

УДК 621.182

П.М. Райтер

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТЕЙ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ КОНТРОЛІ СТРУКТУРИ ГАЗОРІДИННИХ ПОТОКІВ СВЕРДЛОВИН

В статті викладено особливості методик оцінювання невизначеностей вимірювань при контролі структури та витрати фаз газорідних потоків свердловин. Обґрунтовано доцільність контролю структури потоку для визначення метрологічних характеристик систем контролю і визначені проблеми, які з цим пов'язані. Проведено аналіз типових структур багатofазних потоків та впливу режиму потоку на формування сумарної невизначеності. Наведено залежності розрахунку невизначеності вимірювань на основі квадратурного та Монте-Карло методів.

Ключові слова: невизначеність вимірювань, Монте-Карло метод, газорідний потік, режим потоку, структура потоку, чутливість, квадратурний метод.

Вступ

Застосування традиційних систем контролю багатofазних (зокрема газорідних) потоків експлуатаційних свердловин нафтогазових та газоконденсатних родовищ вимагає, щоб складові або «фази» потоку свердловини були повністю сепаровані перед вимірювальною ділянкою. Дана вимога звичайно забезпечується автоматично при вимірюванні загального видобутку на виході традиційної технологічної установки первинної переробки сировинного потоку. Головною метою установки є прийняття на вході сукупності потоків від свердловин родовища та видача на виході готових до транспортування (а отже і контролю складу та витрати) стабілізованих потоків окремо кожної з фаз суміші. Однофазні системи вимірювання, як правило, забезпечують належні високопродуктивні вимірювання вуглеводневої продукції.

Потреба в багатofазному вимірюванні виникає тоді, коли необхідним або бажаним є контроль структури та витрати фаз потоку або потоків свердловин перед вхідною сепарацією і/або за умов видобутку (нафти, конденсату або газу) з двох продуктивних інтервалів через одну свердловину. Технологія поточних багатofазних вимірювань є захоплюючою альтернативою, так як вона дозволяє вимірювання «необроблених» потоків в герметичних шлейфових трубопроводах безпосередньо на виході свердловин [1]. Поряд з цим, використання багатofазних витратомірів призводить до збереження ресурсів при початковій інсталяції обладнання.

Багатofазні витратоміри забезпечують неперервний моніторинг продуктивності свердловини і, таким чином, краще дослідження свердловини в процесі видобутку (пробну експлуатацію з метою вивчення родовища і виявлення запасів) або відбору пластового флюїду з колектора [3].

Одне з обмежень технології багатofазних вимірювань є закономірне зростання невизначеності вимірювань. Основним джерелом такої високої невизначеності вимірювань в порівнянні з системами однофазних вимірювань є те, що вони вимірюють «необроблені» та набагато більш складні потоки порівняно з однофазними витратомірами [2].

Другим обмеженням технології контролю багатofазних потоків є методична та інструментальна складність відбору репрезентативних проб потоку [9, 10], що зумовлено нестабільністю проб. Навіть, наприклад, на однофазних виходах традиційного тестового сепаратора, нерідко реєструються проби різних за структурою флюїдів. Крім того, застосування більшості багатofазних витратомірів, які на даний час наявні на ринку, вимагає апріорної інформації про властивості контрольованих потоків (густина, діелектрична проникність нафти, електропровідність/солоність води), а отже ця інформація повинна бути доступною і поновлюваною на регулярній основі.

На даний час на ринку доступна значна кількість різних типів витратомірів, в основу функціонування яких покладено різноманітні вимірювальні принципи і методи [1, 2, 5, 6, 8 – 10]. Як правило визначені типи витратомірів працюють краще у конкретних умовах застосування. Тому нагальним є детальний відбір і порівняння з метою забезпечення оптимальної інсталяції витратоміра для кожного специфічного використання. Одним з основних параметрів такого порівняння та відбору і є власне невизначеність вимірювання таких систем. Але враховуючи вище наведені особливості технології контролю багатofазного потоку методологія визначення невизначеності таких систем має принципові відмінності від такої методології для аналогічних систем контролю однофазних потоків. Тому на нашу думку доцільно дослідити основні особливості такої методології.

Особливості структури потоків

Багатофазний потік є комплексним явищем, яке є складним для розуміння, прогнозування та моделювання [5]. Загальновідомі характеристики однофазного потоку, такі як еюра швидкостей, турбулентність, приграничний шар, як правило є неприйнятними для опису структури багатофазних потоків. Структури потоку класифікуються у вигляді режимів потоку, характеристики яких залежать від визначеного числа параметрів. Розподіл фаз флюїду в просторі і в часі є відмінним для різних режимів потоку, і, як правило, є некерованим розробником родовища чи оператором.

Режими потоку змінюються в залежності від режимів експлуатації, властивостей флюїдів, витрат фаз потоку та орієнтації і геометрії труби з потоком флюїдів. Визначення режимів потоків в трубах в робочих умовах - достатньо складне завдання. В промислових умовах для ідентифікації режиму, як один з варіантів, описується аналіз флуктуацій локального тиску і/або густини, що визначається експериментально за допомогою гама денситометрії [4]. В лабораторних умовах режими потоку можуть бути вивчені безпосередньо шляхом візуального спостереження з використанням прозорих секцій труб. Опис режимів потоку є в деякій мірі умовним, так як їх ідентифікація залежить багато в чому від спостерігача та його інтерпретації.

Основними механізмами, що відіграють активну роль в формуванні режимів потоку є: 1) ефекти впливу нестабільності потоку, 2) ефекти впливу геометрії або рельєфу труби, 3) гідродинамічні ефекти, та 4) комбінація вище наведених складових впливу.

Нестабільність потоку - результат змін стану потоку із-за зміни границі між його фазами. Характерними прикладами операцій, які спричиняють нестабільний режим течії суміші є відкривання або закривання засувки.

Ефекти впливу геометрії та рельєфу трубопроводу на режим потоку виникають як результат змін розмірів трубопроводу або його нахилу до лінії горизонту. Зокрема, такі ефекти особливо важливі на ниспадаючих ділянках прокладених по морському дну трубопроводів. Режими потоку, генеровані в таких умовах, є превалюючими на протязі кількох кілометрів. Наслідком впливу вказаного ефекту є різке зростання пробкоутворення в потоці та гідроударів в обладнанні промислу.

За відсутності ефектів нестабільності та впливу геометрії/рельєфу, режим потоку повністю визначається гідродинамічними ефектами, тобто витратами фаз потоків, властивостями флюїдів та діаметром трубопроводу. Режим потоку на прямих ділянках труби відомий під назвою "гідродинамічний" режим потоку.

Всі гідродинамічні режими потоку прийнято класифікувати на дисперсний потік, розшарований потік, перемежований потік, та комбінація цих трьох потоків, як ілюструється на рис. 1.



Рис. 1. Характерні гідродинамічні режими потоку

Дисперсний режим потоку ($L_D = 0$) формується, коли маленькі частки однієї фази дифузно розсіяні в другій, домінуючій фазі: бульбашковий потік газу в нафті та потік крапель нафти в газовому потоці. Розшарований потік ($L_S = 0$) характеризується відсутністю однорідності фазового розподілу в радіальному напрямку та наявністю такого в аксіальному напрямку: розшарований та кільцеподібний потоки. Перемежований потік характеризується неоднорідністю в аксіальному напрямку і тому проявляє локально нестабільний режим течії: режими з газовими витягнутими бульбашками в потоці рідини, спінені та пробкоподібні потоки. Проаналізовані особливості структури багатофазного потоку суттєво ускладнюють вибір методики оцінювання методичної складової невизначеності вимірювань таких потоків.

Особливості застосування методів оцінювання невизначеності вимірювань

Значення витрат фаз багатофазного флюїду односторонньо отримуємо з функціональної залежності між цілим рядом процесів вимірювань, котрі всі повинні бути взяті до уваги, коли аналізується невизначеність вимірювання потоку. Ці комплексні залежності часто в подальшому є поєднані (змішані) [11]. Тому є проблематичним оцінювання невизначеності таких систем за допомогою традиційного квадратурного методу, тобто знаходження сумарної невизначеності через корінь квадратний з суми квадратів (ККСК) окремих складових. Надійний альтернативний систематичний метод визначення невизначеності – метод Монте-Карло, який може також бути використаний як незалежна перевірка квадратурної невизначеності [9].

Аналітично невизначеність індивідуальних фаз потоку визначається, як правило, з використанням методу ККСК. Ця методика базується на центральній граничній теоремі (ЦГТ), у відповідності з якою, розподіл сумарної невизначеності при поєднанні більше чотирьох розподілів невизначеностей буде близький до нормального. На практиці, результуючі розподіли невизначеностей можуть не бути цілком

нормальними. За методом ККСК невизначеність U_y , для опосередкованого вимірювання при відомій функціональній залежності:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

та визначених невизначеностях вимірювання (U_i) входів (x_i) і чутливостях (Θ_i) виходів до відповідних змін на входах розраховується таким чином:

$$U_y = \frac{\sqrt{(\Theta_1 U_1 x_1)^2 + (\Theta_2 U_2 x_2)^2 + \dots + (\Theta_n U_n x_n)^2}}{y} \quad (2)$$

Невизначеність може також бути знайдена на основі девіації кожного входу функціональної залежності в межах вхідної невизначеності. Цей метод, також відомий як метод збурень-перетурбацій, враховує чутливість, яку немає необхідності окремо розраховувати. Невизначеність визначається з функціональної залежності рівнянні (1) як:

$$U_y = \frac{\sqrt{\left(\frac{\Delta U_1 x_1}{\Delta y_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta U_2 x_2}{\Delta y_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\Delta U_n x_n}{\Delta y_n}\right)^2}}{y} \quad (3)$$

Для того щоб знайти чутливість (Θ_i) на виході (y) функціональної залежності для кожного входу (x_i) виконується детальний аналіз чутливості кожної функціональної залежності у вимірювальній системі шляхом аналітично визначених часткових похідних або визначенням відхилень за допомогою чисельних методів.

Аналітично визначена чутливість (Θ_{Ax_i}) для вхідного параметра (x_i) знаходиться як часткова похідна вихідної функції ($y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$) по відношенню до i -го входу:

$$\Theta_{Ax_i} = \frac{dx_i}{dy} f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (4)$$

Цей підхід оптимально підходить для простих функціональних залежностей з малим числом вхідних параметрів. Але фактично немає і не можливо знайти часткові похідні для функціональних залежностей, що є складними або негладкими або коли є в наявності велика кількість входів. Рекомендується в такому випадку часткові похідні знаходити за допомогою програмного забезпечення для вирішення математичних задач.

Чисельно визначена чутливість (Θ_{Nux_i}) для функції з одним входом знаходиться шляхом формування малого відхилення на вході ($x_i \pm \Delta x_i$), яке, як правило, за величиною дорівнює абсолютній невизначеності ($\Delta x_i = u_{xi}$), і спостереження відповідної зміни на виході ($\Delta y_i = f(x) - f(x_i)$):

$$\Theta_{Nux_i} = \frac{\Delta x_i}{\Delta y_i} \quad (5)$$

Коли функція має більше ніж один вхід, розрахунок за рівнянням (5) повинен бути повтореним для кожного входу. Визначення чутливості чисельно виконується для складних функціональних залежно-

стей або функцій з великим числом входів. У вимірювальних моделях або системах з спільно використовуваними входами і більше, ніж одним виходом, таких як багатозональні витратоміри, відхилення по кожному виході повинні бути виділені у відповідності з тим, які є наявні фізичні відхилення на кожному вході. Коли наявна функціональна залежність є дуже складною або взагалі відсутня, так як за імітаційного моделювання технологічного процесу, тоді чутливість може знаходитись відхиленням входу та спостереженням зміни на виході. Чутливість може бути знайдена емпірично шляхом спостереження за контрольованими умовами течії потоку свердловин, фактично змінюючи параметри процесу для того, щоб визначити зміну на виході. В деяких випадках зміна одного входу буде здійснювати вплив на інший, і це повинно прийматись до уваги. Прикладом може бути спосіб, в якому виконується зміна ступеня відкриття засувки, що приводить до зміни таких параметрів потоку як тиск на гирлі свердловини і ймовірно тиск в головці насосно-компресорних труб, який також буде впливати на істинний газовміст (величину площі перерізу труби зайняту газом) [8]. Можна також використовувати моделі імітації технологічного процесу з метою визначення чутливості методом змінювання входів моделі.

Доцільним є застосування методу Монте-Карло моделювання (МКМ) - чисельного методу, в якому значення дисперсії сенсора навколо вимірюваного значення моделюється випадково генерованими числами з нормальним або іншим типовим розподілом [7]. Модельоване пробне значення для кожного параметра багаторазово вводиться до функціональної залежності до тих пір, поки не буде генерована достатня кількість пробних значень. Невизначеність знаходиться за розрахунком середньоквадратичним відхиленням результуючого розподілу пробних значень, використовуючи залежність, запропоновану [9]:

$$U_y = \frac{2 \times \text{stddev}(\text{trials}(f(x_1, x_2, \dots, x_n)))}{\text{mean}(\text{trials}(f(x_1, x_2, \dots, x_n)))} \quad (6)$$

Основна перевага МКМ - виключення необхідності детального математичного або чисельного аналізу чутливості, і в той же час МКМ є незалежний засіб для перевірки комбінованої невизначеності, знайденої квадратурними методами. Невизначеність сенсорів та інших входів з несиметричним розподілом невизначеності, залежність між входами та зміщення поширюються далі через функціональну залежність на вихід.

В цілому, при вимірюванні однофазного потоку, ефекти коваріації та залежності між входами є малими, оскільки відносно незмінні та взаємно незалежні невизначеності входів. Моделі вимірювання багатозонального потоку є в загальному складними, з

значною залежністю між параметрами. Квадратурні методи вимагають незалежності невизначеності кожного входу, щоб невизначеність одного з входів не впливала на інший. Взаємозалежність може збільшуватись під дією впливів оточуючого середовища, таких як статичний тиск і температура, від взаємодії між сенсорами або від наявного математичного взаємозв'язку пов'язаних значень в наступних розрахунках. Значення сенсорів у вимірюванні багатозафазних потоків використовують в окремих функціональних залежностях з метою знаходження водовмісту, газовмісту багатозафазного потоку і швидкості. Коли ці параметри використовуються для знаходження витрат фаз потоку, існує залежність, яка може призводити до завищення або заниження кінцевої невизначеності. Витрати фаз є в такому випадку не незалежними одна від одної, і це треба мати на увазі в подальшому застосуванні даної інформації.

Висновки

Обґрунтовано доцільність контролю структури потоку для визначення метрологічних характеристик систем контролю і визначені проблеми, які з цим пов'язані. На базі аналізу типових структур багатозафазних потоків показано вплив режиму потоку на формування сумарної невизначеності. Наведено залежності розрахунку невизначеності вимірювань на основі квадратурного та Монте-Карло методів.

Список літератури

1. Райтер П.М. Методи та засоби оброблення інформації для контролю структури та витрати газорідних потоків: монографія. / П.М. Райтер, О.М. Карнаш. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2009. – 262 с.
2. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества: справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. Отд-ние, 1989. – 701 с.
3. Oil companies' needs in multiphase flow metering Proc / W.F.J. Slijkerman, A.W. Jamieson, W.J. Priddy, O. Ok-

land, H. Moestue // 13th North Sea Flow Measurement Workshop. – Lillehammer, Norway, 1995.

4. Abouelwafa M.S.A. 1980 The measurement of component ratios in multiphase systems using g-ray attenuation J / M.S.A. Abouelwafa, E.J.M. Kendall // Phys. E: Sci. Instrum. – 1980. – 13. – P. 341.

5. API TP 2566 State of the art Multiphase Flow Metering. American Petroleum Institute (2004) Committee on Petroleum Measurement (COPM) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.api.org/cat/>.

6. API RP – 85 Use of Subsea Wet gas Flow meters in Allocation Measurement Systems. American Petroleum Institute (2005) Upstream Allocation Task Group (UATG) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.api.org/cat/>.

7. Zakharov I.P. Application of Monte Carlo simulation for the evaluation of measurement uncertainty / I.P. Zakharov, S.V. Vodotyka // Metrology and Measurement system. – 2008. – Vol. XV, N. 1. – P. 118-123.

8. Falcone G. Multiphase Flow Metering: Principles and Applications / G. Falcone, G.F. Hewitt, C. Alimonti // 54 (Developments in Petroleum Science) – Elsevier Science; London. – 2009. – ISBN: 978-0-444-52991-6.

9. API RP 86 UATG Recommended Practice for Measurement of Multiphase Flow (2005) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.api.org/cat/>.

10. Handbook of Multiphase Flow Metering. Revision 2 (2005): The Norwegian Society for Oil and Gas Measurement (NFOGM) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: www.nfogm.no; The Norwegian Society of Chartered Technical and Scientific Professionals (Tekna) [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: www.tekna.no. – ISBN 82-91341-89-3

11. Райтер П.М. Особливості метрологічного аналізу системи безсепараційного контролю структури та вимірювання витрати фаз / П.М. Райтер, Л.А. Витвицька // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. – X: XV ПС, 2009. – Вип. 6 (80). – С. 100-107.

Надійшла до редколегії 23.03.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. І.П. Захаров, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків.

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНИВАНИЯ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ КОНТРОЛЕ СТРУКТУРЫ ГАЗОЖИДКОСТНЫХ ПОТОКОВ СКВАЖИН

П.Н. Райтер

В статье изложено особенности методик оценивания неопределенностей измерений при контроле структуры и расхода фаз газожидкостных потоков скважин. Обосновано целесообразность контроля структуры потока для определения метрологических характеристик систем контроля и определены связанные с этим проблемы. Выполнен анализ основных структур многофазных потоков и влияния режима потока на формирование суммарной неопределенности. Приведены зависимости расчета неопределенности измерений на основе квадратурного и Монте-Карло методов.

Ключевые слова: неопределенность измерения, Монте-Карло метод, газожидкостный поток, режим потока, структура потока, чувствительность, квадратурный метод.

MEASUREMENT UNCERTAINTY EVALUATION FEATURES FOR WELL GAS-LIQUID FLOW STRUCTURE MONITORING

P.M. Rayter

At article the measurement uncertainty evaluation technique features for well gas-liquid flow structure and phase flow rate monitoring are presented. The flow structure monitoring practicability for measurement system metrological examination is explained and difficulties hereto related are defined. Multiphase flow basic regimes and flow regime effect to the combined uncertainty determination has been analyzed. Quadrature methods and Monte Carlo Simulation relations have been presented for the uncertainty evaluation.

Keywords: measurement uncertainty, gas-liquid flow, flow regime, flow pattern, quadrature methods, Monte Carlo Simulation.