

УДК 681.121

Коробко И.В., к.т.н., доц.
НТУУ «Киевский политехнический институт», г. Киев, Украина

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОТОКОВ ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ НА ОСНОВАНИИ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ НЕСОВПАДЕНИЯ КРИВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТЕЙ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЕЧЕНИЯХ

Korobko I.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine (i.korobko@kpi.ua)

THE DEFINITION OF SPATIAL HETEROGENEITY OF FLOW OF LIQUIDS AND GASES BASED ON ESTIMATION OF PROBABILITY DISTRIBUTION CURVES-SPEED MISMATCH IN CROSS SECTIONS

В работе проанализировано актуальность и проблемы измерения расхода и количества топливно-энергетических ресурсов и воды, определены основные требования к расходомерам и счетчикам жидкостей и газов, приведены пути повышения их метрологических характеристик та повышения эффективности процесса измерения. Рассмотрены факторы влияния на метрологические характеристики измерительных преобразователей расхода и определены основные из них. Показано, что на качество измерения существенно влияют гидродинамические характеристики измеряемых потоков жидкостей и газов, а особенно их неоднородность, в том числе несимметричность эпюр распределения скорости в поперечном сечении измерительного канала. Обосновано методика определения степени неоднородности скоростей в поперечных сечениях трубопроводов до и после измерительного преобразователя и в измерительной камере преобразователя с последующей оценкой влияния неоднородности потока на метрологические характеристики средства измерения. В основу разработанной методики заложено оценивание вероятности несовпадения кривых распределения скоростей в поперечных сечениях. За результатами такого оценивания разрабатываются рекомендации на усовершенствование самых измерительных преобразователей и места их установки на узле учета, что направлены на уменьшение погрешностей приборов и систем измерения расхода и количества жидкостей и газов.

Ключевые слова: измерение, расход, жидкость, газ, потоки, гидродинамика, неоднородность, асимметрия.

Введение. Постановка проблемы

Для создания эффективной системы энергосбережения необходимо реализовать эффективную систему измерения и учета расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР).

При разработке современных систем измерения расхода и количества жидкостей и газов возникает задача рационального выбора измерительных преобразователей расхода (ИПР), а также их размещения в трубопроводе с целью обеспечения выполнения измерений с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками. Кроме того, в последнее время возникает острая необходимость в измерении расхода и количества ТЭР при различной динамике их протекания - от постоянных до быстроизменяющихся как во времени, так и по величине. Это определяет необходимость создания новых и совершенствования существующих приборов и систем измерения расхода ТЭР с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками, а также разработке критериев определения места размещения ИПР на измерительном участке с целью обеспечения минимального влияния характеристик измеряемого потока на эффективность процесса измерения.

Целью исследования является разработка методики оценки пространственной неоднородности измеряемых потоков жидкостей и газов, составляющей методики определения оптимального размещения ИПР, которая направлена на измерение расхода и количества ТЭР с высокими метрологическими и эксплуатационными характеристиками.

Постановка задачи

Среди основных требований, которые предъявляются к измерительным преобразователям расхода ТЭР, главное значение имеют: точность измерения, максимальная независимость результатов измерения от изменения параметров измеряемой среды (плотности, давления, температуры, профиля скорости и др.),

минимальная зависимость метрологических характеристик от условий эксплуатации и повторяемость результатов измерений. Одним из факторов, которые влияют на данные требования, является пространственное распределение скорости движения жидкостей и газов [1,2].

Несмотря на все большее применение методов и приборов измерения расхода и количества ТЭРВ, методики выбора рационального типа ИПР для конкретных условий применения, на сегодняшний день не определены.

Исследования в этой области (П.П.Кремлевский, Л.Л.Бошняк, Л.Н.Бызов, А.А.Тупиченков, А.Ш.Киясбейли, В.І.Монаков, Г.Н.Бобровников, Л.А.Камышев, Б.В.Бирюков, С.С.Кивилис, В.Г.Цейтлин, Г.П.Катис, Л.М.Шонин, О.М.Павловский, и др.), в большей степени касаются принципов измерения, имеют приближенные решения взаимодействия жидкостных потоков с первичными измерительными преобразователями, полученные для случаев определенных потоков (ламинарных и турбулентных) и не учитывают гидродинамические процессы, которые происходят при взаимодействии быстрых и быстромменяющихся потоков с чувствительными элементами измерительных преобразователей, которые находятся в движении. Также, довольно упрощенное описание процессов измерения расхода энергоносителей не отражает всю разносторонность явлений, возникающих при работе ИПР.

В то же время такие ИПР нуждаются в совершенствовании, которое направленное на повышение их метрологических и эксплуатационных характеристик. В свою очередь, на качество измерения существенно влияют гидродинамические характеристики измеряемых потоков жидкостей и газов, а особенно их неоднородность, в том числе несимметричность эпюры распределения скорости по поперечному сечению измерительного канала.

Одним из наиболее перспективных подходов к решению выше описанной задачи является определение степени неоднородности скоростей в поперечных сечениях трубопроводов до и после ИПР, а также в измерительной камере самого преобразователя с последующей оценкой влияния неоднородности потока на метрологические характеристики средства измерения. При этом важным этапом решения таких задач является разработка методики оценки величины неоднородности скорости измеряемого потока по всей длине измерительного тракта. По результатам такой оценки рекомендации на совершенствование самих ИПР и места их установки на узле учета, направлены на уменьшение погрешностей приборов и систем измерения расхода и количества ТЭР.

Оценка неоднородности потока на основе оценки вероятности несовпадения кривых распределения скоростей в поперечных сечениях.

При измерении расхода и количества ТЭР происходит распространение и взаимодействие мощных пространственных турбулентных потоков жидкости на метрологические и эксплуатационные характеристики измерительных преобразователей расхода, поэтому необходимо определить реальные параметры векторного поля скоростей в различных поперечных сечениях потоков.

Современное развитие информационных технологий позволяет с высокой точностью исследовать с помощью системы CAD/CAE характер потока жидкостей и газов [3].

Одной из таких CAD /CAE систем является программная среда ANSYS, что позволяет с высокой точностью определить проекции векторов скоростей в дискретных точках потоков, как по поперечному сечению, так и по длине потока.

По результатам виртуального моделирования в среде ANSYS в каждом поперечном сечении измерительного тракта (рис.1) получаем значение проекций векторов скорости по четырем осям (диаметральных хордах) I-I ($0-0$); II-II ($\pi/4 - \pi/4$); III-III ($\pi/2 - \pi/2$); IV-IV ($3\pi/4 - 3\pi/4$) (рис.2).

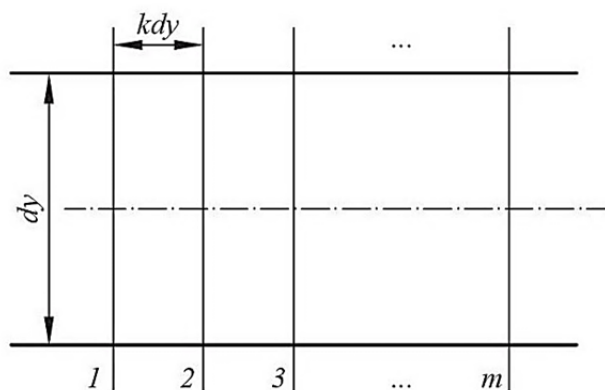


Рис. 1. Схема сканирования векторов скорости по измерительному тракту

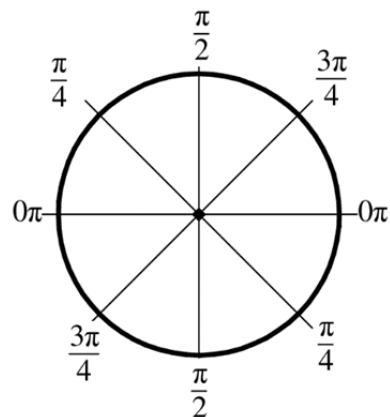


Рис. 2. Схема определения векторов скорости в поперечном сечении

При симметричному полі розподілення швидкостей значення їх складових по осям з однаковими координатами близькі між собою (рис. 3). При порушенні однорідності потоку, розподілення швидкостей по осям з однаковими координатами буде мати між собою різниця (рис.4).

Аналіз неоднорідності потоку вимірюваної середовища в поперечному сеченні проводимо по комплексній оцінці величини несовпадіння епюр розподілення швидкості по кожній діаметральній хорді.

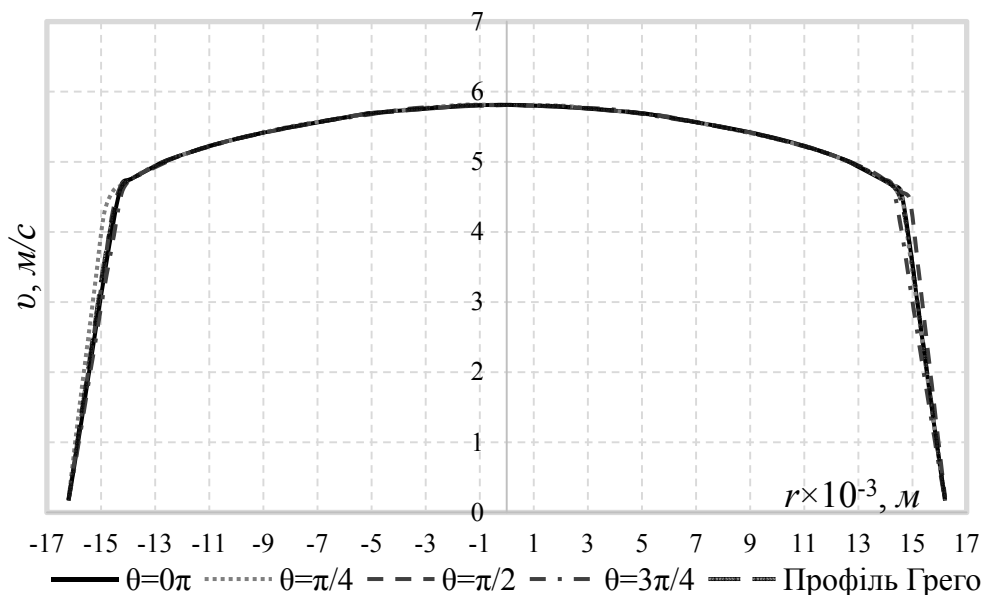


Рис. 3. Графіки розподілення швидкостей при однорідному потоку

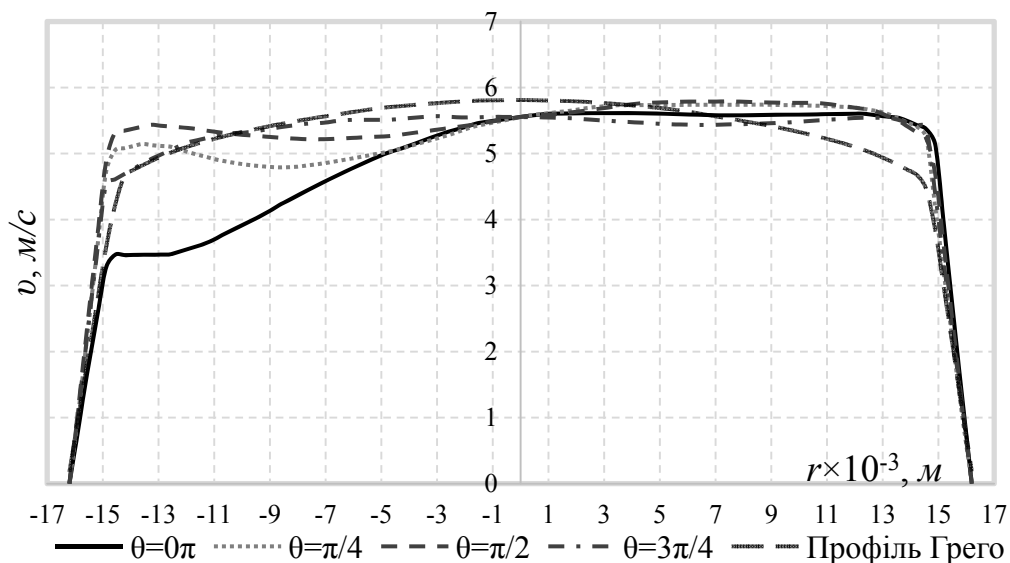


Рис. 4. Графіки розподілення швидкостей при неоднорідному потоку

При оцінці неоднорідності поля розподілення швидкостей в определенному поперечному сеченні знайдемо відносні значення розподілення швидкостей по кожній діаметральній хорді:

$$v_{km}^{\text{ед}}(n) = \frac{v_{km}(n)}{v_{\text{max}km}}, \quad (1)$$

де $v_{km}(n)$ - значення швидкості в n -ій точці по m -ій діаметральній хорді k -ого сечення; $v_{\text{max}km}$ - значення максимальної швидкості по m -ій діаметральній хорді k -ого сечення.

Для визначення величини неоднорідності потоку вимірюваної середовища по розподіленню швидкості пропонується порівнювати відносні значення швидкостей в сеченні по кожній з m діаметральних хорд повністю розвинутого однорідного потоку, як правило, на вході перед місцевим опором (профіль

Грего) с относительными значениями скоростей по соответствующей диаметральной хорде в поперечном сечении, которое исследуется.

Относительные значения скорости в сечении по каждой из m диаметральных хорд полностью развитого однородного потока на входе к местному сопротивлению определяется выражением:

$$v_{0m}^{\text{ед}}(n) = \frac{v_{0m}(n)}{v_{\text{max}0m}}, \quad (2)$$

где $v_{0m}(n)$ - значение скорости в n -ой точке по m -ой диаметральной хорде 0-ого сечения; $v_{\text{max}0m}$ - значение максимальной скорости по m -ой диаметральной хорде 0-ого сечения.

Для оценки величины неоднородности поля распределения скорости предлагается применить критерий общего различия распределения относительных скоростей между сечениями 0 и k по диаметральной хорде на базе критерия несовпадения двух экспериментальных кривых, которые сравниваются [4]:

$$\sigma_{km} = \frac{D_{2km}}{a\sigma_{0km}^2}, \quad \text{при } k_1 = a; k_2 = n - 2a \quad (3)$$

где D_{2km} - дисперсия отклонения значений распределения относительных скоростей между сечениями 0 та k по диаметральной хорде m ; a - число групп значений проекций векторов скоростей $v_{km}^*(n)$ в k -ом поперечном сечении по диаметральной хорде m (для нашего случая, $a = n$); σ_{0km}^2 - случайная вариация экспериментальных результатов в сечениях 0 та k по диаметральной хорде m ; k_1 - число степеней свободы (число свободно варьируемых значений); k_2 - число степеней свободы (число значений варьирования, которые могут принимать произвольные значения, не изменяя общего уровня, в пределах которого эти значения варьируются).

Дисперсия отклонения значений распределения относительных скоростей между сечениями 0 и k по диаметральной хорде m определяется выражением:

$$D_{2km} = \sum_{i=1}^{n'} M_{im} (\bar{v}_{0m}^{\text{ед}}(i) - \bar{v}_{km}^{\text{ед}}(i))^2, \quad (4)$$

где $M_{im} = \frac{n_{0mi} \cdot n_{kmi}}{n_{0mi} + n_{kmi}}$; n_{0mi} - частота, которая указывает, сколько раз при данных значениях $R(i)$ встречается

$v_{0m}^{\text{ед}}(i)$; n_{kmi} - частота, которая указывает, сколько раз при данных значениях $R(i)$ встречаются одинаковые значения скорости $v_{km}^{\text{ед}}(i)$; $R(n)$ - координата определения n -ой проекции скорости в поперечном сечении по диаметральной хорде; $-R \leq R(n) \leq R$, где R - радиус трубопровода, где проводится оценка величины неоднородности потока; n' - количество средин интервалов определения скорости по диаметральной хорде (для нашего случая $n' = 50$).

Случайная вариация экспериментальных результатов в поперечных сечениях 0 и k по диаметральной хорде m определяется выражением:

$$\sigma_{0km}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n'} {}_0((v_{0m}^{\text{ед}}(i))^2 \cdot n_{v_{0m}^{\text{ед}}(i)}) + \sum_{i=1}^{n'} {}_k((v_{km}^{\text{ед}}(i))^2 \cdot n_{v_{km}^{\text{ед}}(i)}) - (\sum_{i=1}^{n'} {}_0(v_{0m}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{0m}^{\text{ед}}(i)})^2 - (\sum_{i=1}^{n'} {}_k(v_{km}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{km}^{\text{ед}}(i)})^2}{n_{0km} - 2a}, \quad (5)$$

$$\text{где } (\sum_{i=1}^{n'} {}_k(v_{km}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{km}^{\text{ед}}(i)})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n'} {}_k(v_{km}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{km}^{\text{ед}}(i)})^2}{n_{kmi}}; \quad (\sum_{i=1}^{n'} {}_0(v_{0m}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{0m}^{\text{ед}}(i)})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n'} {}_0(v_{0m}^{\text{ед}}(i) \cdot n_{v_{0m}^{\text{ед}}(i)})^2}{n_{0mi}}.$$

Практический анализ пространственной неоднородности потоков жидкости по разработанной методике оценки вероятности несовпадения кривых распределения скоростей в поперечных сечениях удобно осуществлять с табличным представлением результатов, как входящих, так и исходящих данных. Для этого экспериментальные данные приводят в табл. 1 и табл. 2.

Для сравнения эпюр распределения скоростей в поперечных сечениях (0 и k) из табл. 1 и табл. 2 определим частичные средние для кривых, полученных в нулевом (табл.3) и k -ом (табл. 4) сечениях.

Используя результаты расчетов (табл.3 и 4) определим меру случайной вариации (σ_0^2) результатов 0-ого и k -ого сечений (табл.5)

Для оценки различия в кривых, которые сравниваются, используем результаты вычислений, приведенные в табл.5 и составим табл.6.

Таблиця 1

Экспериментальные данные скоростей в начальном (нулевом) сечении

| $R(i), i=1-n$ $v_{0m}^{\delta\theta}$ | 1-2 | 2-3 | ... | 99-100 | $n_{v_{10m}^{\delta\theta}}$ |
|--|---|---|-----|--|---|
| 0-0,1 | $n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(i)$ |
| 0,1-0,2 | $n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(i)$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 0,9-1,0 | $n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(i)$ |
| $n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{i0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{i0m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{i0m}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{i0m}^{\delta\theta}}(i)$ |

Таблиця 2

Экспериментальные данные скоростей в k-ом сечении

| $R(i), i=1-n$ $v_{km}^{\delta\theta}$ | 1-2 | 2-3 | ... | 99-100 | $n_{v_{1km}^{\delta\theta}}$ |
|--|---|---|-----|--|---|
| 0-0,1 | $n_{v_{1km}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{1km}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{1km}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{1km}^{\delta\theta}}(i)$ |
| 0,1-0,2 | $n_{v_{2km}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{2km}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{2km}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{2km}^{\delta\theta}}(i)$ |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 0,9-1,0 | $n_{v_{\epsilon km}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{v_{\epsilon km}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{v_{\epsilon km}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{n'} n_{v_{\epsilon km}^{\delta\theta}}(i)$ |
| $n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{ikm}^{\delta\theta}}(1)$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{ikm}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{ikm}^{\delta\theta}}(n')$ | $\sum_{i=1}^{\epsilon} n_{v_{ikm}^{\delta\theta}}(i)$ |

Таблиця 3

Расчетные данные для θ-ого сечения

| $v_{0m}^{\delta\theta}$ (средина интервала) | 2 | | 4 | | ... | 99,5 | |
|---|---|--|---|--|-----|---|---|
| | $n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $v_{0m}^{\delta\theta} n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $v_{0m}^{\delta\theta} n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | ... | $n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ | $v_{0m}^{\delta\theta} n_{v_{0m}^{\delta\theta}}$ |
| 0,05 | $n_{1v_{0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $v_{10m}^{\delta\theta} n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{1v_{0m}^{\delta\theta}}(2)$ | $v_{10m}^{\delta\theta} n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{1v_{0m}^{\delta\theta}}(n)$ | $v_{10m}^{\delta\theta} n_{v_{10m}^{\delta\theta}}(n')$ |
| 0,15 | $n_{2v_{0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $v_{20m}^{\delta\theta} n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{2v_{0m}^{\delta\theta}}(2)$ | $v_{20m}^{\delta\theta} n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{2v_{0m}^{\delta\theta}}(n)$ | $v_{20m}^{\delta\theta} n_{v_{20m}^{\delta\theta}}(n')$ |
| 0,25 | $n_{3v_{0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $v_{30m}^{\delta\theta} n_{v_{30m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{3v_{0m}^{\delta\theta}}(2)$ | $v_{30m}^{\delta\theta} n_{v_{30m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{3v_{0m}^{\delta\theta}}(n)$ | $v_{30m}^{\delta\theta} n_{v_{30m}^{\delta\theta}}(n')$ |
| ... | | | | | ... | | |
| 0,95 | $n_{\epsilon v_{0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta} n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(1)$ | $n_{\epsilon v_{0m}^{\delta\theta}}(2)$ | $v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta} n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(2)$ | ... | $n_{\epsilon v_{0m}^{\delta\theta}}(n)$ | $v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta} n_{v_{\epsilon 0m}^{\delta\theta}}(n')$ |
| Всього | $C_1^{(0)}$ | $D_1^{(0)}$ | $C_2^{(0)}$ | $D_2^{(0)}$ | ... | $C_m^{(0)}$ | $D_m^{(0)}$ |
| \bar{v} | | $E_1^{(0)}$ | | $E_2^{(0)}$ | ... | | $E_m^{(0)}$ |

$$\text{где } C_1^{(0)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1); C_2^{(0)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2); \dots C_m^{(0)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n);$$

$$E_1^{(0)} = \frac{D_1^{(0)}}{C_1^{(0)}}; E_2^{(0)} = \frac{D_2^{(0)}}{C_2^{(0)}}; \dots E_m^{(0)} = \frac{D_m^{(0)}}{C_m^{(0)}}.$$

$$D_1^{(0)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (1); D_2^{(0)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (2); \dots D_m^{(0)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (n');$$

Таблица 4

Расчетные данные для k-ого сечения

| $\nu_{km}^{\text{ед}}$ (средина интервала) | 2 | | 4 | | ... | 99,5 | |
|--|---------------------------------|---|---------------------------------|---|-----|---------------------------------|--|
| | $n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ | $\nu_{km}^{\text{ед}} n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ | $n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ | $\nu_{km}^{\text{ед}} n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ | ... | $n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ | $\nu_{km}^{\text{ед}} n_{\nu_{km}^{\text{ед}}}$ |
| 0,05 | $n_{1\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1)$ | $\nu_{10m}^{\text{ед}} n_{\nu_{10m}^{\text{ед}}} (1)$ | $n_{1\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2)$ | $\nu_{10m}^{\text{ед}} n_{\nu_{10m}^{\text{ед}}} (2)$ | ... | $n_{1\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n)$ | $\nu_{10m}^{\text{ед}} n_{\nu_{10m}^{\text{ед}}} (n')$ |
| 0,15 | $n_{2\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1)$ | $\nu_{20m}^{\text{ед}} n_{\nu_{20m}^{\text{ед}}} (1)$ | $n_{2\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2)$ | $\nu_{20m}^{\text{ед}} n_{\nu_{20m}^{\text{ед}}} (2)$ | ... | $n_{2\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n)$ | $\nu_{20m}^{\text{ед}} n_{\nu_{20m}^{\text{ед}}} (n')$ |
| 0,25 | $n_{3\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1)$ | $\nu_{30m}^{\text{ед}} n_{\nu_{30m}^{\text{ед}}} (1)$ | $n_{3\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2)$ | $\nu_{30m}^{\text{ед}} n_{\nu_{30m}^{\text{ед}}} (2)$ | ... | $n_{3\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n)$ | $\nu_{30m}^{\text{ед}} n_{\nu_{30m}^{\text{ед}}} (n')$ |
| ... | | | | | ... | | |
| 0,95 | $n_{6\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1)$ | $\nu_{60m}^{\text{ед}} n_{\nu_{60m}^{\text{ед}}} (1)$ | $n_{6\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2)$ | $\nu_{60m}^{\text{ед}} n_{\nu_{60m}^{\text{ед}}} (2)$ | ... | $n_{6\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n)$ | $\nu_{60m}^{\text{ед}} n_{\nu_{60m}^{\text{ед}}} (n')$ |
| Всього | $C_1^{(k)}$ | $D_1^{(k)}$ | $C_2^{(k)}$ | $D_2^{(k)}$ | ... | | $D_m^{(k)}$ |
| $\bar{\nu}$ | | $E_1^{(k)}$ | | $E_2^{(k)}$ | ... | | $E_m^{(k)}$ |

$$\text{где } C_1^{(k)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (1); C_2^{(k)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (2); \dots C_m^{(k)} = \sum_{i=1}^6 n_{i\nu_{0m}^{\text{ед}}} (n);$$

$$D_1^{(k)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (1); D_2^{(k)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (2); \dots D_m^{(k)} = \sum_{i=1}^6 \nu_{i0m}^{\text{ед}} n_{\nu_{i0m}^{\text{ед}}} (n');$$

$$E_1^{(k)} = \frac{D_1^{(k)}}{C_1^{(k)}}; E_2^{(k)} = \frac{D_2^{(k)}}{C_2^{(k)}}; \dots E_m^{(k)} = \frac{D_m^{(k)}}{C_m^{(k)}}.$$

Таблица 5

Мера случайной вариации

| 0-е сечение | | k-е сечение | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| $C^{(0)}$ | $L^{(0)}$ | $C^{(k)}$ | $L^{(k)}$ |
| $C_1^{(0)}$ | $L_1^{(0)}$ | $C_1^{(k)}$ | $L_1^{(k)}$ |
| $C_2^{(0)}$ | $L_2^{(0)}$ | $C_2^{(k)}$ | $L_2^{(k)}$ |
| $C_3^{(0)}$ | $L_3^{(0)}$ | $C_3^{(k)}$ | $L_3^{(k)}$ |
| ... | ... | ... | ... |
| $C_6^{(0)}$ | $L_6^{(0)}$ | $C_6^{(k)}$ | $\sum_{i=1}^6 L_i^{(k)}$ |
| $\sum_{i=1}^6 0 C_i^{(0)}$ | $\sum_{i=1}^6 0 L_i^{(0)}$ | $\sum_{i=1}^6 k C_i^{(k)}$ | $\sum_{i=1}^6 k L_i^{(k)}$ |

$$\text{где } L_1^0 = \sum_{i=1}^6 [(v_{i0m}^{*g\delta}(1))^2 n_{v_{i0m}^{*g\delta}}]; L_2^0 = \sum_{i=1}^6 [(v_{i0m}^{*g\delta}(2))^2 n_{v_{i0m}^{*g\delta}}]; \dots L_m^0 = \sum_{i=1}^6 [(v_{i0m}^{*g\delta}(n'))^2 n_{v_{i0m}^{*g\delta}}];$$

$$L_1^k = \sum_{i=1}^6 [(v_{ikm}^{*g\delta}(1))^2 n_{v_{ikm}^{*g\delta}}]; L_2^k = \sum_{i=1}^6 [(v_{ikm}^{*g\delta}(2))^2 n_{v_{ikm}^{*g\delta}}]; \dots L_m^k = \sum_{i=1}^6 [(v_{ikm}^{*g\delta}(n'))^2 n_{v_{ikm}^{*g\delta}}];$$

$$C_0^* = (\sum_0 C^{(0)})^2; C_k^* = (\sum_k C^{(k)})^2; \frac{C_0^*}{n_0} = (\sum_0 C^{(0)})^2; \frac{C_k^*}{n_k} = (\sum_k C^{(k)})^2.$$

Таблица 6

Оценка различия кривых

| | | | | | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------|----------|-----------------|---------------------|---|---|---|
| E^0 | C^0 | E^k | C^k | $E^0 - E^k$ | $(E^0 - E^k)^2$ | $M = (\frac{C^0 C^k}{C^0 + C^k})$ | $M(E^0 - E^k)$ | $M(E^0 - E^k)^2$ |
| E_1^0 | C_1^0 | E_1^k | C_1^k | $E_1^0 - E_1^k$ | $(E_1^0 - E_1^k)^2$ | $M_1 = (\frac{C_1^0 C_1^k}{C_1^0 + C_1^k})$ | $M_1(E_1^0 - E_1^k)$ | $M_1(E_1^0 - E_1^k)^2$ |
| E_2^0 | C_2^0 | E_2^k | C_2^k | $E_2^0 - E_2^k$ | $(E_2^0 - E_2^k)^2$ | $M_2 = (\frac{C_2^0 C_2^k}{C_2^0 + C_2^k})$ | $M_2(E_2^0 - E_2^k)$ | $M_2(E_2^0 - E_2^k)^2$ |
| E_3^0 | C_3^0 | E_3^k | C_3^k | $E_3^0 - E_3^k$ | $(E_3^0 - E_3^k)^2$ | $M_3 = (\frac{C_3^0 C_3^k}{C_3^0 + C_3^k})$ | $M_3(E_3^0 - E_3^k)$ | $M_3(E_3^0 - E_3^k)^2$ |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| E_g^0 | C_g^0 | E_g^k | C_g^k | | | $M_g = (\frac{C_g^0 C_g^k}{C_g^0 + C_g^k})$ | $M_g(E_g^0 - E_g^k)$ | $M_g(E_g^0 - E_g^k)^2$ |
| $n_1 = \sum_{i=1}^6 C_i^0$ | $n_2 = \sum_{i=1}^6 C_i^k$ | | | - | - | $\sum_{i=1}^6 M_i$ | $\sum_{i=1}^6 [M_i(E_i^0 - E_i^k)] = T_{1mk}$ | $\sum_{i=1}^6 [M_i(E_i^0 - E_i^k)^2] = T_{2mk}$ |

Используя результаты вычислений, которые приведены в табл.6, имеем все необходимые данные для определения по выражению (5) критерия общего различия двух экспериментальных кривых пространственной неоднородности потоков жидкости в каждом поперечном сечении. Такая оценка осуществляется в каждом из исследуемых поперечных сечений измерительного тракта (рис.1) по значению проекций векторов скорости по m диаметральных хордах (в нашем случае $m = 4$) (рис.2). Таким образом, в каждом поперечном сечении по выражению (5) рассчитываем m значений критерия отличия двух экспериментальных кривых пространственной неоднородности потоков жидкости.

Для комплексной оценки асимметрии потока в поперечном сечении измеряемого тракта по полученным значениям m критериальных оценок определяем среднее квадратическое отклонение от среднего значения симметричного потока в 0-ом входном на исследуемом участке сечения (осесимметричный профиль Грего) по выражению:

$$\sigma_{\Sigma k} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\sigma_{ki} - \bar{K}_0)^2}{m}}, \tag{6}$$

где $\bar{K}_0 = \frac{\sum_{i=1}^m \sigma_{ki}}{m}$.

Выводы

По результатам оценки вероятности несовпадения исследуемых кривых в поперечных сечениях измерительного тракта (рис.1), используя значения критерия общего различия двух кривых, которые сравниваются, можно оценить не только величину неоднородности потока жидкости и газа, но и определить участки, где с определенной достоверностью можно считать потоки близкими к однородности и являются приоритетными для размещения ИПР на измерительной магистрали.

Анотація. У роботі проаналізовано актуальність і проблеми вимірювання витрати та кількості паливно-енергетичних ресурсів і води, визначено основні вимоги до витратомірів і лічильників рідин та газів, наведені шляхи підвищення їх метрологічних характеристик та ефективності процесу вимірювання. Розглянуто фактори впливу на метрологічні характеристики вимірювальних перетворювачів витрати та визначено основні з них. Показано, що на якість вимірювання суттєво впливають гідродинамічні характеристики вимірюваних потоків рідин і газів, а особливо їх неоднорідність, в тому числі несиметричність епюр розподілу швидкості у поперечному перерізі вимірювального каналу. Обґрунтовано методику визначення ступеня неоднорідності швидкостей в поперечних перетинах трубопроводів до і після вимірювального перетворювача та у вимірювальній камері перетворювача з подальшою оцінкою впливу неоднорідності потоку на метрологічні характеристики приладу. В основу розробленої методики покладено оцінювання ймовірності неспівпадіння кривих розподілу швидкостей в поперечних перетинах. За результатами такого оцінювання розробляються рекомендації на удосконалення самих вимірювальних перетворювачів і місця їх установки на вузлі обліку, що спрямовані на зменшення похибок приладів і систем вимірювання витрати та кількості рідин і газів.

Ключові слова: вимірювання, витрата, рідина, газ, потоки, гідродинаміка, неоднорідність, асиметрія.

Abstract. In this work were described the analysis of actuality and problems of flow rate and volume measurement of energy resources and water, defined the basic requirements for fitted and counters of liquids and gases, lists ways of enhancing their metrological characteristics of a measuring process efficiency. The factors of influence on the metrological characteristics of measuring transducers and the main flow of them. It is shown that the quality measure is severely affected by hydrodynamic characteristics of measured liquid and gas flows, and especially their heterogeneity, including diagrams of asymmetry in the distribution of velocity in cross section measurement channel.

The method for determining the degree of heterogeneity velocity in cross sections of the piping before and after measuring transformer and in measuring chamber converter with subsequent impact assessment of heterogeneity flow on the metrological characteristics of measuring tools. The developed technique includes estimating the chance of a mismatch in speed distribution curve cross sections. The results of such evaluation recommendations on the improvement of the transducers and the place of their installation on the node counting, that aim to reduce errors of measuring devices and systems for liquid and gas flow rate and volume.

Keywords: measurement, flow rate, fluid, gas flows, fluid dynamics.

Библиографический список использованной литературы

1. Дорожовець М.М. Теоретичний аналіз просторового розподілу швидкості руху рідини за допомогою функцій Саламі для багатоканального ультразвукового витратоміра./ М.М.Дорожовець М.М. А.В.Семенистий, Б.І.Стадник //Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. -2004. №500. С.131-134.
2. Терещенко С.А., Рыгалов М.Н. Акустическая многоплоскостная расходометрия на основе методов квадратурного интегрирования / С.А.Терещенко, М.Н.Рыгалов // Акустический журнал. 2004. Том 50.31. С.116-122.
3. Гришанова І.А., Коробко І.В. Системи CAD/CAE. ANSYS FLUENT. – К.: “Дія ЛТД”, 2012. – 208 с.
4. Длин А.М. Математическая статистика в технике.- М.: Государственное издательство “Советская наука”, 1958. – 466с.

References

1. Dorozhovec M.M., Semenistij A.V., Stadnik B.I. Visnik Nacional'nogo universitetu “Lvivska politehnika” “Avtomatika, vimirjuvannja ta keruvannja”.2004. No 500. pp.131-134.
2. Tereshhenko S.A., Rygalov M.N. Akusticheskij zhurnal. 2004. Tom 50.31. pp.116-122.
3. Grishanova I. A., Korobko I. V. Sistemi CAD/CAE. ANSYS FLUENT. Kyiv: Dija LTD, 2012. 208 p.
4. Dlin A.M. Matematicheskaja statistika v tehnikе (Mathematical Statistics in Technology). Moscow: Gosudarstvennoe izdatelstvo “Sovetskaja nauka”, 1958. 466p.

Подана до редакції 10.09.2014