

УДК 681.121.89.082.4

Н. И. Михеев, Д. В. Кратиров, И. И. Саушин,
В. А. Фафурин

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАДУИРОВКИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО РАСХОДОМЕРА ПРИРОДНОГО ГАЗА

Ключевые слова: ультразвуковой расходомер, градуировка, численное моделирование.

Представлены основные технические проблемы, возникающие при использовании ультразвуковых датчиков расхода в решении которых возможно использование численного моделирования как более дешевого и быстрого способа анализа. Проведен обзор по использованию численного моделирования при градуировке ультразвуковых расходомеров в странах Европы и США. Проведены численные расчеты проточного течения с последующей градуировкой выпускаемого серийно ультразвукового расходомера «Ирвис РС4-ультра». Сформулированы основные трудности, возникающие при решении данной задачи и вывод о возможности использования численного моделирования для градуировки ультразвуковых расходомеров.

Keywords: ultrasonic flow meter, calibration, CFD.

The main technical problems arising from the use of ultrasonic flow meters in the decision you may use CFD simulation as a cheaper and faster way of analysis. A review on the use of CFD simulation in the calibration of ultrasonic flowmeters in Europe and the U.S.. CFD calculations of the flow-through, followed by graduation mass-produce ultrasonic flowmeter "Irviss RS4-ultra." Formulate the main difficulties in solving this problem and conclude the possibility of using numerical simulation for the calibration of ultrasonic flowmeters.

Введение

Для всех, без исключения, расходомерных устройств принципиально важна процедура корректного переноса измерений с условий первичной градуировки на условия измерений в условиях эксплуатации. Первичная градуировка (поверка) подразумевает, в основном, выяснение инструментальных погрешностей расходомера, как средства измерения (СИ) в специально созданных идеальных условиях поверочной лаборатории. В условиях эксплуатации возникает целое множество влияющих факторов: температурные перепады окружающей и измеряемой сред, вибрации трубопроводов, нестационарность течения, избыточное давление, отличная от поверяемой среда и т.п.

Одним из основных, влияющих на корректность измерений, факторов является структура течения: профиль скорости, степень турбулентности, закрутка потока в измерительном сечении расходомера.

Структура течения, в свою очередь, зависит от конфигурации трубопроводов вблизи измерительного сечения, наличия и типов регулирующих устройств, запорной арматуры, возникающих при этом акустических и гидродинамических пульсаций. Для сохранения корректности измерений в условиях эксплуатации в общем случае возможны следующие два варианта.

1. Установка в условиях эксплуатации до и после измерительного сечения прямых участков, имеющих длину, достаточную для компенсации «вредного» влияния на структуру течения конкретной обстановки в трубопроводах.

2. Непосредственно в измерительном сечении проводить оценку состояния потока, делая вы-

воды о возможности измерений и внося, при необходимости, соответствующие поправки.

В реальной практике экономическая целесообразность заставляет разработчиков и потребителей приборов постоянно искать разумный компромисс между обеспечением корректности измерений и компактностью монтажа.

До недавнего времени, точнее до цифровой эры, задача корректности всегда решалась по первому варианту. Путем многочисленных, гигантских по трудоемкости экспериментальных исследований, комбинируя конфигурации трубопроводов, выяснялись размеры (длины) компенсирующих прямых участков для того или иного типа расходомерных устройств в тех или иных условиях воздействия гидродинамических сопротивлений.

Наглядным примером такого подхода является массово применяемый расходомер переменного перепада давления (РППД), для которого за долгие годы его использования накоплены самые обширные экспериментальные сведения. Эти результаты обобщены и сведены в нормативных документах в ранге национальных стандартов для большинства измеряемых сред, типов гидравлических сопротивлений и характеристик самого расходомера. Экспериментальный материал настолько обширен, что национальный стандарт позволяет уверенно прогнозировать размер погрешности РППД, обходясь без индивидуальной градуировки. В этом подходе вопрос компактности монтажа СИ в трубопроводе решается применением выпрямителей, кондиционеров потока и тому подобных устройств.

Реализация второго подхода стала возможной сравнительно недавно благодаря появлению СИ с мощными вычислительными возможностями. Так

в классе ультразвуковых многоканальных расходомеров осуществляется «прямое сканирование» структуры измеряемого потока и интегрирование на основании этого расхода.

Бурное развитие численных методов моделирования, в том числе в области гидродинамики, не могло не отразиться на рассматриваемой проблеме в обоих вариантах ее решения.

Применение численного моделирования в первом варианте дает возможность оценки дополнительных погрешностей, возникающих при отклонении условий измерений от нормированных значений, не проводя при этом дорогостоящих экспериментальных исследований.

Во втором подходе результаты численного моделирования по сути дела внедрены в алгоритмы контроллера самого СИ расхода для распознавания структуры потока и ведения измерений с учетом вырабатываемых поправок в реальном масштабе времени.

В настоящее время «пространство» численного моделирования, так сказать, расслоилось на оригинальные коды и коммерческие пакеты, специально созданные для того или иного круга отраслевых задач.

Создание оригинального кода оправдано в случае очень ответственных (например, атомная энергетика) или пионерских (например, нанотехнологии) задач. Для создания оригинальных программных продуктов требуются определенные традиции, школа, весьма значительные время и финансовые средства. В расходомерных приложениях целесообразно использовать готовые коммерческие продукты, соответствующим образом отестированные, подтвержденные экспериментально в грамотно локализованных условиях режимов течения.

Сказанное о перспективах численного моделирования не отменяет экспериментальных проверок расчетов. Применение той или иной модели турбулентности, например, может существенно повлиять на результаты цифрового эксперимента. Критерием годности расчета становится качественное или количественное совпадение с реальными экспериментальными данными.

Представленное исследование посвящено одноканальному ультразвуковому расходомеру природного газа «ИРВИС РС4-Ультра» изображенного на рисунке 1, данный расходомер в настоящее время достаточно широко используется в нефтегазовой промышленности. Задача компактности монтажа частично решается в нем за счет специальной конфигурации проточной части самого расходомера. Это позволяет сформировать структуру течения с устойчивыми и заранее прогнозируемыми свойствами непосредственно в сечении измерения. Особенно актуально это для области малорасходных измерений, где стоимость измерений выходит на одно из первых мест и не позволяет применить более одной пары ультразвуковых датчиков расхода.

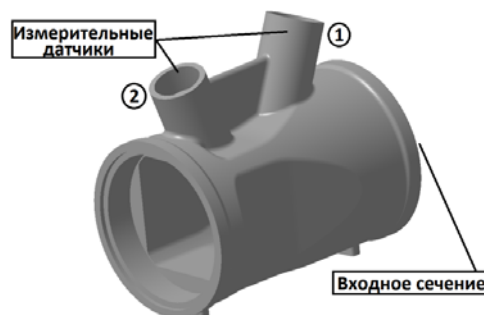


Рис. 1 – Проточная часть ультразвукового расходомера «Ирвис РС4-Ультра»

Обзор зарубежных исследований в области численного моделирования ультразвуковых расходомеров

В данной работе с помощью CFD (Computational Fluid Dynamic – Численная газовая динамика) моделирования определяется влияние геометрической формы проточной области ультразвукового расходомера на профиль течения, рассчитывается время прохождения ультразвукового сигнала; приведено сравнение коэффициента преобразования, полученного численным путем и экспериментально.

CFD моделирование течения в проточной области ультразвуковых расходомеров рассматривалось в работах [1, 2, 3], в которых сделаны выводы о целесообразности применения данного подхода при решении задач ультразвуковой расходомерии. В [1] CFD моделирование использовалось для расчета тепловых и гравитационных эффектов от течения высоковязкой нефти в проточной области ультразвукового расходомера. В [2] исследовалось влияние формы трубопровода на погрешность измерений, также произведен сравнительный анализ результатов эксперимента и численного моделирования. Выводом из этих исследований служит заключение о возможности использования численного моделирования для:

- определения причин погрешностей возникающих при измерении;
- оценки величины погрешности измерений;
- оценки эффективности мер по устранению причин погрешностей измерения;
- экстраполяции лабораторных экспериментов на практическое применение;
- оценки альтернативных конфигураций ультразвуковых расходомеров;
- оценки влияния таких факторов как шероховатость стенок трубы, граничных условий на погрешность ультразвукового расходомера.

Помимо проточной части расходомера в ряде работ предлагается производить расчет течения и для участка трубы перед ним, что объясняется необходимостью формирования развитого профиля течения на входе в расходомер. В работах [3,4, 5] при проведении экспериментов для обеспечения корректных измерений предлагается использовать перед ультразвуковым расходомером участок трубы длиной 10 диаметров проточного сечения (в случае отсутствия поблизости узлов, заведомо дестабили-

зирующих течение, таких как регулирующий клапан или изгиб магистрали). Также перед датчиком можно использовать специальные технические устройства (кондиционеры потока, расходомерные сопла), позволяющие повысить точность измерений [8,9,10]. На основании полученных в этих работах результатов можно сделать вывод, что длина прямого участка 10 диаметров является минимально допустимой при проведении экспериментов и расчетов с ультразвуковыми расходомерами.

Параметры расчетной модели и граничные условия

При построении геометрической модели принималось, что участки стыковки элементов трубопровода являются идеально ровными, а внутренняя поверхность трубопровода – чистой, без налета, который возникает во время промышленной эксплуатации. Учет вышеизложенных факторов является совершенно другой и не менее трудоемкой задачей гидродинамики, решение которой авторами планируется в ближайшем будущем.

Геометрия проточной области расходомера в виду учета течения в кавернах, где расположены ультразвуковые датчики, не является тривиальной, вследствие чего возникает необходимость использования гексаэдральных сеточных элементов. Выбор модели турбулентности также является не однозначной задачей. Помимо выбора между классическими моделями класса k-ε и k-ω возникает необходимость расчета течений с малым числом Рейнольдса, что вызывает дополнительные трудности. При выборе размера ячеек вблизи пограничного слоя течения учитывалась величина y^+ – безразмерное расстояние от узла на стенке канала до ближайшего узла в области течения. Исходя из используемой модели турбулентности k-ε или k-ω, значение y^+ варьировалось в интервалах (1;5) и (5;20) соответственно [6].

Искомой величиной является зависимость поля скоростей течения в проточной области ультразвукового расходомера от числа Рейнольдса. При численном моделировании (в случае сохранения геометрической модели неизменной) изменение величины числа Рейнольдса можно осуществлять с помощью изменения либо скорости течения, либо давления (плотности) рабочего газа. Общепринятым является первый подход, но в нашем случае изменение скорости течения осложняется следующим: при достижении неких значительных скоростей потока происходит смещение траектории распространения ультразвуковых колебаний настолько, что приемные датчики расходомеров перестают их чувствовать. Такую ситуацию сложно смоделировать численно и невозможно проверить экспериментально. В случае изменения давления подобных проблем не возникает. Скорость на входе в трубу при данной постановке во всех расчетах сохранялась равной 1 м/с.

Методика расчета поправочного коэффициента

Для определения времени прохождения ультразвукового сигнала использовалось полученное поле вектора скорости. Методика определения

коэффициента преобразования полностью идентична методике, применявшейся при обработке экспериментальных данных. Сам коэффициент вычисляется как отношение номинального расхода к расходу, полученного как произведение средней скорости течения, площади проходного сечения и времени:

$$k = \frac{Q}{T \cdot U_{cp} \cdot F},$$

где Q – номинальный расход, T – время, F – площадь проточного сечения, U_{cp} – средняя скорость течения в сечении.

Средняя скорость рассчитывалась по формуле:

$$U_{cp} = \frac{(x_1 + x_2) \cdot f}{2 \cdot \cos \varphi},$$

f – частотная характеристика:

$$f = \frac{d\tau}{\left(\tau_+ - \frac{dx_+}{a}\right) \cdot \left(\tau_- - \frac{dx_-}{a}\right)},$$

a – скорость звука, τ_+ и τ_- время прохождения звуковой волны по и против потока соответственно, dx_1 и dx_2 – длины траекторий, приходящихся на боковые отводы.

На рисунке 2 представлены коэффициенты преобразования для ультразвукового расходомера, полученные экспериментальным путем и с помощью CFD моделирования. Аналогично [1] область поделена на ламинарную, переходную и турбулентную. Экспериментальные данные представлены для случая, когда перед расходомером расположен участок прямой трубы длиной 30 условных диаметров. В первоначальном варианте расчета в целях упрощения модели из проточного сечения были исключены каверны ультразвуковых датчиков, данные «CFD 1» рисунок 3.

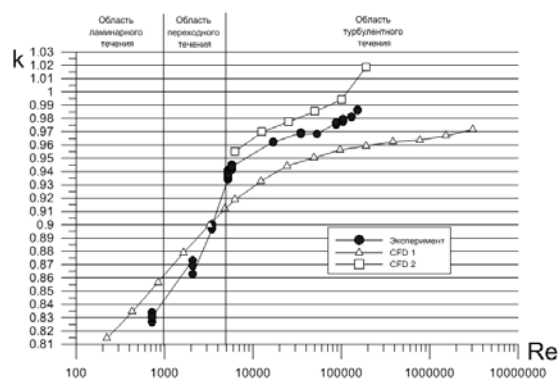


Рис. 2 – Коэффициент преобразования

Как оказалось, при этом погрешность численного моделирования составила порядка 5%, что является неудовлетворительным результатом, когда речь идет о расчете измерительного датчика. В целях уменьшения погрешности в расчетную модель были внесены некоторые изменения, в частности, добавлены каверны и более точно определены траектории ультразвуковых лучей данные, с которых используются при расчете коэффициента преобразования. К настоящему моменту времени для этой постановки получен набор данных для области тур-

булентного течения «CFD 2». Как видно из рисунка 3, помимо снижения погрешности до 1%, получено качественное совпадение с экспериментом. Помимо того не изменяющаяся погрешность в 1% наводит на мысль о различиях численной модели и экспериментального образца расходомера в плане масштабности геометрии. Численный анализ производился строго по конструкторским чертежам, а погрешность диаметра проточной части при отливке корпуса расходомера на 0,3 мм уже дает ту самую погрешность в 1% по площади проточного сечения. Проблема допусков при изготовлении ультразвуковых расходомеров достаточно хорошо раскрыта в [7].

Однако авторам пока не удалось получить положительных результатов для переходной области течения. Для специалистов занимающихся турбулентными течениями хорошо известен факт, что для каждого класса задач помимо выбора модели турбулентности необходима корректировка постановки выбранной модели. При проведении исследований в дискретно шероховатом канале авторами получена уникальная методика определения эмпирических констант $C_\mu, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$, модели турбулентности k-ε:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) &= -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\rho C_\mu k^2}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right\} - \rho \varepsilon - 2 \rho \varepsilon \frac{k}{\gamma R T} \\ \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) &= C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(-\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\mu + \frac{\rho C_\mu k^2}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right\} - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \right.$$

с помощью скоростной видеосъемки дымовой визуализации течения и последующей обработке данных. Из полученных векторов скорости отделяется средняя скорость и пульсационная составляющая, после чего рассчитываются все частные производные входящие в модель турбулентности. Далее с помощью метода наименьших квадратов минимизируется невязка относительно эмпирических констант и в результате находится набор констант, использование которых дает наименьшую погрешность при расчете турбулентных характеристик потока. Так, например, использование найденных констант позволяет снизить погрешность при расчете

теплообмена в прямоугольном канале с 4% до 0-1% при развитом турбулентном течении. В настоящий момент времени авторами ведется работа по адаптации данной методики к расчету ультразвукового расходомера, что возможно позволит снизить погрешность расчета для переходной области течения.

Общий вывод по проделанной работе совпадает с выводами [1]. Численные методы последовательно воспроизводят условия эксперимента. Было достигнуто хорошее совпадение экспериментальных и численных результатов. Однако, в некоторых случаях, не смотря на качественное совпадение, имеются количественные различия. По той причине, что CFD моделирование без тщательной проработки параметров расчетной модели пока не может рассчитать характеристики течения с точностью меньше 1%, его нельзя применять для калибровки ультразвуковых расходомеров без проведения лабораторных и натурных экспериментов.

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, соглашение №8078.

Литература

1. G.L. Morrison, T. B. Morrow. *Fourth International Symposium on Fluid Flow*. Denver, 2010.
2. N.A. Barton *Application and validation of CFD modeling methods. A report for National Measurement System Directorate*. 2002.
3. W.M.D. Wright, S.A. O'Riordan. *26th International Manufacturing Conference*. 2009.
4. D.E. Eisenhauer. *Using ultrasonic flow meters in irrigation application*. Institute of Agriculture and Natural Resources, 2008.
5. L. David. *American Gas Association: Operations Conference & Exhibition*. 2009.
6. D.C. Wilcox. *Turbulence Modeling for CFD*. DCW Industries, California, 1994. 477 p.
7. V. Herrmann. *3rd International SE Asia Hydrocarbon Flow Measurement*. 2004. .
8. Фафурин А.В., Шустрова М.Л. *Вестник Казан. технол. ун-та*. 20. 225-229. (2011).
9. Фафурин А.В., Шустрова М.Л. *Вестник Казан. технол. ун-та*. 22. 145-149. (2011).
10. Кратиров Д.В., Михеев Н.И., Молочников В.М., Фасхутдинов Р.Э., Фафурин В.А. *Вестник Казан. технол. ун-та*. 21. 140-144. (2012).

© Н. И. Михеев - д.т.н., проф., зав. лаб. исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН; Д. В. Кратиров - к.т.н., генеральный директор ООО НПП «Ирвис»; И. И. Саушин – асп. лаб. исследовательского центра проблем энергетики КазНЦ РАН; ilyasaushin@mail.ru; В. А. Фафурин – д.т.н., проф., зав. каф. систем автоматизации и управления технологическими процессами КНИТУ, зам. дир. ФГУП "ВНИИР".