

ОСОБЛИВОСТІ СТРУМИННОЇ ОБРОБКИ ВНУТРІШНІХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ПРИ КАПІЛЯРНОМУ КОНТРОЛІ

А. М. ОВСЯНКІН, В. Г. ДЕМИДКО, Є. О. ШКВАР

Розглянуто проблеми використання струменних течій при капілярному контролі внутрішніх циліндричних поверхонь конструкцій. Наведено основи побудови інженерного та теоретичного методів розрахунку характеристик газорідних струминних течій, які використовуються для нанесення дефектоскопічної рідини на поверхню з метою дослідження цілісності останньої. Показано, що на ефективність контролю впливають як геометричні особливості поверхні, що досліджується, так і різноманітні параметри струменя.

The problems make use of jet flows of capillary analysis of cylindrical inner surfaces have been considered. The basis of constructing of both engineering and theoretical methods of liquid-gas jet flows properties predictions is carried out. The mentioned jet flows are applied for covering the investigated surface by flow-detection liquid with the aim of discontinuity detection. It was shown that the effectiveness of discontinuity test depends on both surface geometrical phenomena and different parameters of jet flow.

В роботах [1–3, 11] представлено основні вимоги до капілярного контролю сучасних авіаційних конструкцій при їх виробництві і експлуатації, а також методи і засоби реалізації контролю порожнистих елементів.

При обробці дефектоскопічними матеріалами внутрішніх циліндричних поверхонь за допомогою форсунок результати контролю залежать від швидкісних характеристик газорідного струменя. При цьому необхідно враховувати кут зустрічі струменя з поверхнею, що оброблюється. В роботі [11] розглянуто рівняння зміни статичного тиску і швидкості рідини у струмені, що також важливо для результатів обробки.

Для характеристик струменя з симетричним розпилюванням (рис. 1) запропонований інженерний розрахунковий метод. В результаті отримані рівняння зміни статичного тиску у струмені і зміни швидкості потоку по його осям внаслідок перетоку газу з периферії в середину факела:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_{гп}\omega_{гп} \frac{d\omega_{гп}}{dz}.$$

Рівняння зміни швидкості рідини по осям j (наприклад, по y або z):

$$\frac{d\omega_{pzj}}{dz} = -C_{kj} \frac{0,75\rho_r\omega_0(\omega_{pzj} - \omega_{rф})}{\rho_p d_{kj}\omega_{pzj}} + \frac{g}{\omega_{pzj}}, \quad (1)$$

$$\frac{d\omega_{pyj}}{dz} = -C_{kj} \frac{0,75\rho_r\omega_0\omega_{pyj}}{\rho_p d_{kj}\omega_{pzj}}, \quad (2)$$

де C_k — коефіцієнт гідродинамічного опору; ρ_{k+1} — щільність речовини $k+1$ (дисперсійної) фази; d_k — діаметр крапель; ρ_p, ρ_r — щільність рідинної та газової складових струменя відповідно; g — вектор прискорення вільного падіння; ω — швидкість рідинної фази центрального струменя; ω_l — проекція швидкості рідини на її напрям l .

Метою даної статті є продовження аналізу параметрів струминної течії при обробці внутрішніх поверхонь для побудови математичної моделі руху струменя.

Побудова теоретичного розрахункового методу. Метою, яку будемо досягати при побудові теоретичних моделі і відповідного до неї методу розрахунку, вважатимемо їх спроможність визначити розподіли швидкостей, концентрації фази, що переноситься, а також нормальних і дотичних напружень в області формування течії струменя. Отже, формалізуємо задачу наступним чином.

Геометричні і режимні параметри, що характеризують течію. Описану вище конфігурацію характеризуватимемо наступними основними геометричними параметрами (рис. 2): D — діаметр сопла форсунки; S — відстань від сопла до поверхні. Течія, що розглядається, також характеризується об'ємними витратами газу і рідкої фази, які позначатимемо Q_1 та Q_2 відповідно. В розрахунках згідно загальноприйнятої технології чисельних обчислень доцільніше користуватись обезрозміреними геометричними параметрами. В якості параметрів, за якими будемо здійснювати обезрозмірю-

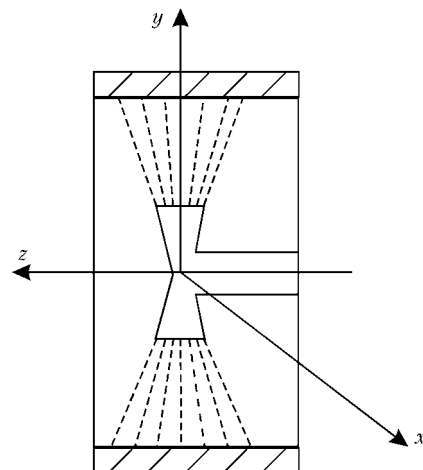


Рис. 1. Нанесення індикаторного пенетранту

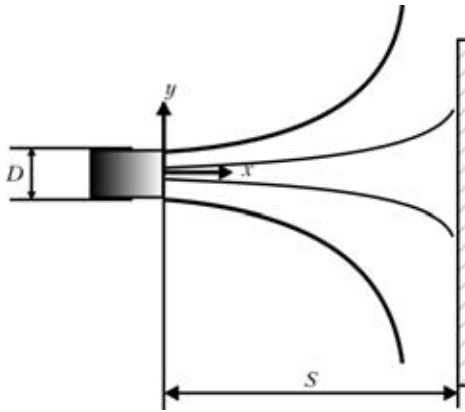


Рис. 2. Геометричні характеристики течії

вання, прийємо: за характерний лінійний розмір L — діаметр основного сопла D , в якості характерної розрахункової швидкості U_0 — початкову швидкість рідини на зрізі сопла, а за характерну об’ємну витрату — витрату рідини Q_1 .

Побудова математичної моделі, система рівнянь руху. Течія, що досліджується, не має єдиного переважаючого напрямку розвитку в усій області її формування, що обумовлює непридатність використання для її моделювання теорії прилежого шару і необхідність використання більш загальних підходів до побудови математичної моделі. Тому в даній частині дослідження використовується найбільш загальний підхід, що базується на системі диференціальних рівнянь в частинних похідних в формі Нав’є–Стокса.

Враховуючи симетричність струменя відносно його осі, використаємо декартову систему координат $ХОУ$, початок якої лежить на осі сопла в перерізі його вихідного зрізу, поздовжня вісь $ОХ$ співпадає з віссю сопла, а вісь $ОУ$ спрямована уздовж радіального напрямку (рис. 1). В цій системі координат рівняння Нав’є–Стокса можуть бути записані наступним чином

$$\frac{\partial y^{\chi} \bar{u}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v}}{\partial \bar{y}} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u}^2}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u} \bar{v}}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_u \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_u \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{u}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{x}} + S_u, \quad (4)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u}^2 \bar{v}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v}^2}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_v \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_v \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{v}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + S_v, \quad (5)$$

$$\frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{u} \bar{c}}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial y^{\chi} \bar{v} \bar{c}}{\partial \bar{y}} \right] = \frac{1}{y^{\chi}} \left[\frac{\partial}{\partial \bar{x}} (\Gamma_c \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{x}}) + \frac{\partial}{\partial \bar{y}} (\Gamma_c \bar{y}^{\chi} \frac{\partial \bar{c}}{\partial \bar{y}}) \right] - \frac{\partial \bar{p}}{\partial \bar{y}} + S_c, \quad (6)$$

де рівняння (3) є рівнянням нерозривності, (4), (5) — рівняння руху для поздовжньої u та радіальної v складових швидкості, рівняння (6) описує перенос рідиною концентрації додаткової фази.

Згідно загальноприйнятій практиці, рівняння (3)–(6) подано в безрозміреному вигляді. При безрозмірюванні координат x та y використовується характерний розмір розрахункової області L , в якості якого можна вибрати відстань від сопла до поверхні або, наприклад, діаметр сопла. Таким чином, $\bar{x} = x/L$, $\bar{y} = y/L$. Складові швидкості u і v безрозмірюються за характерною швидкістю, в якості якої можна вибрати швидкість на зрізі сопла, тобто $\bar{u} = u/u_H$, $\bar{v} = v/u_H$. Тиск p безрозмірено наступним чином $\bar{p} = p/(\rho u_H^2)$, де ρ — густина рідини. Час t безрозмірюється згідно виразу $\bar{t} = tu_H/L$. Символами Γ позначено безрозмірені дифузійні коефіцієнти, що обчислюються через кінематичний коефіцієнт ефективної в’язкості $\nu_{\text{eff}} = \nu + \nu_t$ за формулами: $\Gamma_u = \Gamma_v = \frac{\nu_{\text{eff}}}{u_H L}$, $\Gamma_c = \Gamma_u / S_c$, де S_c — молекулярне число Шмідта, значення якого визначається фізично-хімічними властивостями рідкої фази та супутнього газового потоку. В першому наближенні значення може S_c бути покладено сталим. Концентрація рідкої фази c в рівнянні (6) безрозмірюється за значенням в початковому перерізі c_0 , тобто $\bar{c} = c/c_0$. Символами S в рівняннях (4)–(6) позначено джерельні члени, які мусять відтворювати силові особливості міжфазової взаємодії. Їх визначення становить одну з важливих задач моделювання. Показник степеня χ дозволяє використовувати наведену вище систему для моделювання як плоских течій ($\chi = 0$), так і осесиметричних ($\chi = 1$).

Турбулентна в’язкість ν_t , що входить складовою в формулу ефективної в’язкості, мусить визначатися моделлю турбулентності, що пов’язує характеристики збуреного турбулентного руху з параметрами осередненої течії. В якості такої моделі слід обирати диференціальні моделі турбулентності, оскільки для течії, що розглядається, алгебраїчні моделі не придатні, враховуючи на наявність сильного зв’язку між різними зонами, що є складовими даної течії. Цей зв’язок не може бути коректно врахований алгебраїчними моделями турбулентності, які ґрунтуються на концепції виключно локальної взаємодії між збуреною і осередненою складовими турбулентного руху.

Диференціальні ж моделі потребують окремого детального аналізу і адаптації по відношенню до конкретної розрахункової конфігурації. В зв’язку з цим це передбачається зробити на наступному етапі дослідження. На цьому етапі, враховуючи зроблені вище припущення, обмежимо розгляд лише ламінарним режимом формування течії. Для цього покладемо коефіцієнт турбулентної в’язкості рівним нулю, тобто $\nu_t = 0$. Слід зазначити, що зроблене обмеження впливатиме лише на кількісні, а не на якісні характеристики формування течії, тому на етапі формування концепції математичної моделі та розрахункового методу воно цілком придатне.

Система (3)–(6) має еліптичний тип за просторовими координатами, що передбачає постановку граничних умов на усіх межах розрахункової області.



В початковому розрахунковому перерізі:

$$(\bar{x} = 0): \bar{u} = f(\bar{y}), \bar{v} = 0, \bar{c}_0 = \Phi(\bar{y}). \quad (7)$$

На поверхні, нормальній до осі струменя:

$$(\bar{x} = x_s): \bar{u} = 0, \bar{v} = 0, \quad (8)$$

де x_s — відстань від зрізу сопла до поверхні.

На зовнішніх межах логічним є задання умов відсутності зміни параметрів, що розраховуються, або так званих м'яких граничних умов.

Вирази (7), (8) містять неповний перелік очевидних граничних умов. Решта граничних умов обумовлена властивостями рідкої фази (спроможністю змішуватись з рідиною основного потоку, вагомистію, концентрацією тощо). Конкретна реалізація як наведених граничних умов (7), (8), так і додаткових великою мірою залежить від застосованого методу інтегрування та від геометричних особливостей різницевої сітки (у випадку використання скінченно-різницевого чисельного методу розв'язку). Крім того, слід зазначити, що і структура рівняння переносу рідкої фази в газорідному струмені (6) може зазнати деяких змін залежно від особливостей цієї фази.

Функція $\bar{u} = f(\bar{y})$ задає початковий профіль швидкості, її джерелом можуть бути, наприклад, експериментальні дані. Функція $\bar{c}_0 = \Phi(\bar{y})$ визначається відомою концентрацією c_0 фази, що переноситься основним потоком, на зрізі сопла форсунки, а також геометричними характеристиками самої форсунки.

Таким чином, маємо систему з чотирьох взаємозв'язаних диференціальних рівнянь в частинних похідних (3)–(6) разом з граничними умовами (7), (8). Складність цієї системи обумовлена наявністю фази, що переноситься, і складним характером її взаємодії з основною фазою, що не дає змоги отримати розв'язок в аналітичному вигляді. Для однофазної необмеженої плоскопаралельної ламінарної течії, яка натікає на перпендикулярно до неї стінку, такий розв'язок в околі критичної точки є можливим і міститься, наприклад в [4], для осесиметричного та плоского випадків. Така течія дещо схожа до геометрії потоку, що розглядається в даному дослідженні, але аналітичний розв'язок обмежений, по-перше, більш простою геометрією течії, по-друге, однофазним випадком, і нарешті, він справедливий лише в малому околі критичної точки. Узагальнення цього розв'язку на випадок турбулентної течії також не можливе. Наведені міркування обумовлюють необхідність застосування до розв'язування даної задачі чисельних методів інтегрування системи (3)–(6) як більш універсальних, гнучких і адаптованих до зміни геометричних та режимних параметрів, що характеризують потік.

Порівняльний аналіз чисельних методів, що описують рух рідини. Чисельні методи є важливим елементом сучасних технологій моделювання різноманітних течій. Огляди різноманітних чисельних методів розрахунку характеристик в'язких течій та їх застосування до різноманітних роз-

рахункових конфігурацій містяться в роботах [5–10]. Стосовно течій в'язкої рідини поширені два підходи до інтегрування системи рівнянь.

Перший полягає в спрощенні системи рівнянь шляхом переходу до перетворених змінних (функція струму — завихреність). Цей підхід дозволяє виключити з рівнянь одну з невідомих змінних — тиск \bar{p} , тобто зменшити в процесі розв'язування кількість взаємозалежних параметрів на одиницю, що значно спрощує як систему рівнянь, так і розрахунковий метод. Це дозволяє побудувати ефективний метод чисельного розв'язку, але для отримання розподілу тиску слід використовувати додаткове рівняння.

Специфіка змінних, використаних в цьому методі, потребує відповідної технології задання граничних умов, що накладає обмеження на діапазон режимних параметрів течії, в якому цей метод забезпечує можливість побудови збіжного ітераційного процесу відшукування розв'язку. Зокрема, суттєві обмеження накладаються на число Рейнольда Re . При $Re > 1000$ даний метод різко втрачає ефективність, а в деяких випадках стає повністю непрацездатним. Крім того, суттєвим його недоліком є незначна точність відтворення розподілу тиску. Ці обмеження і недоліки примушують відкинути цей підхід стосовно задачі, що є предметом розгляду.

Другий метод інтегрування системи рівнянь руху рідини в оригінальних неперетворених змінних: складові швидкості u, v , а також тиск p . В спеціальній літературі [5–10] клас таких методів розрахунку отримав абревіатуру SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations — напівявний метод для розв'язування зв'язаних через тиск рівнянь). Цей підхід більш громіздкий з точки зору алгоритмізації і програмування, передбачає використання рознесеної в області розрахунку різницевої сітки для різних розрахункових змінних (так званої шахматної сітки). Крім того, даний метод потребує набагато більших витрат часу і ресурсів комп'ютера порівняльно з першим розглянутим методом. Але ці недоліки цілком покриваються більшою універсальністю цього методу щодо діапазону чисел Re і інших параметрів, що характеризують режим течії. Зокрема, цей метод значно краще пристосований до можливості узагальнення на випадок моделювання турбулентних режимів течій. Крім того, він забезпечує задовільне для практичних потреб передбачення розподілу тиску. Саме ці властивості SIMPLE метода дозволяють обґрунтувати його використання для моделювання течії струменя, що натікає під прямим кутом на тверду поверхню і рекомендувати цей метод в ролі базового для подальших досліджень в напрямку моделювання капілярних методів діагностики стану поверхонь елементів різноманітних конструкцій.

Висновки

Проведений в статті аналіз дозволяє дійти наступних висновків.

1. Контроль несучільностей внутрішніх циліндричних поверхонь конструкцій суттєво відрізняється



від контролю зовнішніх поверхонь впливом вихрових потоків, що протидіють струменю, що направлений до поверхні. Тому необхідно враховувати циркуляцію потоків, яка виникає при обробці і може суттєво зменшувати заповнення несучильностей.

2. Задача вибору оптимальних режимів обробки актуальна і потребує розрахунків конструктивних і технологічних параметрів обладнання для обробки.

3. Наведено принципи побудови інженерного та теоретичного методів розрахунку характеристик газорідних струминних течій, які використовуються для нанесення дефектоскопічної рідини на поверхню з метою дослідження цілісності останньої.

4. Отримані системи співвідношень, що описують взаємодію струминного потоку та поверхні, що є об'єктом діагностики, демонструють, що на ефективність контролю впливають як геометричні особливості поверхні, що досліджується, так і параметри формування струменя.

1. Деклараційний патент України 48406А. Пристрій для нанесення рідких дефектоскопічних матеріалів при капілярній дефектоскопії на поверхню контрольованого

- виробу / А. М. Овсянкін, Г. М. Франчук, В. Я. Дереча, А. В. Попов. Оубл. 15.08.2002. Бюл. № 8.
2. Франчук Г. М., Овсянкін А. М., Попов А. В. Забезпечення контролепридатності елементів шасі з титанових сплавів з підвищеною чутливістю неруйнівного контролю // Вісник НАУ. — 2002. — № 2. — С. 141–145.
3. Пажи Д. Г., Галустов В. С. Основы техники распыливания жидкости. — М.: Химия, 1984. — 256 с.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. — М.: Иниздат, 1956. — 528 с.
5. Белов И. А., Кудрявцев Н. А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. — Л.: Энергоатомиздат, 1987. — 223 с.
6. Белов И. А., Шеленикевич В. А., Шуб Л. И. Моделирование гидромеханических процессов в технологии изготовления полупроводниковых приборов и микросхем. — Л.: Политехника, 1991. — 287 с.
7. Патанкар М. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 150 с.
8. Роуч П. Вычислительная гидромеханика / Пер. с англ. — М.: Мир, 1980. — 616 с.
9. Андерсон Д., Танихилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен / Пер. с англ. — Т. 2. — М.: Мир, 1990. — 329 с.
10. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей / Пер. с англ. — Т. 2. — М.: Мир, 1991. — 552 с.
11. Овсянкін А. М., Демидко В. Г. Контроль несучильностей циліндричних поверхонь порожнистих елементів конструкцій // Матер. IV Нац. наук.-техн. конф. і виставки «Неразрушающий контроль и техническая диагностика — 2003». — Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ, 19–23 мая 2003. — С. 354–357.

Рассматриваются проблемы обработки дефектоскопическими жидкими материалами цилиндрических внутренних поверхностей полых конструкций при капиллярном контроле. При нанесении индикаторного пенетранта с помощью форсунок результат заполнения поверхностных несплошностей определяется параметрами струй. Расчетным методом получены уравнения для изменений статического давления и скорости жидкости в струе вблизи стенок цилиндра вследствие перетекания газа в середину факела. Для оценки скорости и концентрации жидкой фазы при взаимодействии с обрабатываемой поверхностью предложен способ построения математической модели на основе системы дифференциальных уравнений в частных производных в форме Навье–Стокса.

При решении уравнений можно выбрать расстояние от среза сопла форсунки до обрабатываемой поверхности или диаметр сопла для обеспечения необходимой скорости встречи струи с поверхностью. Осредненные параметры течения в струе предлагается дополнять дифференциальной моделью турбулентности с решением задачи численными методами интегрирования системы уравнений. Одним из наиболее эффективных численных методов является метод SIMPLE на основе компьютерной программы, который обеспечивает универсальность для максимального числа параметров, характеризующих режимы потока и может быть использован для дальнейших задач моделирования процессов капиллярного контроля внутренних цилиндрических поверхностей.