

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ХАРЧОВИХ
ТЕХНОЛОГІЙ

ГІДРОСТРУМИННІ ТА ГІДРОМЕХАНІЧНІ
СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Монографія

За редакцією доктора технічних наук,
професора Кулінченка В.Р.

Київ, Фенікс 2013

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
Розділ 1. ПРИСТРОЇ УПРАВЛІННЯ ГІДРАВЛІЧНОЮ СТРУМЕНЕВОЮ ТЕХНІКОЮ.....	5
1.1. Тип струменевих пристроїв і особливості робочого процесу в них.....	5
1.2. Статичні характеристики струменевих керівних пристроїв.....	24
1.3. Динамічні властивості гідравлічних струминних пристроїв.....	37
Розділ 2. ОСНОВИ РАЦІОНАЛЬНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПРИСТРОЇВ ГІДРАВЛІЧНОЇ СТРУМЕНЕВОЇ ТЕХНІКИ.....	43
2.1. Рекомендації для розрахунку і вибору параметрів струминних пристроїв.....	43
2.2. Вплив експлуатаційних чинників на роботу струменевих пристроїв.....	64
2.3. Особливості технології виготовлення гідравлічних струменевих пристроїв.....	70
Розділ 3. ПРИСТРОЇ І СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ І РЕГУЛЮВАННЯ НА БАЗІ СТРУМЕНЕВОЇ ТЕХНІКИ.....	77
3.1. Регулятори подачі гідронасосів.....	77
3.2. Стежачий гідропідсилювач із струменевим розподільником.....	80
3.3. Струменевий стабілізатор швидкості гідроприводу.....	82
3.4. Гідромеханічний пристрій для перетворення сигналів, що мають зворотний зв'язок по навантаженню, на основі струменевого силового датчика.....	84
3.5. Електрогідравлічний підсилювач з відхилюваним струменем.....	86
3.6. Гідравлічний сервопривід із струменевим керуванням.....	89
Розділ 4. СТРУМЕНЕВІ ГЕНЕРАТОРИ ВИМУШЕНИХ	

КОЛИВАНЬ ТИСКУ.....	91
4.1. Генератори коливань тиску з відхиленням струменя дефлектором.....	91
4.2. Генератор коливань тиску із зміною взаємного розташування сопел.....	95
Розділ 5. СТРУМЕНЕВІ ГЕНЕРАТОРИ АВТОКОЛИВАНЬ І ГЕНЕРАТОРИ ШУМОВИХ ПУЛЬСАЦІЙ ТИСКУ.....	103
5.1. Низькочастотні генератори автоколивань.....	103
5.2. Струменеві гідравлічні пристрої для генерування високочастотних коливань.....	108
5.3. Струменеві генератори нерегулярних коливань тиску.....	112
Розділ 6. ПЕРСПЕКТИВНІ ПРИСТРОЇ СИСТЕМИ ПРОМИСЛОВОЇ ГІДРАВЛІКИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЕЛЕМЕНТІВ СТРУМЕНЕВОЇ ТЕХНІКИ.....	118
6.1. Струменеві пристрої для роботи в агресивних, токсичних і радіоактивних середовищах.....	118
6.2. Гідростатичний струменевий датчик малих кутових швидкостей.....	120
6.3. Система дистанційного керування на основі струменевих гідравлічних елементів.....	122
6.4. Струменеві датчики кутових і лінійних прискорень рухомих об'єктів.....	124
6.5. Струменевий датчик юзу системи гальмування коліс.....	127
Розділ 7. ГІДРОАПАРАТУРА.....	130
7.1. Спрямовуючі гідроапарати.....	130
7.2. Секційні гідророзподільники на $p_n = 16$ МПа.....	133
7.3. Секційні гідророзподільники на $p_n = 25$ МПа.....	139
7.4. Моноблочні гідророзподільники на $p_n = 32$ МПа.....	142
7.5. Блоки гідравлічного керування.....	150
7.6. Блоки електрогідравлічного керування.....	156
Розділ 8. СПРЯМОВУЮЧІ І РЕГУЛЮВАЛЬНІ ГІДРОАПАРАТИ.....	159

8.1. Кранові гідророзподільники (крани керування).....	159
8.2. Зворотні клапани.....	161
8.3. Гідравлічні замки.....	164
Розділ 9. РЕГУЛЮВАЛЬНА ЗОЛОТНИКОВА	
ГІДРОАПАРАТУРА.....	167
9.1. Гідроклапани тиску.....	167
9.2. Запобіжні клапани прямої дії.....	172
9.3. Запобіжні клапани непрямої дії.....	175
9.4. Підживлювальні і переливні клапана	181
9.5. Редукційні клапана.....	182
9.6. Регулятор тиску ПГ57-62 для зрівноважування	
циліндрів.....	186
9.7. Клапани зусилля затиску ПГ57-72 і ЕПГ57-72.....	188
Розділ 10. ДРОСЕЛЬНІ РЕГУЛЯТОРИ ПОТОКУ.....	191
10.1. Загальні положення.....	191
10.2. Дроселі ПГ77-1.....	192
10.3. Регулятори потоку.....	193
10.4. Гальмівні клапана.....	207
Розділ 11. ГІДРОПАНЕЛІ.....	211
11.1. Загальні дані.....	211
11.2. Розподільні гідропанелі.....	212
Розділ 12. МОДУЛЬНА ГІДРОАПАРАТУРА.....	224
12.1. Основні положення.....	224
12.2. Елементи модульної гідроапаратури.....	226
Розділ 13. ПРОГРАМНИЙ І ГІДРОПРИВІД СЛІДЖЕННЯ.....	229
13.1. Дросельні гідророзподільники.....	229
13.2. Керівні золотники Г61-41 для систем слідження.....	231
13.3. Дросельні гідророзподільники Г68-1 з електричним	
керуванням.....	235
13.4. Електрогідравлічні підсилювачі потужності УГЕ8 і	
УЕ8.....	239

Розділ 14. ЕЛЕКТРОГІДРАВЛІЧНІ КРОКОВІ ПРИВОДИ.....	241
14.1. Основні положення.....	241
14.2. Електрогідравлічні крокові приводи ЕМГ18-1.....	242
14.3. Електрогідравлічний кроковий привід Е32Г18-2.....	244
14.4. Електрогідравлічні крокові приводи 1,5-2Г18-3.....	247
14.5. Електрогідравлічні приводи слідження СП.....	249
14.6. Приводи електрогідравлічні ПЕГС.....	249
Розділ 15. ДОПОМІЖНІ ЕЛЕМЕНТИ ГІДРОПРИВОДІВ.....	253
15.1. Гідробаки для робочої рідини.....	253
15.2. Сапуни гідробаків.....	253
Розділ 16. ФІЛЬТРИ.....	255
16.1. Основні положення.....	255
16.2. Фільтри напірних ліній.....	256
16.3. Фільтри всмоктувальних ліній.....	258
16.4. Фільтри зливних ліній.....	260
16.5. Заливні фільтри.....	265
Розділ 17. АПАРАТИ І ПРИЛАДИ ДЛЯ КОНТРОЛЮ ТИСКУ.....	267
17.1. Реле тиску.....	267
17.2. Манометри.....	270
17.3. Золотник включення манометра.....	279
Розділ 18. ГІДРОПРИВОДИ.....	281
18.1. Загальні поняття.....	281
18.2. Принципові схеми гідроприводів.....	282
18.3. Золотникові розподільники.....	284
18.4. Клапани.....	294
18.5. Діафрагми.....	298
18.6. Капіляри.....	302
18.7. Гідравлічні силові циліндри.....	302
18.8. Кулькові замки силових циліндрів.....	311
18.9. Пристрої для випуску повітря.....	313
Розділ 19. ГІДРОДВИГУНИ.....	314
19.1. Загальні дані.....	314

19.2. Гідродвигуни аксіально-поршневі Г15-2...Н.....	315
19.3. Гідродвигуни аксіально-поршневі Г15-2...М.....	316
19.4. Гідродвигуни пластинчасті Г16-1...М.....	318
Розділ 20. СПРЯМОВУЮЧА ГІДРОАПАРАТУРА.....	321
20.1. Загальні дані.....	321
20.2. Класифікація гідророзподільників.....	322
20.3. Протікання масла і втрати тиску.....	324
20.4. Гідророзподільники з ручним керуванням Г (ПГ) 74-2...	326
20.5. Гідророзподільники з гідравлічним керуванням	
Г (ПГ) 72-3.....	327
20.6. Гідророзподільники з електричним керуванням	
ПГ73-1.....	328
20.7. Гідророзподільники з кулачковим керуванням	
ПГ74-1.....	329
20.8. Гідророзподільники з електрогідравлічним керуванням	
ПГ73-2.....	330
20.9. Гідророзподільники типів В і РПГ73-11, ВПГ73-12, ВПГ73-24, і ВПГ73-25 з пневматичним керуванням.....	331
20.10. Розподільники Р102.....	334
20.11. Гідророзподільники В16.....	334
20.12. Гідророзподільники типу Р.....	337
20.13. Гідроциліндри.....	339
Додатки.....	341
Література.....	345

ПЕРЕДМОВА

Підвищення технічного рівня продукції і доведення його до рівня кращих світових зразків є одним з ключових завдань, поставлених перед промисловістю. Важливу роль в рішенні цієї задачі грає підвищення надійності елементної бази засобів гідроавтоматики. Значно підвищити її надійність дозволяє застосування пристроїв струменевої техніки, принцип дії яких заснований на ефектах взаємодії потоків рідини чи газу між собою або з твердими стінками.

Пристрої гідравлічної струменевої техніки не мають замкнутих об'ємів рідини і володіють властивостями односторонньої провідності. Включення їх в гідросистему різко зменшує вірогідність виникнення гідроударів, що підвищує її надійність і довговічність. Наявність постійної циркуляції робочої рідини покращує температурний режим гідросистеми, сприяє виділенню і видаленню з рідини нерозчинного повітря. Відсутність в елементах струменевої техніки пар тертя і дросельних щілин з малими прохідними перерізами, потенціальними джерелами відмов і несправностей, дозволяє на основі вказаних елементів створити датчики параметрів руху, підсилювальні, логічні і обчислювальні пристрої. Такий істотний недолік струменевої техніки, як постійне споживання потужності, в значній мірі може бути подоланий мінімізацією прохідних перерізів елементів, при цьому втрати не перевищать рівня втрат у відомих пристроях типу «сопло – заслінка». Можливі і інші рішення, за яких у відсутності керівного сигналу живлячий канал струменевого елемента перекривається.

Не дивлячись на зовнішню простоту струменевих елементів їх робочий процес характеризується винятковою складністю явищ в проточній частині. Недостатність інформації про закономірності робочого процесу і природи явищ в тракці рідинних струменевих елементів і пов'язані з цим труднощі розрахунку і прогнозування їх вихідних характеристик є основними чинниками, стримуючими більш широке застосування струменевої техніки в приводах і системах управління.

Специфіка функціонування рідинних елементів, особливо при високому тиску, мало висвітлена. Тому зроблена спроба викласти сучасні уявлення про закономірності робочого процесу в рідинних струменевих елементах, дати практичні рекомендації з розрахунку вихідних характеристик, по їх проектуванню і технології виробництва струменевих елементів, розглянути конкретні конструктивні і схемні

рішення з використанням елементів струменевої техніки і визначити перспективні області її застосування .

Приведені в книзі матеріали допоможуть фахівцям при проектуванні пристроїв гідравлічної струменевої техніки і сприятимуть розвитку цього перспективного напрямку засобів автоматики.

Розділ 1. ПРИСТРОЇ УПРАВЛІННЯ ГІДРАВЛІЧНОЮ СТРУМЕНЕВОЮ ТЕХНІКОЮ

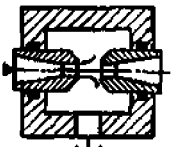
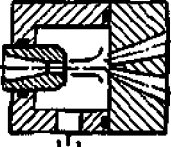
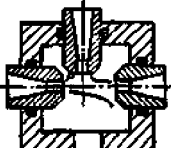
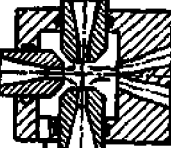
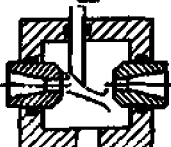
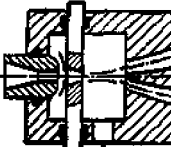
1.1. Тип струменевих пристроїв і особливості робочого процесу в них

Гідравлічні струменеві елементи призначені для перетворення і посилення входних сигналів у вигляді переміщення, зміни тиску або витрати рідини.

Базовий елемент гідравлічної струменевої техніки – «сопло – приймальний канал» (табл. 1). Він складається з живлячого сопла, в якому формується основний струмінь, і розташованого проти нього приймального каналу. Кінетична енергія струменя перетворюється у ньому в потенційну енергію стислої рідини. Елемент «сопло – приймальний канал» може бути виконаний по диференціальній схемі. При цьому використовуються два приймальних каналу. Для управління можуть застосовуватися елементи з числом приймальних каналів і більше двох.

Таблиця 1

Конструктивні схеми гідравлічних струминних елементів

Елемент	Основний	Диференціальний
«Сопло – приймальний» канал		
Аналоговий струминний з поперечною взаємодією струменів		
Струминний з дефлектором		

Основним видом вхідної дії струменевого елементу типу «сопло – приймальний канал» є зміна взаємного положення сопла і каналу. Використовуються пристрої з взаємним повздовжнім, поперечним і поперечно-кутовим зсувом сопла і каналу.

Елемент «сопло – приймальний канал» дозволяє здійснити струменеве управління при мінімальних збуджуючих діях на струмінь, який має високі енергетичні показники, тому широко застосовується в системах гідроавтоматики.

В аналоговому струменовому елементі з поперечною взаємодією струменів вхідною дією є зміна витрати або тиску рідини в каналах, що керують соплами. У соплі, що керує процесом, формується струмінь, який впливає на струмінь, що витікає з живильного сопла. При цьому на виході пристрою змінюються тиск і витрати. Аналоговий струменевий елемент може бути реалізований по диференціальній схемі (табл. 1). При цьому використовуються два керівних сопла і два приймальних канали. Зміна коефіцієнтів посилення по витраті і тиску здійснюється установкою керівного сопла під кутом до сопла живлення.

У дефлекторному струменовому елементі відхиляється струмінь, що витікає з живильного сопла. Дефлектор може бути виконаний у вигляді плоскої пластини з вістрям, що впливає на струмінь (дефлектор ножового типу). Широко використовуються також дефлектори об'ємного типу, в яких на струмінь впливає поверхня, в загальному випадку криволінійна. Дефлектор може мати одну або декілька таких поверхонь. Найчастіше використовуються дефлектори у вигляді щілини з двома робочими поверхнями (кромками). При роботі струминного пристрою струмінь відхиляється дефлектором, одночасно відсікається її частина і спрямовується на злив.

Характеристики струменевих елементів визначаються складними гідродинамічними явищами в проточній частині. Особливістю течій в порожнинах струменевих елементів є наявність високих градієнтів швидкостей, тиску і малі розміри проточної частини. Це створює великі труднощі при визначенні параметрів робочого процесу. По суті робочим процесом є сукупність таких гідродинамічних явищ, що одночасно протікають на різних ділянках струменевого елементу, серед яких необхідно виділити процеси в живлячих і керівних соплах, що управляють, у відхилюваному струмені, в зоні взаємодії струменя з приймальним каналом, в приймальному каналі, а також процеси, що супроводжуються розповсюдженням ізолюваного струменя в обмеже-

ній камері.

Живлячі і керівні сопла призначені для перетворення потенційної енергії рідини в кінетичну енергію струменів. Ефективність процесу перетворення енергії визначається конфігурацією і шорсткістю поверхні стінок. Сопла найчастіше виконуються у вигляді конфузорові з конічними або криволінійними твірними.

В результаті досліджень малорозмірних сопел, що працюють при тиску до 25 МПа, встановлено, що втрати енергії в них дуже малі і визначаються гідродинамічними явищами, що протікають в пограничному шарі на стінках сопел. Відомо, що у збіжних каналах, відбувається вирівнювання епюр швидкостей за перерізом потоку, а великі градієнти швидкостей спостерігаються тільки безпосередньо біля стінки. Тому для аналізу гідродинамічних явищ в соплах, в першому наближенні, можна використовувати схему потенційної течії ідеальної рідини в основному об'ємі сопла з урахуванням утворення на його стінках пограничного шару. Для визначення характеристик течії ідеальної рідини виконують чисельну інтеграцію рівнянь течії на ЕОМ.

Потенційна течія ідеальної рідини в області із заданими межами описується рівнянням Лапласа для функції току $\Delta\psi^2 = 0$, де Δ – оператор Гамільтона; ψ – функція току.

Чисельну інтеграцію рівняння Лапласа здійснюють кінечно-різницеvim методом, який зводиться до вирішення отриманої системи рівнянь алгебри методом Гауса – Зейделя.

Для прискорення збіжності ітераційного процесу використовується схема прискореного методу Лібмана. При цьому значення функції току обчислюють за формулою:

$$\psi = \omega\psi^N + (1 - \omega)\psi^S$$

де ω – коефіцієнт, рівний 1,5 – 2,1; ψ^N , ψ^S – значення функцій току, отримані в останній і попередній ітераціях.

Для чисельної інтеграції рівняння Лапласа необхідно задати граничні умови. На вході в сопло приймається, що швидкість постійна, на стінках нормальна складова швидкості рівна нулю, а на виході з сопла гранична умова задається у вигляді спеціальної ітераційної процедури.

В результаті інтеграції рівняння Лапласа набувають значень функції току в кожному вузлі області течії. За цими даними в результаті чисельного диференціювання визначають значення проекцій швидкостей і модуль швидкості в кожному вузлі сітки. За значенням модуля швидкості, використовуючи інтеграл Бернуллі, знаходять роз-

поділ тиску в області течії.

На рис. 1 показана схема течії в соплі. Течія характеризується плавною конфігурацією ліній струму, що відповідає границі сопла. З

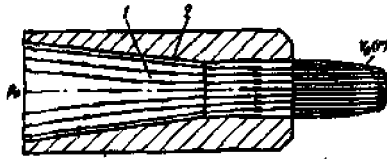


Рис. 1. Схема течії у соплі гідралічного струминного елемента: 1 – потенціальне ядро потоку; 2 – пограничний шар

розрахунків виходить, що розподіл швидкостей в соплах з невеликими кутами конусності (менш $15...20^\circ$) мало відізняється від рівномірного. Ця важлива особливість конусних сопел має принципове значення.

Для визначення характеристик пограничного шару на стінках сопла використовуються наближені методи інтегрування рівнянь пограничного шару. Результати розрахунку кінематичних характеристик пограничного шару плоского сопла мало відрізняються від відповідних характеристик шару просторового (осесиметричного) сопла.

Розподіл швидкостей в пограничному шарі плоского сопла для перерізів, віддалених від входу в сопло, описується рівнянням:

$$\frac{u}{v} = 3\text{th}^2 \left(\Theta \sqrt{\frac{\text{Re}_n}{2\beta_n} + 1,146} \right) - 2,$$

де u – швидкість на кутовій відстані Θ від стінки сопла; v – швидкість на межі пограничного шару; Re_n , β_n – число Рейнольдса і кут потенційного ядра потоку.

Максимальна кутова відстань від стінки (кутова товщина пограничного шару) визначається за формулою:

$$\Theta_{\max} = 3 \sqrt{\frac{\beta_n}{\text{Re}_n}}$$

Число Рейнольдса і кут потенційного ядра потоку пов'язані з кутом конусності β_c і числом Рейнольдса сопла Re_c наступними співвідношеннями:

$$\beta_n = 9 \frac{\left(\frac{\sqrt{1 + \beta_c Re_n / 9} - 1}{Re_n} \right)^2}{Re_n},$$

$$Re_c = Re_n \left(1 + \frac{1,48}{\sqrt{1 + \frac{\beta_c Re_n}{9} - 1}} \right).$$

В результаті розрахунків течії в соплі отримані дані про розподіл швидкостей на зрізі сопла.

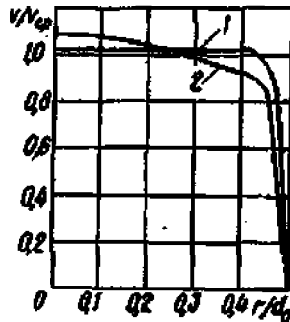


Рис. 2. Розподіл швидкостей у радіальному перерізі сопла з різним кутом конусності: 1 – 15°; 2 – 45°.

На рис. 2 наведено графіки нерівності швидкостей від радіусу в перерізах конічних сопел з різними кутами конусності. З аналізу графіків витікає, що нерівномірність епюри швидкостей по перерізу зменшується із зменшенням кута конусності.

Профіль швидкостей струменя формується в соплі. Надалі, при розповсюдженні струменя в камері обмежених розмірів, відбувається розсіювання кінетичної енергії струменя, зміна його форми. Енергія струменя втрачається

внаслідок в'язкості, вихороутворення і інтенсивних явищ кавітацій в струменевій камері. Струмені, що розповсюджуються в камерах обмежених розмірів, не є вільними.

Характеристики течії можуть бути визначені в результаті числової інтеграції рівнянь течії в'язкої нестискуваної рідини. Стационарна течія рідини за вказаних умов описується рівняннями Нав'є-Стокса

$$Re \cdot \text{rot}(\vec{\Omega} \cdot \vec{v}) = \nabla^2 \vec{\Omega}, \quad \vec{\Omega} = \text{rot} \vec{v},$$

де $\vec{\Omega}$ – вихор швидкості; $\vec{v}$ – швидкість в точці області течії.

Для двовірної течії в плоскій і циліндровій системах координат рівняння Нав'є-Стокса можуть бути записані в «консервативній» фор-

мі:

$$\operatorname{Re} \left[\frac{\partial}{\partial x} (\Omega v_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\Omega v_y) \right] = \frac{\partial^2 \Omega}{\partial x^2} + \frac{1}{H} \frac{\partial}{\partial y} \left(H \frac{\partial \Omega}{\partial y} \right), \quad \Omega = \frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y}$$

де v_x, v_y – проекції швидкостей на повздовжню координатну вісь x і поперечну y ; H – коефіцієнт Ляме, рівний одиниці для плоскої течії і рівний y для осесиметричної течії з віссю симетрії, співпадаючої з віссю координат x .

Після введення функції току згідно формулам

$$v_x = \frac{1}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial y}, \quad v_y = \frac{1}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial x}$$

і підстановки значень проекцій швидкостей в рівняння Нав'є-Стокса отримаємо

$$\operatorname{Re} \cdot H^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Omega}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Omega}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial x} \left[H^3 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\Omega}{H} \right) \right] - \frac{\partial}{\partial y} \left[H^3 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\Omega}{H} \right) \right] = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{H} \frac{\partial \Psi}{\partial y} \right) + \Omega = 0$$

Ця система є двома нелінійними рівняннями в частинних похідних другого порядку. Чисельна інтеграція рівнянь виконується з використанням кінцево-різницевої апроксимації рівнянь на дискретних ділянках модельованої області течії з рішенням отриманої системи лінійних рівнянь алгебри ітераційним методом Гауса – Зейделя.

Збіжність ітераційної процедури забезпечується шляхом використання особливого прийому при виведенні ітераційних співвідношень. Для цього застосовується так звана орієнтована протитечійна схема розрахунку.

Для виведення ітераційних співвідношень область течії розбивається ортогональною сіткою з нерегулярним кроком на елементарні прямокутники. При інтегруванні рівнянь Нав'є-Стокса в «консервативній» формі за об'ємом елементарного прямокутника отримані формули для обчислення значень функцій току і вихору у внутрішньому вузлі сітки за значеннями змінних в чотирьох сусідніх вузлах:

$$\frac{\Omega}{H} = \frac{\sum_{i=1}^4 (A_i + B_i) (\Omega / H)_i}{\sum_{i=1}^4 (A_i + B_i)}, \quad \Psi = \frac{\Omega / H + \sum_{i=1}^4 (B_i \Psi_i)}{\sum_{i=1}^4 (B_i)}$$

Значення постійних A_i , B_i обчислюються залежно від розмірів і розташування елементарного прямокутника. Для вузлів на межах області використовуються спеціальні ітераційні співвідношення. Формули ітерацій є ядром обчислювальної процедури, реалізованої за допомогою програмного забезпечення для ПК.

На рис. 3 показані епюри швидкостей і лінії току, отримані при розрахунку осесиметричної течії в'язкої нестискуваної рідини в обмеженій камері струменевого елементу. При розповсюдженні ізольованого струменя в обмеженій камері відбувається дисипація кінетичної енергії струменя. Енергія втрачається на роботу внутрішніх сил в'язкого опору.

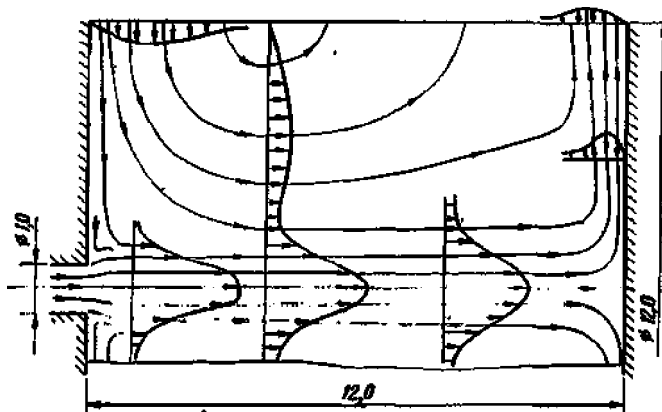


Рис. 3. Схема струменевої течії в'язкої рідини в камері і епюри швидкостей, отримані в результаті розрахунку на ПК.

Струмінь ежектує рідину, що знаходиться в камері. При цьому в камері виникає інтенсивна вихрова течія. Унаслідок обмеженого об'єму камери структура вихрової течії залежить від конфігурації її меж. При цьому поблизу вихідного отвору сопла біля стінки камери виникає радіальна течія, спрямована до струменя, а біля стінки камери, об яку б'ється струмінь, виникає радіальна течія, спрямована у бік зливу.