

УДК 685.31.052

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ АНАЛІТИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ФОРМУВАННЯ  
ВИСОКОШВИДКІСНИХ ГІДРО- ТА ГІДРОАБРАЗИВНИХ СТРУМЕНІВ**

Ю.В. КЛАПЦОВ, І.В. ПЕТКО, І.В. ПАНАСЮК

Київський національний університет технологій та дизайну

*Наведено результати аналітичного огляду існуючих методів математичного моделювання високошвидкісних одно- та двофазних течій. Визначено методи моделювання, що найбільше відповідають задачам розрахунку параметрів ріжучого гідро- та гідроабразивного струменів*

Останнім часом технологія гідро- та гідроабразивного різання набула більш широкого застосування завдяки ресурсозбереженню та відносній екологічній чистоті. Розвиток і вдосконалення даної технології та устаткування для її реалізації дозволило істотно знизити його ринкову вартість, а можливість комплектації з урахуванням призначення і умов експлуатації створило основу для його використання в багатьох галузях промисловості, в тому числі і легкій.

**Об'єкти та методи дослідження**

Однією з найважливіших обставин, внаслідок якої широка промислова реалізація гідрорізання поки ускладнена, є те, що в даний час відсутня повна теорія різання високошвидкісним гідро- та гідроабразивним струменем. Основні параметри гідрорізання і їх вплив на продуктивність і якість процесу визначаються експериментально. Але існуючі засоби вимірювання параметрів потоків рідини не дозволяють провести безпосередні виміри в каналах струменеформуєчного сопла і прискорюючого насадка.

Об'єктом дослідження є високошвидкісний струмінь, який використовується в технології гідро- та гідроабразивного різання. При вирішенні завдань, поставлених у цій роботі, були використані сучасні методи теоретичних досліджень, що базуються на теоріях течії рідини, двофазного потоку.

**Постановка завдання**

Мета досліджень – визначення методів аналітичного дослідження для створення в подальшому математичної моделі формування високошвидкісного ріжучого двофазного струменя рідини.

**Результати обговорення**

Експериментально було визначено [1, 2], що на енергетичні параметри високошвидкісного гідро- та гідроабразивного струменя впливає тиск робочої рідини в системі, діаметр струменеформуєчного сопла, довжина і діаметр прискорюючого каналу, а також умови взаємодії абразивних частинок з гідроструменем на початковому етапі.

Аналіз існуючих засобів вимірювання параметрів рідинних потоків показав, що безпосередньо визначати їх в каналі струменеформуєчного сопла і прискорюючого насадка або заміряти швидкість безперервного струменя неможливо. Цим пояснюється той факт, що оцінку струменеформуєчих елементів (енергетичних параметрів гідро- та гідроабразивного струменів) здійснюють на підставі ефективності дії струменя (по силі дії, швидкості розрізання матеріалу і т.п.).

В [3] указується, що моделювання високошвидкісних течій приводить до великих технічних складнощів, а дані експериментальних вимірювань мають вельми обмежений характер, «оскільки для подібності між натурою і модельним експериментом вже недостатньо задовольнити лише класичним

критеріям подібності (числа Маху, Рейнольдса, Фруда), тому застосовують математичне моделювання, яке «дозволяє різко скоротити терміни наукових і конструкторських розробок» і іноді «служить практично єдиним інструментом дослідження». Крім того, «якщо явище, що вивчається, повністю описується відомими законами природи (рух плазми в магнітному полі, виведення супутника на орбіту, ламінарний рух рідини і т.п.) математичний експеримент може замінити фізичний або різко скоротити об'єм даних, що визначаються за допомогою фізичного експерименту» [4]. Одним з методів математичного моделювання є чисельне моделювання (або чисельний експеримент), що набуває в даний час все більш значної ролі [3 – 5]. Тому методам чисельного рішення задач математичної фізики, до яких в основному відносяться рівняння гідродинаміки, присвячена обширна література. Теоретичні аспекти побудови алгоритмів чисельного рішення рівнянь висвітлені в роботах радянських математиків К.І. Бабенко, С.К. Годунова, Г.И. Марчука, А.А. Самарського і інших. Чисельному моделюванню в механіці суцільних середовищ присвячені роботи академіків О.М. Белоцерковського, Г.І. Петрова, професора В.М. Пасконова, У.Т. Пірумова, Г.С.Р осякова і інших, причому в багатьох роботах указується, що, враховуючи нелінійність рівнянь гідродинаміки, велике число незалежних змінних і складність, а іноді і неможливість експериментального вивчення, чисельний експеримент часто є єдиним засобом отримання інформації про процес. Так, академік О.М. Белоцерковский відзначає, що "... чисельний експеримент в механіці суцільних середовищ набуває в даний час практично рівні права з традиційним фізичним експериментом", до того ж він дозволяє уточнити початкову фізичну модель [3].

Присутність твердої фази в поступально рухомому потоці рідини істотно впливає на його гідродинамічні характеристики. Механіка взаємодії рідини і твердої фази важко піддається аналітичному опису. Це перешкоджає достатньо повному математичному моделюванню і опису найбільш загального рішення.

Всі роботи, які присвячені теоретичному аналізу двофазного потоку, ґрунтуються на ряді припущень. Найчастіше дослідники розглядають симетрично-осьовий рух з невеликою концентрацією частинок. Приймається, що розмір частинок невеликий, вони мають сферичну форму, не збурюють потік, не взаємодіють між собою. При цьому підходи до вирішення поставленої задачі істотним чином розрізняються між собою.

Г.М. Косой і В.В. Сапешко [6] приймають сталий рух двофазного потоку, в якому швидкість і статичний тиск рідини постійні уздовж вісі каналу однорідним, а впливом зовнішніх малих сил нехтують. Рівняння Нав'є-Стокса і нерозривності використані ними за умови постійності коефіцієнта турбулентної в'язкості. При виведенні рівнянь дискретної фази вважалося, що повне прискорення частинки складалося з прискорення, обумовленого силою опору поперечним градієнтом тиску рідини, прискорення приєднаної маси частинки щодо рідини і кориолісова прискорення. Початкова система рівнянь була приведена до інтегральної форми і вирішувалася методом Рунге-Кутта. Результати чисельного дослідження показали, що траєкторії частинок, головним чином, визначаються силовими взаємодіями в радіальному напрямі. Відхиленню частинок від осі сприяє також зменшення вхідної швидкості несучого середовища, а швидкості безперервної і дискретної фаз в тангенціальному напрямі мають незначну відмінність.

Спроба розрахувати положення частинки під час руху в поперечному перетині і її радіальну швидкість зроблена в роботі [7]. Авторами використана модель плаского потенційного перебігу ідеальної рідини. При цьому силою опору твердих частинок нехтують, а в початковий момент часу швидкості частинок і рідини приймають однаковими.

Існуючі методи розрахунку двофазних потоків базуються на вирішенні системи рівнянь руху в'язкої рідини. Ряд авторів використовує рівняння руху безпосередньо у формі Нав'є-Стокса [7 – 10], інші дослідники – в наближенні граничного шару. Наявність дискретної фази в потоці відбивається в динамічних рівняннях появою додаткових членів.

Рішення початкової системи рівнянь може здійснюватися диференціальними або інтегральними методами. Ряд авторів робили спроби рішення рівнянь руху сітковими методами [7, 8, 11 – 14]. При цьому часто приймається перехід від фізичних змінних – швидкостей і тиску до функції струму і вихору. Досліджувана область покривається кінцево-різницевою сіткою, крок якої в процесі рахунку може змінюватись по величині. Коректність рішення залежить від вибору кінцево-різницевої формули для побудови точного аналога диференціальних рівнянь і використання найбільш надійного методу розрахунку. Широкого поширення набули методи, розроблені Патанкармом і Сполдінгом [15], що використовується в роботах [7, 8]. На шляху їх використання для розрахунку турбулентних течій складним є підбір нерідко великого числа експериментальних констант, що проводиться способами оптимізації для задовільного узгодження рішення з отриманими даними [13].

Диференціальні методи розрахунку є найбільш трудомісткими, характеризуються складними алгоритмами, хоча є достатньо загальними і точними. Крім того, як відзначає П. Роуз «існуюча нині математична теорія рішень нелінійних рівнянь в частинних похідних поки що неадекватна: немає сурового дослідження стійкості, сурових оцінок погрешностей і доказів збіжності», тому використання кінцево-різницевої методів викликає суттєві труднощі, які відсутні в інтегральних методах.

Інтегральні методи отримали свій розвиток ще в роботах Кармана і широко застосовуються і понині. Як відзначають автори монографії [16], інтегральні методи є найбільш результативними при розрахунку двофазних гомогенних граничних шарів. Самі інтегральні співвідношення є точними наслідками рівняння руху, але в результаті використання в них наближених величин відносяться до наближених, розрахунок по яким не викликає принципових ускладнень. З математичної точки зору застосування інтегральних співвідношень означає перехід від системи диференціальних рівнянь в частинних похідних до звичайних диференціальних рівнянь першого порядку. У них замість локальних величин входять характеристики, які визначаються інтеграцією параметрів перпендикулярних руху потоку. Щоб визначити комплекси, що входять в інтегральні співвідношення, можна замінити дійсні профілі швидкостей деякими наближеними однопараметричними сімействами, складеними на основі загальних уявлень про граничні умови і форму дійсних профілів швидкостей, – як відомо операція інтегрування зменшує величину помилки, що вноситься. Інтегральні методи дозволяють враховувати передісторію потоку і відрізняються нескладним конструктивним описом процесу з мінімальними витратами розрахункового часу.

Моделі турбулентності, які використовуються в інтегральних і кінцево-різницевої методах, класифікуються відповідно до гіпотез щодо дотичної напруги.

У ряді робіт [6, 12] вважається розподіл дотичної напруги аналогічно ламінарному режиму руху, але із залученням так званої "турбулентної в'язкості", значення якої визначають шляхом порівняння аналітичних залежностей і даних експерименту. При цьому вважається, що турбулентність ізотропна. Проте експериментальні дані ставлять під сумнів цей факт. Ваттендорф [17] в досліді виявив, що значення «турбулентної в'язкості» істотно змінюється по перетину сопла. Автори теоретичних досліджень [11, 17] також указують на анізотропію коефіцієнта турбулентного перенесення.

Найбільш поширеним способом визначення турбулентності є застосування феноменологічних методів, що засновані на різних модифікаціях основної теорії довжини змішування [18 – 21]. Головне призначення цього підходу полягає в урахуванні неізотропної турбулентності. У більшості робіт для визначення поля дотичної напруги використовується гіпотеза Прандтля. Важливим етапом в розрахунку характеристик турбулентності є визначення довжини шляху змішування. Кінні [22], ґрунтуючись на гіпотезі подібності швидкостей в повністю турбулентних потоках, шляхом порівняння з експериментальними даними, прийшов до висновку, що ця довжина складає декілька відсотків від радіальної координати. Досить часто вважають, що довжина шляху змішування в тангенціальному напрямі така ж, як і в прямолінійному потоці.

Якісно новий підхід до розрахунків турбулентної течії рідини заснований на ідеях А.Н. Колмогорова про зв'язок основних статистичних характеристик потоку з параметрами, вираженими через кінетичну енергію і масштаб турбулентності [8]. У таких моделях значення характеристик турбулентності визначаються із спеціально складених диференціальних рівнянь. Моделі турбулентності, засновані на визначенні кінетичної енергії, є достатньо універсальними, вони враховують вплив складових, що рухаються в потоці.

На основі проведеного аналізу літературних джерел можна стверджувати, що до теперішнього часу найбільш вивчені прості види течії однофазної рідини. Не дивлячись на те, що дослідженню закономірностей потоків присвячено досить багато робіт, гідромеханіка таких потоків ще далека від свого задовільного рішення – недостатньо вивчені тангенціальні характеристики при уповільненні руху потоку, розподіл дотичних напруг по довжині каналу. Такий стан проблем обумовлює труднощі експериментального і теоретичного досліджень.

Існуючі небагаточисленні методи розрахунку однофазних потоків носять вельми частковий характер. В основному вони базуються на теорії граничного шару з використанням різних модифікацій гіпотези Прандтля про довжину шляху змішування.

В той же час наявність в техніці значної кількості двофазних потоків диктує необхідність їх ретельного вивчення. Експериментальні і теоретичні дослідження таких потоків вкрай нечисленні. В більшості випадків основною метою є отримання технічних характеристик досліджуваних об'єктів без глибокого аналізу потоку, тому на сьогоднішній день практично відсутні дані по кінематиці руху складових двофазного середовища, характеристикам тертя, полям концентрації домішок в каналі сопел.

Складна структура двофазного потоку і відсутність надійного експериментального матеріалу ускладнює його математичний опис. У зв'язку з цим до теперішнього часу ще не створені фізично обґрунтовані інженерні методи розрахунку двофазних потоків.

**Висновки**

Як впливає з вищенаведеного, методам математичного моделювання процесів, що відбуваються в струєформуючих елементах пристроїв для гідро- та гідроабразивного розрізання до теперішнього часу приділялося недостатньо уваги. Але відомо, що за рахунок використання елементів струменеформуючих пристроїв раціональних параметрів можна збільшити швидкість різання в 2 - 2,5 рази за інших рівних умов. Найбільш точними і ефективними методами дослідження, що дозволяють також описати фізичний стан потоку та можуть бути використані при розробці математичної моделі формування високошвидкісного струменя рідини, що містить абразив, є методи чисельного моделювання, засновані на виборі і рішенні рівнянь, які описують течію двофазної рідини в прискорюючому каналі струменеформуючого пристрою.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Клапцов Ю.В., Панасюк І.В., Петко І.В. Визначення основних параметрів гідрорізного устаткування для розкрою матеріалів на основі хлоропренового каучуку // Вісник Хмельницького національного університету .– 2006. – № 2. – с.44–47.
2. Ю.В.Клапцов, І.В. Петко, І.В. Панасюк. Дослідження впливу конструктивних параметрів устаткування на продуктивність гідроабразивного розрізання// Вісник Хмельницького національного університету . – 2007.– № 1.– с.– 25–28.
3. Белоцерковский О.М. Численное моделирование в механике сплошных сред. - М.: Наука, 1984. – 520 с.
4. Математическое моделирование и эксперимент / Г.Я.Любарский, Р.П.Слабоспицкий, М.А.Хажумратов, Р.И.Дцушкина. – К.: Наук.думка, 1987. – 160 с.
5. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена / Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
6. Косой Г.М., Сапешко В.В. Динамика движения твердых частиц во вращающихся турбулентных потоках жидкости // ТОХТ .– 1980.– т. XIV.– № 3.– с. 452–456.
7. Смирнов Е.М. Автомодельное решение уравнений Навье-Стокса для закрученного течения несжимаемой жидкости в круглой трубе // Прикладная математика и механика.– 1981.– т.45.– № 5.– с. 835 – 839.
8. Третьяков В.В., Ягодин В.И. Расчетное исследование турбулентного закрученного течения в трубе // ИФЖ.– 1979.– т. XXXV.– № 2.– с. 254 – 259.
9. Гельфгат Ю.М., Семин М.И. Влияние массовых сил на распределение дисперсной фазы в цилиндрическом вихре двухфазной жидкости // Изв. АН Латв.ССР.– Серия физич. и техн. наук.– 1950.– т.1, с. 32 – 42.
10. Вышенский В.В., Кочетков О.П. Троянкин Ю.В. Расчет движения вращающихся частиц в циклонной камере // Высокотемпературные технол. процессы и аппараты.– М.– 1980.– с. 29 – 39.
11. Лидли. Расчет инертных турбулентных закрученных потоков // Ракетная техника и космонавтика.– 1973.– № 7.– с. 75 – 82.

12. Себечи Т., Херш Р.С., Уайтло Дж. Х., О расчете характеристик ламинарных и турбулентных пограничных слоев с учетом влияния продольной кривизны обтекаемой поверхности // Ракетная техника и космонавтика.– 1979.– т.17.– № 4.– с. 140 – 142.
13. Арбузов В.Н., Шияев М.И. О диффузионном разделении частиц в закрученном турбулентном потоке // Физическая гидродинамика и тепловые процессы.– 1980.– №1.– с. 21 – 29.
14. Роуч П. Вычислительная гидродинамика : Монография .– М.– Мир.– 1980.– 616 с.
15. Patankar S., Spolding D. A finite-difference procedure for solving the equations of the two-dimensional boundary layer // Int. Journ. Heat Mass Transfer.– 1967.– Vol. 10.– № 4.– p.1389 – 1411.
16. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Гидродинамика двухфазных сред: Монография.– М.: Энергоиздат, 1981.– 472
17. Wattendorf F.L. A Study of the Effect of Curvature on Fully Developed Turbulent Flow // Proc. of the Royal Soc.– 1935.– Vol. 148.– p. 565 – 598.
18. Филиппов А.А. Турбулентный пограничный слой начальных участков осесимметричных каналов при наличии закрутки потока на входе // ИФЖ.– 1979.– т.ХVII.– № 1.– с. 95 – 102.
19. Соу С. Явления завихрения в коническом диффузоре // Ракетная техника и космонавтика.– 1967.– № 6. – с. 20 – 28.
20. Зубец П.Ф., Фафурин А.В., Холодкова О.Ю. Турбулентный пограничный слой в начальном участке трубы при наличии поперечного потока вещества и закрутки на входе // Труды КАИ.– Казань.– 1973.– Вып. 153.– с. 43 – 47.
21. Мигай В.К., Голубов Л.И. Трение и теплообмен в турбулентном закрученном потоке с переменной круткой в трубе // Изв. АН СССР. Энергетика транспорт.–1969.– № 6.– с. 141 – 144.
22. Кинни Р.Б. Универсальное подобие скоростей в полностью турбулентных вращающихся потоках // Труды американского общества инженеров-механиков.– Серия Е.– 1967.– № 2.– с. 199 – 206.

Надійшла 09.06.2010

УДК 677.025.3

## КОНТРОЛЬ-АНАЛІЗ ВВЕДЕННЯ ЧИСЛОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Ю.М. ПИЛИПЕНКО, Л.П. ГОЛУБЄВ

Київський національний університет технологій та дизайну

*У роботі досліджені процеси контролю і аналізу введення числової інформації для вирішення завдань легкой промисловості на ПК. Розроблен алгоритм і програма рішення задачі безпомилкового введення багатопараметричних даних*

Велика кількість задач легкой промисловості містять в собі багатовимірні числові величини. Так, наприклад, при роботі з нитками ми можемо розглядати: діаметр нитки, міцність нитки на розрив, стійкість до стирання, вологість, розтяжність в залежності від вологості, довжину і т. д.. Тому при введенні числових параметрів (а їх може бути не один десяток, особливо коли ми працюємо з декількома матеріалами) до програм у нас завжди виникає потреба у контролі за введенням інформації.

### **Постановка завдання**

Розробка алгоритму та програми аналізу та контролю введення числової інформації.