_1 найбільш істотний вплив зростання p_1 виявляє на збільшення витрати через звужуючі пристрої 1, 2 та 4 (приблизно, у 1,4 рази), суттєво менший ріст (в 1,08 – 1,12 рази) спостерігається через звужуючі пристрої 3, 5, 6 та 7. У точках розгалуження А, В, С гідравлічної системи із зростанням p_1 відбувається незначне збільшення тиску.

Контрольні запитання

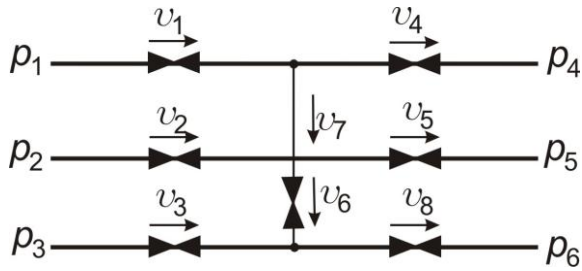
1. Складіть рівняння, що дозволяє розрахувати об'ємну витрату рідини через звужуючий пристрій.
2. Які типи кінцевих рівнянь і методи їх розв'язання Ви знаєте?
3. Викладіть сутність методу ітерацій, його переваги й недоліки.
4. Для чого служить інформаційна матриця? Які правила її побудови?
5. Що таке обчислювальний експеримент? Які в нього переваги перед натурним?
6. Для заданої викладачем гідравлічної системи складіть математичний опис і інформаційну матрицю.

Варіанти завдань

Побудувати й реалізувати на ЕОМ детерміновану математичну модель стаціонарної гідравлічної системи. Виконати обчислювальний експеримент по визначенню впливу одного з кінцевих тисків системи на витрати рідини в звужуючих пристроях і тиск у внутрішніх точках системи.

Варіанти індивідуальних завдань у вигляді гідравлічних схем і значення вихідних параметрів наведені нижче, де тиск p заданий у Па, а коефіцієнт пропускної спроможності звужуючого пристрою k заданий в $\text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$

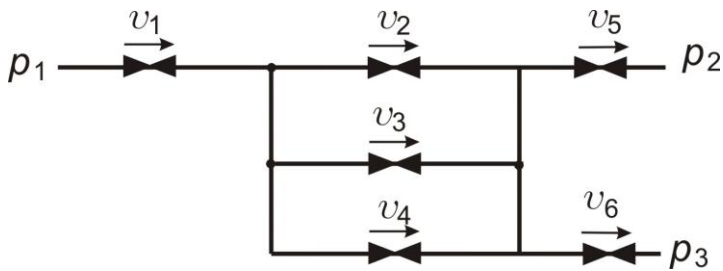
Варіант 1



$k_1 = 0,009$; $k_2 = 0,008$; $k_3 = 0,006$; $k_4 = 0,006$ $k_5 = 0,023$; $k_6 = 0,022$
 $k_7 = 0,024$; $p_2 = 220000$; $p_3 = 250000$; $p_4 = 100000$; $p_5 = 100000$; $p_6 = 100000$.

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни ,280000 ÷ 380000 крок зміни 20000 ;
 $r = 0,01$, $\varepsilon = 0,001$.

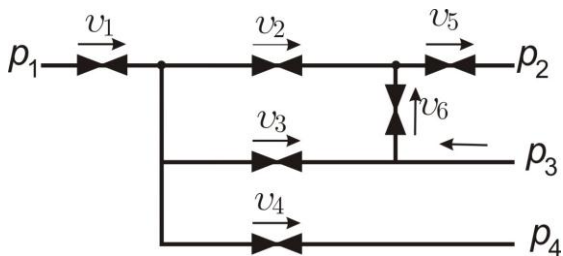
Варіант 2



$k_1 = 0,009$; $k_2 = 0,007$; $k_3 = 0,008$; $k_4 = 0,006$; $k_5 = 0,023$;
 $k_6 = 0,022$ $k_7 = 0,024$; $p_2 = 470000$; $p_3 = 200000$; $r = 0,01$; $\varepsilon = 0,001$.

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни 300000 ÷ 500000, крок зміни 50000 ;,.

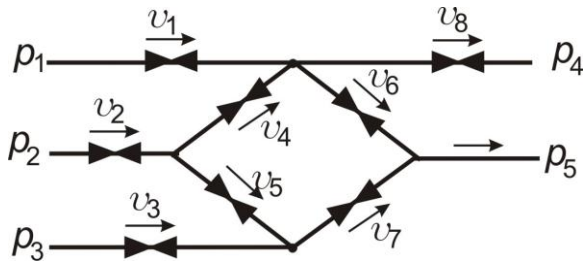
Варіант 3



$k_1 = 0,009$; $k_2 = 0,007$; $k_3 = 0,008$; $k_4 = 0,006$; $k_5 = 0,023$; $k_6 = 0,022$;
 $p_2 = 200000$; $p_3 = 240000$; $p_4 = 150000$;

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни 350000 ÷ 500000, крок зміни 50000 ;
 $r = 0,01$, $\varepsilon = 0,01$.

Варіант 4

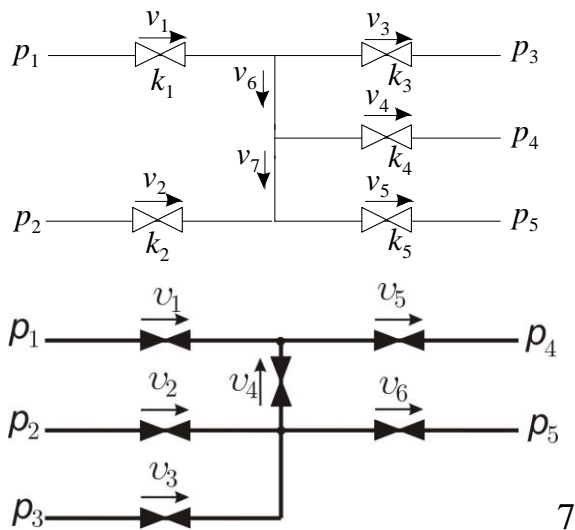


$k_1 = 0,017$; $k_2 = 0,025$; $k_3 = 0,026$; $k_4 = 0,043$ $k_5 = 0,005$; $k_6 = 0,004$;
 $k_7 = 0,024$; $k_8 = 0,001$; $p_2 = 250000$; $p_3 = 250000$; $p_4 = 150000$; $p_5 = 150000$.

Варіюваний тиск p_1 , діапазон зміни ,250000 ÷ 257000, крок зміни 1000;

$r = 0,01$, $\varepsilon = 0,01$.

Варіант 5



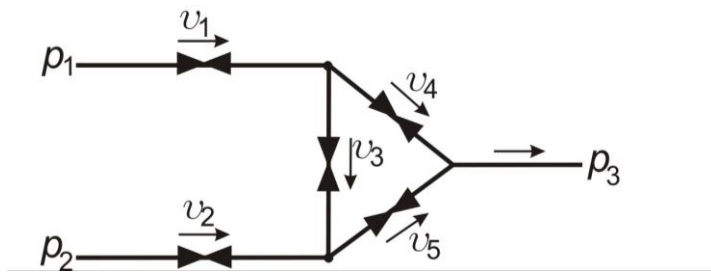
$k_1 = 0,009$; $k_2 = 0,007$; $k_3 = 0,008$; $k_4 = 0,006$; $k_5 = 0,005$;

$p_2 = 630000$; $p_3 = 170000$; $p_4 = 330000$; $p_5 = 190000$.

Варіюваний тиск p_1 , діапазон зміни 350000 ÷ 550000, крок зміни 50000;

$r = 0,01$, $\varepsilon = 0,01$.

Варіант 6

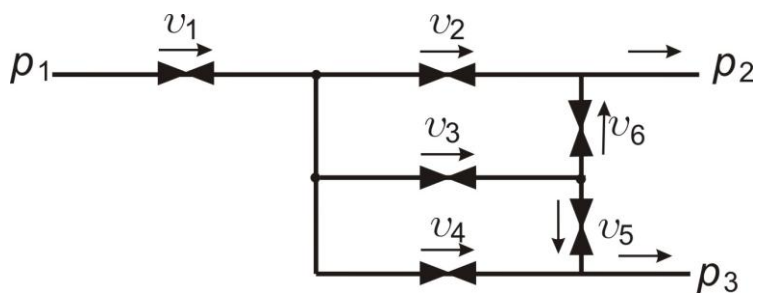


$$k_1 = 0,027; \quad k_2 = 0,025; \quad k_3 = 0,026; \quad k_4 = 0,023; \quad k_5 = 0,005;$$

$$p_2 = 450000; \quad p_3 = 150000. \quad r = 0,03, \quad \varepsilon = 0,01.$$

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни 300000 ÷ 500000, крок зміни 50000;

Варіант 7



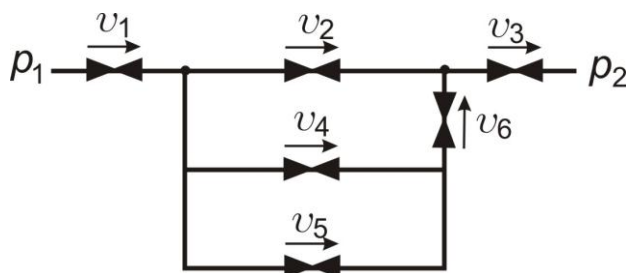
$$k_1 = 0,001; \quad k_2 = 0,002; \quad k_3 = 0,003; \quad k_4 = 0,004; \quad k_5 = 0,005; \quad k_6 = 0,006;$$

$$p_2 = 100000; \quad p_3 = 100000.$$

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни 200000 ÷ 400000 крок зміни 50000;

$$r = 0,001, \quad \varepsilon = 0,01.$$

Варіант 8

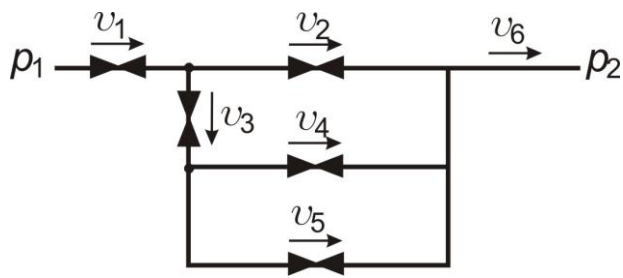


$$k_1 = 0,001; \quad k_2 = 0,002; \quad k_3 = 0,003; \quad k_4 = 0,004; \quad k_5 = 0,005; \quad k_6 = 0,006;$$

$$p_2 = 100000. \quad r = 0,001, \quad \varepsilon = 0,01.$$

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни 200000 ÷ 400000 крок зміни 50000;

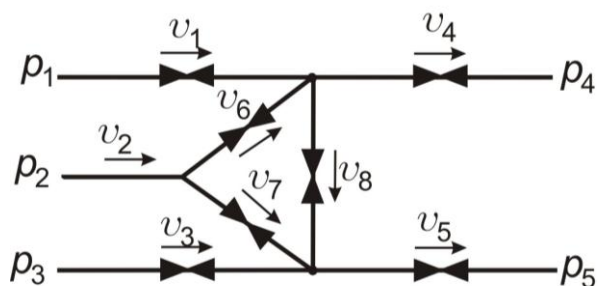
Варіант 9



$k_1 = 0,001$; $k_2 = 0,002$; $k_3 = 0,003$; $k_4 = 0,004$; $k_5 = 0,005$; $p_2 = 100000$.

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни $300000 \div 500000$, крок 50000 ; $r = 0,001$,
 $\varepsilon = 0,01$.

Варіант 10



$k_1 = 0,001$; $k_3 = 0,003$; $k_4 = 0,004$; $k_5 = 0,005$; $k_6 = 0,006$; $k_7 = 0,007$;

$k_8 = 0,002$; $p_2 = 250000$; $p_3 = 100000$; $p_4 = 150000$; $p_5 = 200000$.

Варійований тиск p_1 , діапазон зміни $250000 \div 450000$, крок зміни 50000 ;
 $r = 0,005$, $\varepsilon = 0,01$

Лабораторна робота Комп'ютерне моделювання гідравлічної системи з ємностями змінного об'єму

Ціль роботи – надбати навички математичного моделювання на ЕОМ об'єктів хімічної технології, що володіють властивостями до самовирівнювання

Постановка задачі. Побудувати математичну модель гідравлічної системи з ємностями відкритого та закритого типу, схема якої надана на (рис. 2), з метою вивчення динаміки перехідного процесу при порушенні рівноважного стану системи.

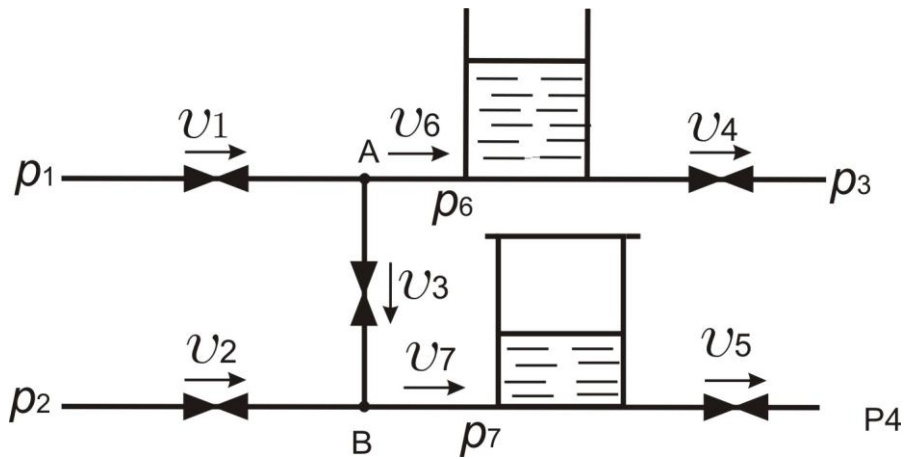


Рисунок 2 – Схема гідравлічної системи

Складання математичної моделі

Математична модель є деякою сукупністю математичних співвідношень, що відображають поведінку системи при порушенні рівноважного стану, тобто при зміні вхідних величин (за наявності збурювання). Найчастіше розглядається реакція системи на збурювання виду «стрибка» або «сходінки».

Розглянемо процедуру отримання математичної моделі для заданої системи, яка належить до класу об'єктів, що відрізняються самовирівнюванням.

Спрощені припущення:

1. Умови ізотермічні, $T = \text{const}$.
2. Хімічні або фазові перетворення в потоці відсутні.
3. Впливом гідравлічного опору трубопроводів на параметри системи можна знехтувати.

4. Рідина нестислива, $\rho = \text{const}$.

5. Площа перерізу ємності по висоті постійна, $F = \text{const}$.

Рівняння перехідного процесу в ємності із самовирівнюванням можна одержати в такий спосіб. Зміна рівня рідини в ємності визначається виразом

$$\frac{dH}{dt} = \frac{v^{\text{вх}} - v^{\text{вих}}}{F}, \quad (20)$$

з початковими умовами $t = t_0$; $H(t_0) = H_0$.

де $v^{\text{вх}}, v^{\text{вих}}$ – об’ємні витрати рідини на вході й на виході ємності відповідно, $\text{м}^3/\text{з}$; H – рівень рідини в ємності, м ; F – площа перерізу ємності, м^2 .

У свою чергу, витрата є функцією перепаду тиску під час переходу рідини через звужуючий пристрій, і тому з урахуванням прийнятих припущень можна записати:

$$v = k \cdot |\Delta p|^{0,5} \cdot \text{sign}(\Delta p), \quad (21)$$

де k – коефіцієнт пропускної спроможності звужуючого пристрою; Δp – падіння тиску рідини за наявності місцевого опору в потоці, Па .

Перепад тиску Δp , у свою чергу, не є постійним, тому що його величина в будь-який момент часу залежить від тиску над поверхнею рідини і від зміни рівня рідини в ємності. Вважаючи в першому наближенні цю залежність лінійною, за умови що тиск над рідиною дорівнює p_0 , гідростатичний тиск на дно ємності визначається як

$$p = p_0 + \rho g H.$$

Для відкритої ємності

$$p_6 = p_{01} + \rho g H_1, \quad (22)$$

де p_{01} – тиск над рівнем рідини у відкритій ємності, що дорівнює атмосферному тиску, Па ; ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$; g – прискорення сили ваги, $\text{м}^2/\text{с}$.

Для закритої ємності

$$p_7 = p_{02} + \rho g H_2. \quad (23)$$

Тиск над рівнем рідини в закритій ємності p_{02} визначається з рівняння стану

$$p V_r = \frac{m R T}{M}, \quad (24)$$

де p – тиск, Па; V_r – об’єм газу над рівнем рідини, м³; m – маса газу, кг; R – універсальна газова постійна, Дж/(моль·К); T – температура, К; M – молекулярна маса газу.

З рівняння стану (24)

$$p_{02} = \frac{m}{V_r} \frac{RT}{M}. \quad (25)$$

Об’єм газу над рівнем рідини визначається виразом

$$V_r = V_2 - H_2 F_2, \quad (26)$$

де V_2 – об’єм закритої ємності, м³; F_2 – площа поперечного перерізу закритої ємності, м²; H_2 – величина рівня рідини в закритій ємності, м.

Рівняння для розрахунку об’ємних витрат через звужуючі пристрої для даної гідравлічної системи, відповідно до виразу (21), мають вигляд

$$v_1 = k_1 \cdot \sqrt{|p_1 - p_A|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_A); \quad (27)$$

$$v_2 = k_2 \cdot \sqrt{|p_2 - p_B|} \cdot \text{sign}(p_2 - p_B); \quad (28)$$

$$v_3 = k_3 \cdot \sqrt{|p_A - p_B|} \cdot \text{sign}(p_A - p_B); \quad (29)$$

$$v_4 = k_4 \cdot \sqrt{|p_6 - p_3|} \cdot \text{sign}(p_6 - p_3); \quad (30)$$

$$v_5 = k_5 \cdot \sqrt{|p_7 - p_4|} \cdot \text{sign}(p_7 - p_4). \quad (31)$$

При складанні математичного опису враховується, що в місцях розгалуження трубопроводів виконується закон збереження маси, тобто кількість рідини, що втікає повинна дорівнювати кількості рідини що витікає:

$$v_1 = v_3 + v_6; \quad (32)$$

$$v_2 + v_3 = v_7. \quad (33)$$

З урахуванням прийнятих припущень, впливом гідравлічного опору трубопроводів на параметри системи можна знехтувати. Тоді величину тиску в точках розгалуження системи можна прийняти такою, що дорівнює величині тиску рівня рідини у відповідній ємності:

$$p_A = p_6 \quad p_B = p_7 \quad (34)$$

Маса газу над рівнем рідини в закритій ємності визначається залежністю: $m = \rho_{\Gamma}(V_2 - F_2 H_{2,0})$, де ρ_{Γ} – густина газу, кг/м³, $H_{2,0}$ – початкова величина рівня рідини в закритій ємності, м.

Математичний опис гідравлічної системи, наведеної на рис. 2, відповідно до виразів (20), (22), (23), а також системи рівнянь (25) – (33) з урахуванням (34), набуде вигляду:

$$\begin{aligned} m &= \rho_{\Gamma}(V_2 - F_2 H_{2,0}); \\ p_6 &= p_{01} + \rho g H_1; \\ p_{02} &= \frac{m}{(V_2 - H_2 F_2)} \frac{RT}{M}; \\ p_7 &= p_{02} + \rho g H_2; \\ v_1 &= k_1 \cdot \sqrt{|p_1 - p_6|} \cdot \text{sign}(p_1 - p_6); \\ v_2 &= k_2 \cdot \sqrt{|p_2 - p_7|} \cdot \text{sign}(p_2 - p_7); \\ v_3 &= k_3 \cdot \sqrt{|p_6 - p_7|} \cdot \text{sign}(p_6 - p_7); \\ v_4 &= k_4 \cdot \sqrt{|p_6 - p_3|} \cdot \text{sign}(p_6 - p_3); \\ v_5 &= k_5 \cdot \sqrt{|p_7 - p_4|} \cdot \text{sign}(p_7 - p_4); \\ v_1 &= v_3 + v_6; \\ v_2 + v_3 &= v_7; \\ \frac{dH_1}{dt} &= \frac{v_6 - v_4}{F_1}; \quad \frac{dH_2}{dt} = \frac{v_7 - v_5}{F_2}; \end{aligned} \quad (35)$$

з початковими умовами $t = t_0$; $H_1(t_0) = H_{1,0}$; $H_2(t_0) = H_{2,0}$.

Система (35) описує перехідний процес при порушенні рівноважного стану. Новий стаціонарний стан наступає за умов

$$\left| \frac{H_1(t_i) - H_1(t_{i-1})}{H_1(t_i)} \right| < \varepsilon \wedge \left| \frac{H_2(t_i) - H_2(t_{i-1})}{H_2(t_i)} \right| < \varepsilon, \quad (36)$$

де $H_1(t_{i-1}), H_2(t_{i-1}), H_1(t_i), H_2(t_i)$ – величина рівня рідини в ємностях в попередній і поточний момент часу, ε – точність розрахунку.

Математичний опис гідравлічної системи включає звичайні диференціальні рівняння першого порядку. При відомих початкових умовах ці рівняння можуть бути розв’язані методом Ейлера.

Метод Ейлера – найпростіший метод першого порядку для чисельного інтегрування систем диференціальних рівнянь

$$\frac{d y_j}{d x} = f(x, y_j)$$

з початковими умовами $x = x_0; \quad y_j(x_0) = y_{j,0}$,

де j – номер диференціального рівняння.

Метод реалізується за такою рекурентною формулою:

$$y_{j,i} = y_{j,i-1} + h \cdot f_j(x_{i-1}, y_{j,i-1}),$$

де $y_{j,i}$ – розв’язок j -го диференціального рівняння в поточній x_i -й точці; $y_{j,i-1}$ – розв’язок j -го диференційного рівняння в попередній x_{i-1} -ій точці; h – крок інтегрування (збільшення змінної x); $f_j(x_{i-1}, y_{j,i-1})$ – значення правої частини j -го диференційного рівняння в точці $x_{i-1}, y_{j,i-1}$.

Алгоритм розв’язання системи рівнянь (35) наступний: за початковими значеннями параметрів $H_{1,0}; H_{2,0}$ розраховують значення всіх змінних системи у початковому стані; далі за рекурентною формулою метода Ейлера розв’язують диференційні рівняння й обчислюють значення $H_{1,1}; H_{2,1}$ в наступний момент часу (в новій точці розрахунку), потім усіх інших параметрів в наступний момент часу. Циклічний процес розрахунку продовжується до виходу системи на стаціонарний режим (до виконання умови (36)).

Рекурентна формула метода Ейлера для розв’язання диференційних

рівнянь $\frac{d H_1}{d t} = \frac{v_6 - v_4}{F_1}; \quad \frac{d H_2}{d t} = \frac{v_7 - v_5}{F_2}$ має наступний вигляд:

$$H_{1,i} = H_{1,i-1} + \frac{v_{6,i-1} - v_{4,i-1}}{F_1} \Delta t$$

$$H_{2,i} = H_{2,i-1} + \frac{v_{7,i-1} - v_{5,i-1}}{F_2} \Delta t$$

Вихідні дані:

Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,026 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,004 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=150\,000 \text{ Па}$, $p_2=450\,000 \text{ Па}$, $p_3=100\,000 \text{ Па}$, $p_4=150\,000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4 \text{ м}^2$, $F_2 = 5 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_1 = 5 \text{ м}$, H

Нижче наведено фрагмент документа Mathcad, що ілюструє розв'язання задачі.

Розрахунок гідравлічної системи з ємностями
площі поперечного перерізу ємностей, м²
F1 := 4 F2 := 5
початковий рівень рідини в ємностях, м
H1 := 5 H2 := 4
тиск над рівнем рідини у відкритій ємності, Па p01 := 10⁵
об'єм закритої ємності, м³ V2 := 25
температура газу, К T := 300
універсальна газова постійна, кДж/кмоль К R := 8310
молекулярна вага газу M := 29
густини рідини й газу, кг/м³ ρр := 10³ ρг := 1.3
коефіцієнти пропускної здатності звужуючих пристроїв, м^{3,5}/кг^{0,5}
k1 := 0.009 k2 := 0.008 k3 := 0.005 k4 := 0.026 k5 := 0.004
тиск на вході в систему і на виході із системи
p1 := 150000 p2 := 450000 p3 := 100000 p4 := 150000
точність розрахунку ε := 0.0001
крок інтегрування Δt := 0.1


```

vp(h1 ,h2) := | H10 ← h1
                H20 ← h2
                t0 ← 0
                m ← (V2 - H20·F2)·ρr
                for i ∈ 1.. 1000
                    | p6i-1 ← p01 + ρp·9.8·H1i-1
                    | p02i-1 ← m· $\frac{R \cdot T}{(V2 - H2_{i-1} \cdot F2) \cdot M}$ 
                    | p7i-1 ← p02i-1 + ρp·9.8·H2i-1
                    | v1i-1 ← k1· $\sqrt{|p1 - p6_{i-1}|}$ ·sign(p1 - p6i-1)
                    | v2i-1 ← k2· $\sqrt{|p2 - p7_{i-1}|}$ ·sign(p2 - p7i-1)
                    | v3i-1 ← k3· $\sqrt{|p6_{i-1} - p7_{i-1}|}$ ·sign(p6i-1 - p7i-1)
                    | v6i-1 ← v1i-1 - v3i-1
                    | v7i-1 ← v3i-1 + v2i-1
                    | v4i-1 ← k4· $\sqrt{|p6_{i-1} - p3|}$ ·sign(p6i-1 - p3)
                    | v5i-1 ← k5· $\sqrt{|p7_{i-1} - p4|}$ ·sign(p7i-1 - p4)
                    | H1i ← H1i-1 +  $\frac{v6_{i-1} - v4_{i-1}}{F1} \cdot \Delta t$ 
                    | H2i ← H2i-1 +  $\frac{v7_{i-1} - v5_{i-1}}{F2} \cdot \Delta t$ 
                    | ti ← ti-1 + Δt
                    | break if  $\left( \left| \frac{H1_i - H1_{i-1}}{H1_i} \right| < \epsilon \wedge \left| \frac{H2_i - H2_{i-1}}{H2_i} \right| < \epsilon \right)$ 
                (v1 v2 v3 v4 v5 v6 v7 H1 H2 t p6 p7)

```

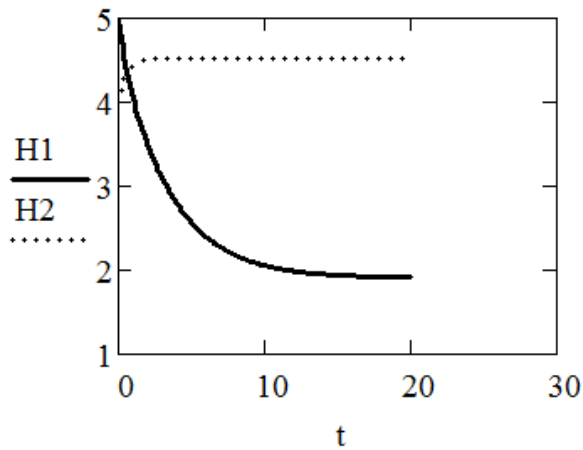
h1 := 5

h2 := 4

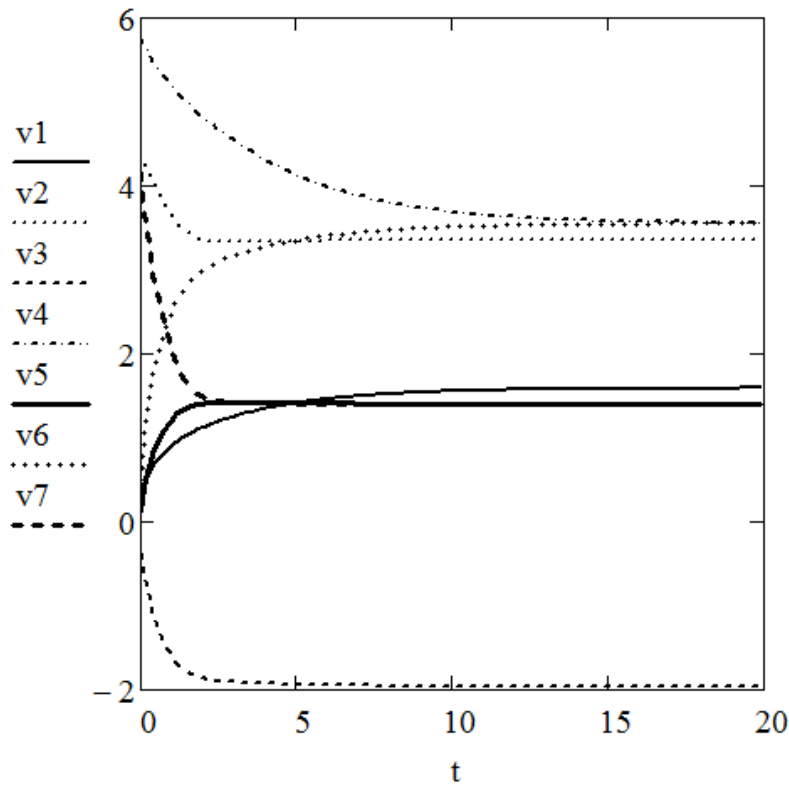
результати розв'язання

$$\begin{aligned}
 v1 &:= (vp(h1, h2)^T)_0 & v2 &:= (vp(h1, h2)^T)_1 & v3 &:= (vp(h1, h2)^T)_2 \\
 v4 &:= (vp(h1, h2)^T)_3 & v5 &:= (vp(h1, h2)^T)_4 & v6 &:= (vp(h1, h2)^T)_5 \\
 v7 &:= (vp(h1, h2)^T)_6 & H2 &:= (vp(h1, h2)^T)_8 & H1 &:= (vp(h1, h2)^T)_7 \\
 t &:= (vp(h1, h2)^T)_9 & p6 &:= (vp(h1, h2)^T)_{10} & p7 &:= (vp(h1, h2)^T)_{11}
 \end{aligned}$$

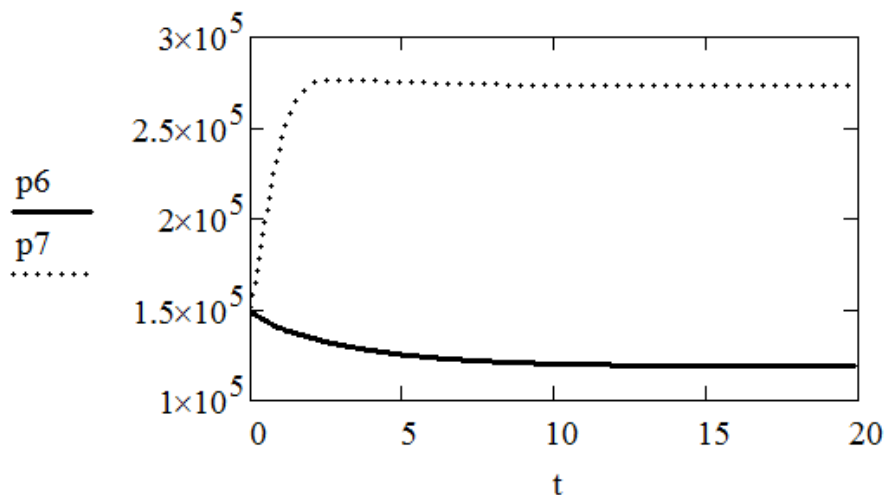
зміна рівня рідини в ємностях



зміна витрат у гілках системи



зміна тиску в точках розгалужень



визначення часу виходу системи на стаціонарний режим

$\text{nom} := \text{last}(t)$ $t_{\text{nom}} = 20.4$

Аналіз результатів

Час виходу системи на стаціонарний режим складає 20,4сек. Рівень рідини у відкритій ємності зменшується з 5м до 1,915м, в той час як у герметичній ємності рівень збільшується з 4м до 4,511м. Графіки, що побудовані по розрахункам програми, що розроблена, показують динаміку перехідного процесу та значення параметрів системи у новому стаціонарному стані. Слід звернути увагу на від'ємний знак витрати v_3 через звужуючий пристрій 3. Це означає, що напрям руху потоку рідини через пристрій 3 протилежний зазначеному.

Контрольні запитання

1. Складіть рівняння, що дозволяє розрахувати об'ємну витрату рідини через звужуючий пристрій.
2. Сформулюйте спрощені припущення при моделюванні гідравлічної системи з ємностями.
3. Викладіть сутність методу Ейлера, його переваги й недоліки, рекурентну формулу.

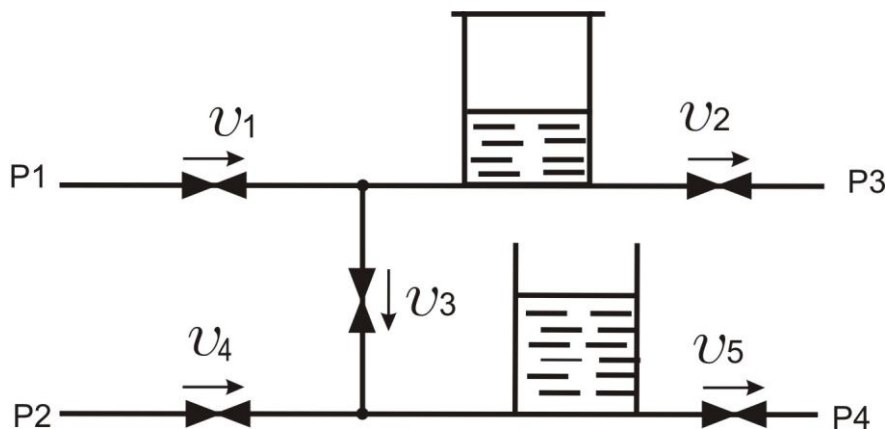
4. Визначте умови переходу системи при порушенні рівноважного стану до нового стаціонарного режиму.
5. Як визначити час виходу системи на стаціонарний режим.
6. Для заданої викладачем гідравлічної системи з ємностями відкритого та закритого типу складіть математичний опис і визначте алгоритм його розв'язання.

Варіанти завдань

Побудувати й реалізувати на ЕОМ математичну модель гідравлічної системи наданої схеми. Визначити зміни параметрів системи під час перехідного процесу та час виходу на новий стаціонарний режим.

Варіант 1.

Схема гідравлічної системи:



Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,036 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,024 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

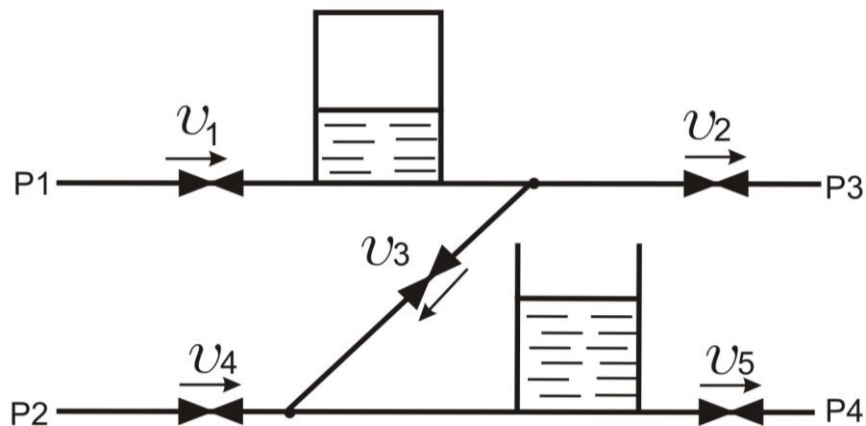
Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=400\ 000 \text{ Па}$, $p_2=150\ 000 \text{ Па}$, $p_3=150\ 000 \text{ Па}$, $p_4=100\ 000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4 \text{ м}^2$, $F_2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 4 \text{ м}$, $H_{\text{універсальна}}$ газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності

$p_0 = 10^5$ Па; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000$ кг/м³, $\rho_G=1,3$ кг/м³; прискорення сили ваги $g=9,8$ м²/с; точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 2.

Схема гідравлічної системи



Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009$ м^{3,5}/кг^{0,5}, $k_2 = 0,006$ м^{3,5}/кг^{0,5}, $k_3 = 0,005$ м^{3,5}/кг^{0,5}, $k_4 = 0,016$ м^{3,5}/кг^{0,5}, $k_5 = 0,024$ м^{3,5}/кг^{0,5}.

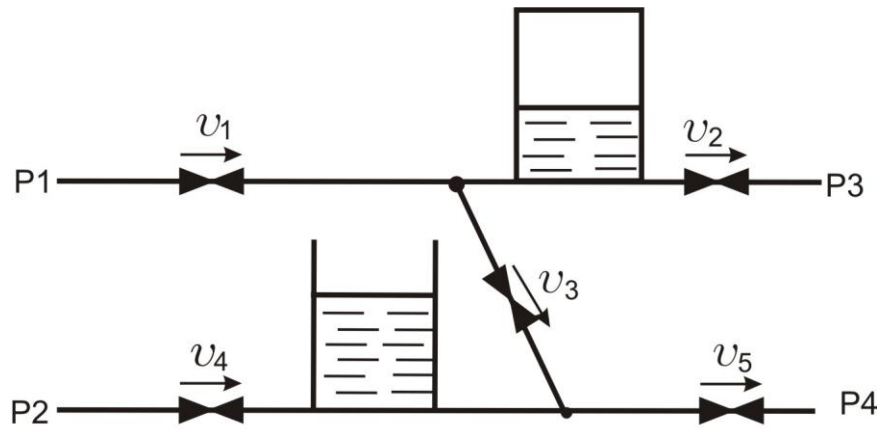
Базові значення тисків на входах і виходах системи, $p_1=450\,000$ Па, $p_2=150\,000$ Па, $p_3=150\,000$ Па, $p_4=100\,000$ Па.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 5$ м², $F_2 = 4$ м²; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 4$ м, $H_{універсальна}$ газова постійна $R=8310$ кДж/кмоль К; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності

$p_0 = 10^5$ Па; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000$ кг/м³, $\rho_G=1,3$ кг/м³; прискорення сили ваги $g=9,8$ м²/с, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 3.

Схема гідравлічної системи:



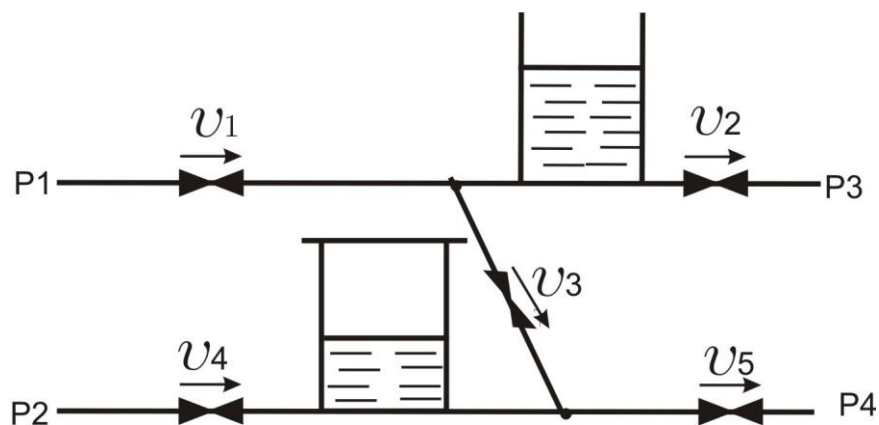
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,016 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,024 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=450\,000 \text{ Па}$, $p_2=150\,000 \text{ Па}$, $p_3=150\,000 \text{ Па}$, $p_4=100\,000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 5 \text{ м}^2$, $F_2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 4 \text{ м}$, $H_{\text{універсальна}}$ газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p_{02}=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_{\Gamma}=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\epsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 4.

Схема гідравлічної системи:



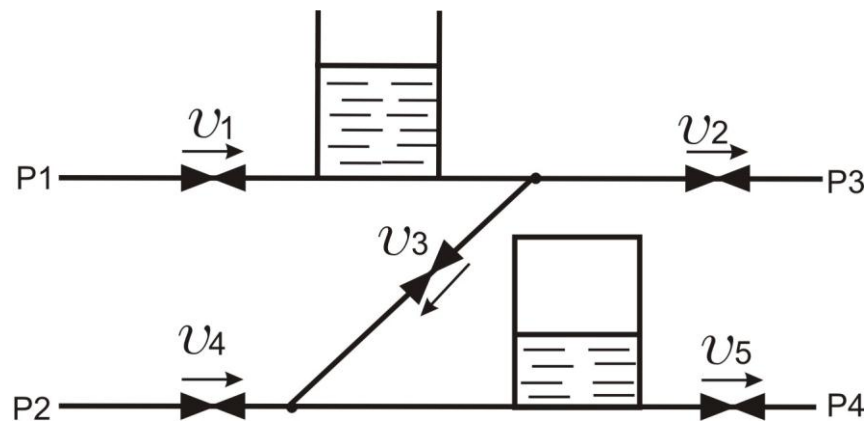
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,004 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=150\ 000\ \text{Па}$,
 $p_2=340\ 000\ \text{Па}$, $p_3=100\ 000\ \text{Па}$, $p_4=150\ 000\ \text{Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4\ \text{м}^2$, $F_2 = 5\ \text{м}^2$;
 початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 5\ \text{м}$, H універсальна газова
 постійна $R=8310\ \text{кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності
 $p_{02}=10^5\ \text{Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу
 $\rho_P=1000\ \text{кг/м}^3$, $\rho_G=1,3\ \text{кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8\ \text{м}^2/\text{с}$, точність
 розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 5.

Схема гідравлічної системи



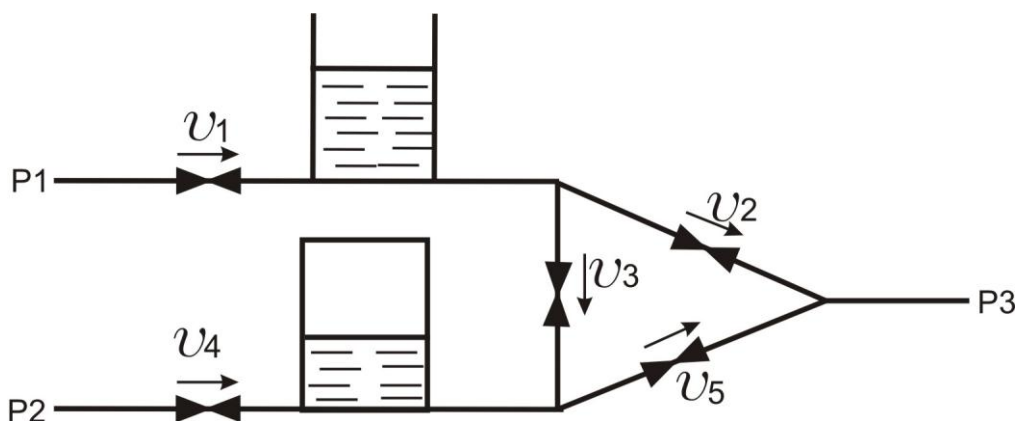
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв
 конструкційні параметри: $k_1 = 0,009\ \text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008\ \text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$,
 $k_3 = 0,005\ \text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,006\ \text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,004\ \text{м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=150\ 000\ \text{Па}$,
 $p_2=340\ 000\ \text{Па}$, $p_3=100\ 000\ \text{Па}$, $p_4=150\ 000\ \text{Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4\ \text{м}^2$, $F_2 = 5\ \text{м}^2$;
 початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 5\ \text{м}$, H універсальна газова
 постійна $R=8310\ \text{кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності
 $p_{02}=10^5\ \text{Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу
 $\rho_P=1000\ \text{кг/м}^3$, $\rho_G=1,3\ \text{кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8\ \text{м}^2/\text{с}$, точність
 розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 6.

Схема гідравлічної системи:



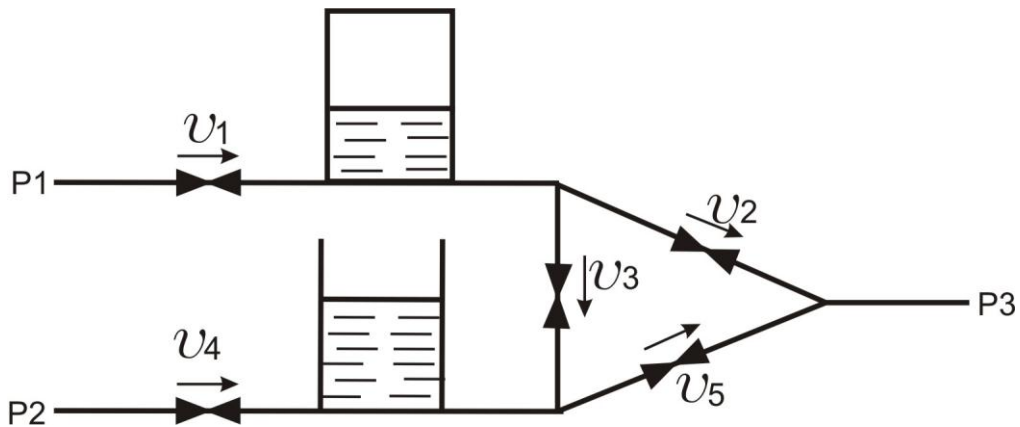
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,004 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=150\ 000 \text{ Па}$, $p_2=340\ 000 \text{ Па}$, $p_3=100\ 000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4 \text{ м}^2$, $F_2 = 5 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 5 \text{ м}$, H універсальна газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p_{02}=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_\Gamma=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 7.

Схема гідравлічної системи:



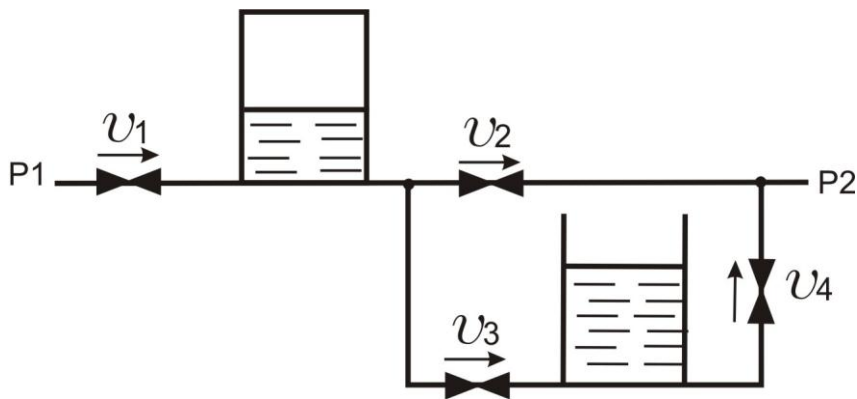
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_5 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=450\ 000 \text{ Па}$, $p_2=150\ 000 \text{ Па}$, $p_3=100\ 000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 5 \text{ м}^2$, $F_2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 4 \text{ м}$, $H_{\text{універсальна}}$ газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p_{02}=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_G=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 8.

Схема гідравлічної системи:



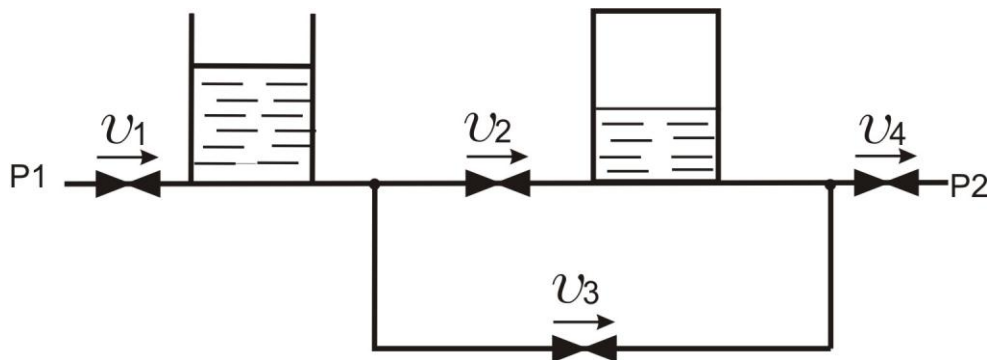
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,008 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,026 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=450\ 000 \text{ Па}$, $p_2=450\ 000 \text{ Па}$, $p_3=100\ 000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 5 \text{ м}^2$, $F_2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 4 \text{ м}$, H універсальна газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p_{02}=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_\Gamma=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 9.

Схема гідравлічної системи:



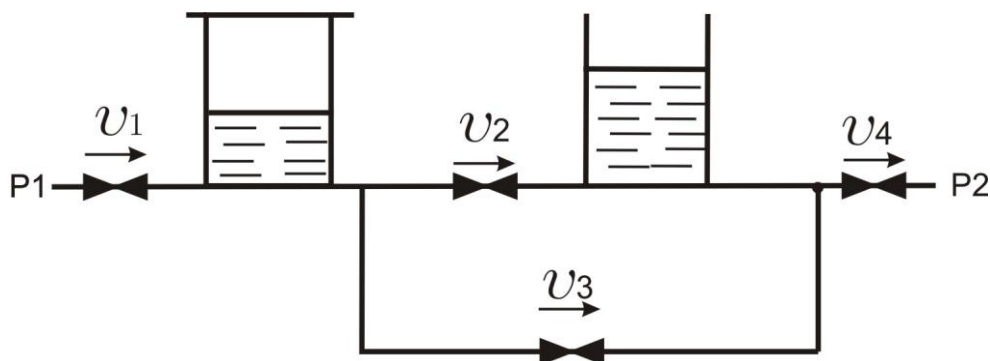
Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k_1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_2 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k_4 = 0,026 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, : $p_1=250\ 000 \text{ Па}$, $p_2=100\ 000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перерізу ємностей $F_1 = 4 \text{ м}^2$, $F_2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H_{10} = 5 \text{ м}$, H універсальна газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p_{01}=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho_P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_\Gamma=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Варіант 10.

Схема гідравлічної системи:



Коефіцієнти пропускної спроможності звужуючих пристроїв конструкційні параметри: $k1 = 0,009 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k2 = 0,006 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k3 = 0,005 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$, $k4 = 0,026 \text{ м}^{3,5}/\text{кг}^{0,5}$.

Базові значення тисків на входах і виходах системи, $p1=250\,000 \text{ Па}$, $p2=100\,000 \text{ Па}$.

Площі поперечного перетину ємностей $F1 = 4 \text{ м}^2$, $F2 = 4 \text{ м}^2$; початковий рівень рідини в ємностях $H1_0 = 5 \text{ м}$, H універсальна газова постійна $R=8310 \text{ кДж/кмоль К}$; тиск над рівнем рідини у відкритій ємності $p02=10^5 \text{ Па}$; молекулярна вага газу $M=29$; густини рідини та газу $\rho P=1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho G=1,3 \text{ кг/м}^3$; прискорення сили ваги $g=9,8 \text{ м}^2/\text{с}$, точність розрахунку $\varepsilon=0,0001$; крок розрахунку $\Delta t=0,1$.

Список літератури

1. *Товажнянський Л. Л.* Комп'ютерне моделювання у хімічній технології: Навчальний посібник / *Л. Л. Товажнянський, Т. Г. Бабак, О. О. Голубкіна* [та ін.] – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 606 с.
2. *Товажнянський Л. Л.* Лабораторний практикум «Комп'ютерні технології в інженерній хімії»: Учебное пособие / *Л. Л. Товажнянський, Т. Г. Бабак, В. А. Коцаренко* [и др.] – Харков: НТУ «ХПІ», 2002. – 364 с.

Навчальне видання

Бабак Тетяна Геннадіївна

Голубкіна О.О.

Пономаренко Є.Д.

Соловей Л.В.

МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ СИСТЕМ У СТАЦІОНАРНОМУ ТА
НЕСТАЦІОНАРНОМУ РЕЖИМАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ

Методичні вказівки до лабораторних робіт за курсами математичного та
куомп'ютерного моделювання для студентів хімічних спеціальностей
усіх форм навчання.

Українською мовою

Відповідальний за випуск

Роботу до друку рекомендував

В авторській редакції

План 2017 р., поз. 86

Підп.до друку 2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний.

Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк.

Наклад 50 прим. Зам. № Ціна договірна

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

Друкарня НТУ «ХП». 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21