

УДК 681.122

Тонконогий Ю<sup>1</sup>., Пядишюс А.<sup>1</sup>, Тонконоговас А.<sup>1</sup>, Круковский П.Г.<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Литовский энергетический институт

<sup>2</sup>Институт технической теплофизики НАН Украины

## ОТКЛИК И ДИНАМИЧЕСКАЯ ПОГРЕШНОСТЬ ТУРБИННОГО СЧЕТЧИКА ГАЗА ПРИ ПУЛЬСАЦИЯХ ПОТОКА ПО СЛОЖНЫМ ЗАКОНАМ

Розроблений нами метод, який раніше застосовувався для числового моделювання відгуку і динамічної похибки турбінного лічильника газу при простих законах пульсації потоку, на цей раз використаний для близьких до практики складних законів пульсації.

Разработанный нами метод, ранее примененный для численного моделирования отклика и динамической погрешности турбинного счетчика газа при простых законах пульсации потока, на этот раз использован для случая близких к практике сложных законов пульсации.

The method we previously applied for numerical simulation of the response and dynamic error of the turbine gas meter with a simple law of flow pulsation, this time used to practice the complex laws of pulsation.

$f$  – частота пульсации;

$Q$  – текущий расход;

$\bar{Q}$  – безразмерный расход,  $\bar{Q} \equiv Q / Q_{cp}$ ;

$q$  – мгновенное показание ТСГ;

$\Delta \bar{q} = (\bar{q}_{max} - \bar{q}_{min}) / 2$  – безразмерное показание ТСГ;

$\Delta \bar{q} = (\bar{q}_{max} - \bar{q}_{min}) / 2$  – безразмерная амплитуда показаний ТСГ;

$\Delta Q \equiv (Q_{max} - Q_{min}) / 2$  – амплитуда пульсации расхода;

$\Delta Q \equiv \Delta Q / Q_{cp}$  – безразмерная амплитуда;

$\Delta \bar{Q}_y$  – условная безразмерная амплитуда для расчета уравнения пульсации расхода;

$T$  – показатель инерции ТСГ;

$t$  – время;

$\Delta t_0$  – период пульсации расхода;

$\Delta t_i$  – шаг во времени;

$\delta = (q_{cp} - Q_{cp}) / Q_{cp}$  – динамическая погрешность;

$\omega$  – частота вращения ТСГ.

### Индексы:

пр – предельный;

ср – средний.

### Введение

Турбинные счетчики газа (ТСГ) широко применяются для учета природного газа. Для них характерна т.н. динамическая погрешность, возникающая в пульсирующем потоке из-за инерции ротора счетчика. Мгновенная частота вращения отстает от текущего значения расхода. Показания счетчика быстрее приближаются к действительным значениям расхода при увеличении последнего, нежели при его снижении. В результате возникает всегда положительная динамическая погрешность.

Обширные исследования динамической погрешности провели Н. Леманн [1], Р. МакКи [2], Р. Чизрайт [3], В. Ли [4], К. Аткинсон [5]

и ряд других ученых, чьи исследования обобщены в документе ИСО [6]. Все до сих пор полученные результаты относятся к простейшим законам пульсации – прямоугольному, синусоидальному и треугольному. Однако на практике ТСГ обычно работают в условиях пульсаций по сложным законам, как это показано Р. Чизрайтом, исследовавшим пульсации скорости в газопроводе вблизи регулятора давления [7]. Иногда встречаются пульсации, когда периодически меняется направление течения потока.

Разработанный нами метод [8], ранее примененный для численного моделирования отклика и динамической погрешности ТСГ при простых законах пульсации потока [9,10], на этот раз использован для расчетов при различ-

ных сложных законах пульсации.

### Основы метода

1. Любая произвольно заданная кривая изменения расхода во времени заменяется ступенчатой линией вокруг заданной кривой, как показано на рис. 1.

2. На каждом шаге времени  $\Delta t_i$  для расчета показания счетчика применяется уравнение его отклика на прямоугольное (ступенчатое) изменение расхода. Как показывают эксперименты, для ТСГ этот отклик происходит по экспоненциальному закону [11].

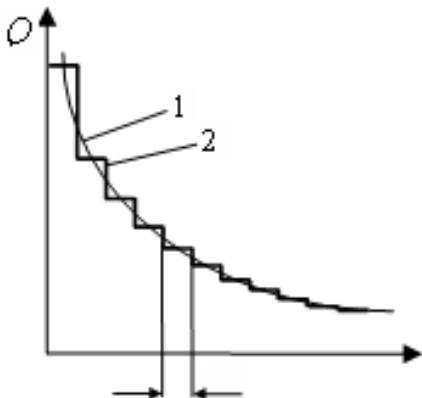


Рис. 1. Замена произвольно заданной кривой изменения расхода (1) ступенчатой линией (2) с длиной ступеньки  $\Delta t_i$ .

3. Основным и единственным определяющим процесс параметром является показатель инерции ТСГ  $T$ , иногда называемый постоянной времени инерции и сравнительно несложно определяемый экспериментально [11].

4. Метод позволяет отказаться от используемого до сих пор традиционного дифференциального уравнения вращения счетчика, в которое входит ряд трудно определяемых параметров. Совокупность этих параметров заменяется единственным параметром  $T$ .

5. Метод является универсальным, он применим не только к счетчикам газа, но и к измерителям расхода и счетчикам различных жидкостей, не только вращающимися, но и с другими движущимися чувствительными элементами. Он в своей основе также применим

к некоторым измерителям других параметров, например, температуры, давления и скорости потока. Единственным ограничением метода является требование, чтобы изменение показаний измерителя было регулярным с самого начала процесса, т.е. закономерность отклика должна быть постоянной.

### Математическая модель

Для расчетов можно либо использовать метод конечных разностей, либо решать дифференциальное уравнение процесса [8]. В данном случае применен первый метод, имеющий некоторые преимущества в части обработки, обобщения и представления результатов расчетов.

Искалось распределение частоты вращения  $\omega$  ротора ТСГ на отрезке времени, равном периоду пульсации потока  $\Delta t_0 = 1/f$ . Этот период был поделен на достаточно большое число  $n$  отрезков времени  $\Delta t_i$ :

$$\Delta t_i = \Delta t_0/n. \quad (1)$$

На каждом таком  $i$ -ом отрезке ( $i$ -ом шаге во времени) конечная частота вращения  $\omega_{\text{кон}i}$  определяется по известной из расчета на предыдущем ( $i-1$ )-ом шаге конечной частоте  $\omega_{\text{кон}(i-1)}$ , она же начальная  $\omega_{\text{нач}i}$  для данного  $i$ -го шага, по уравнению:

$$\omega_{\text{кон}i} = \omega_Q + (\omega_{\text{нач}i} - \omega_Q) \cdot \exp(-\Delta t_i/T). \quad (2)$$

Здесь  $\omega_Q$  — частота вращения, соответствующая текущему расходу  $Q$  и определяемая с учетом коэффициента импульса  $k_{\text{имп}}$  по уравнению

$$\omega_Q = Q/k_{\text{имп}}. \quad (3)$$

Показатель инерции ТСГ  $T$  определяется на каждом шаге в зависимости от текущего расхода по уравнению [10]

$$T = C_T/Q_i^m. \quad (4)$$

Параметры  $C_T$  и  $m$  в уравнении (4) определяются для данного ТСГ экспериментальным путем [10].

Как граничное условие используется равенство частот вращения на концах отрезка  $\Delta t_0$ .

$$\omega_{нач1} = \omega_{конл} \cdot \quad (5)$$



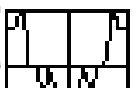

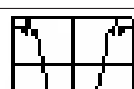
**Расчетные законы пульсации расхода**

Расчеты были проведены для нескольких сложных законов пульсаций, близких к встречающимся на практике [7]. Каждый такой закон получен согласно принципу Фурье путем суммирования элементарных косинусоидальных законов с различными амплитудами и частотами. В табл. 1 приведены уравнения пульсации расхода и форма импульса для всех пяти исследованных законов. Здесь же для этих законов

приведено рассчитанное значение коэффициента  $C_a$ , который в уравнении (6) характеризует предельное значение динамической погрешности.

Расчет отклика на пульсацию расхода, т.е. изменение во времени показаний ТСГ; динамической погрешности и амплитуды пульсации показаний проведены для ТСГ типа MZ100 с металлической крыльчаткой,  $DY = 100$  мм, при среднем расходе  $400 \text{ м}^3/\text{час}$  в широких диапазонах частоты  $f$  и амплитуды  $\Delta \bar{Q}$  пульсаций.

Табл. 1. Исследованные законы пульсаций

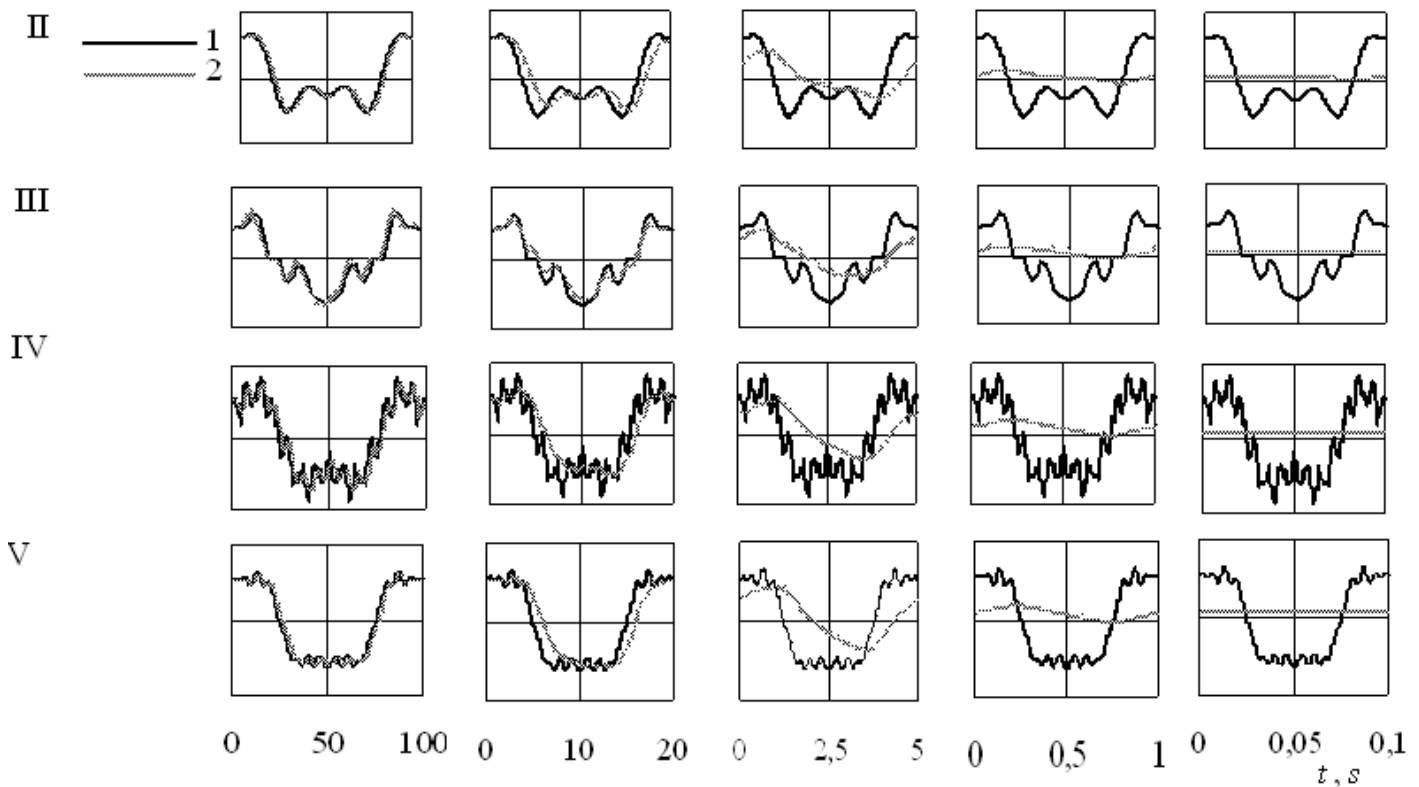
№ закона	Уравнение закона пульсации	Форма импульса	Коэф. $C_a$ в уравнении (6)
1.	$\bar{Q} = 1 + \Delta \bar{Q}_y (\cos(2\pi f t) - 0,25 \cdot \cos(4\pi f t) + 0,09 \cdot \cos(6\pi f t) - 0,05 \cdot \cos(12\pi f t) + 0,07 \cdot \cos(14\pi f t)) - 0,04 \cdot \cos(18\pi f t)$		42,71
2.	$\bar{Q} = 1 + \Delta \bar{Q}_y (2/3 \Delta \cos(2\pi f t) + 1/2 \Delta \cos(4\pi f t) - 1/4 \Delta \cos(8\pi f t))$		48,93
3.	$\bar{Q} = 1 + \Delta \bar{Q}_y (4/5 \cos(2\pi f t) - 1/4 \cos(8\pi f t) + 1/7 \cos(16\pi f t) - 1/12 \cos(20\pi f t))$		38,26
4.	$\bar{Q} = 1 + \Delta \bar{Q}_y (\cos(2\pi f t) - 0,35 \cos(6\pi f t) + 0,25 \cos(28\pi f t) - 0,09 \cos(46\pi f t) - 0,05 \cos(96\pi f t) + 0,07 \cos(120\pi f t)) - 0,04 \cos(150\pi f t)$		35,60
5.	$\bar{Q} = 1 + \Delta \bar{Q}_y (\cos(2\pi f t) - 0,25 \cos(6\pi f t) + 0,09 \cos(10\pi f t) - 0,05 \cos(24\pi f t) + 0,07 \cos(30\pi f t)) - 0,04 \cos(38\pi f t)$		59,86

**Отклик ТСГ**

Результаты расчета отклика ТСГ приведены на рис. 2. При достаточно малых частотах пульсации ( $f = 0,001 \dots 0,01$  Гц) инерционность счетчика практически не проявляется, и кривая изменения частоты вращения ротора ТСГ (показания счетчика) достаточно точно совпадает с частотой пульсации расхода. С увеличением частоты пульсации показания счетчика начина-

ют все больше отставать от фактического моментного расхода. При всех законах пульсации потока ТСГ с увеличением частоты пульсации сначала перестает реагировать на составляющие пульсации с небольшой амплитудой, потом на составляющие со все большей амплитудой.

С увеличением частоты пульсации потока амплитуда пульсации показаний ТСГ уменьшается, наблюдается смещение этой пульсации



**Рис. 2. Отклик ТСГ MZ100 с металлической крыльчаткой на пульсации расхода.**  
**I - V – законы пульсаций в соответствии с табл. 1;  $\Delta = 0,25$ ;**  
**a, б, в, г, д –  $f = 0,01; 0,05; 0,2; 1; 10$  Гц соответственно.**

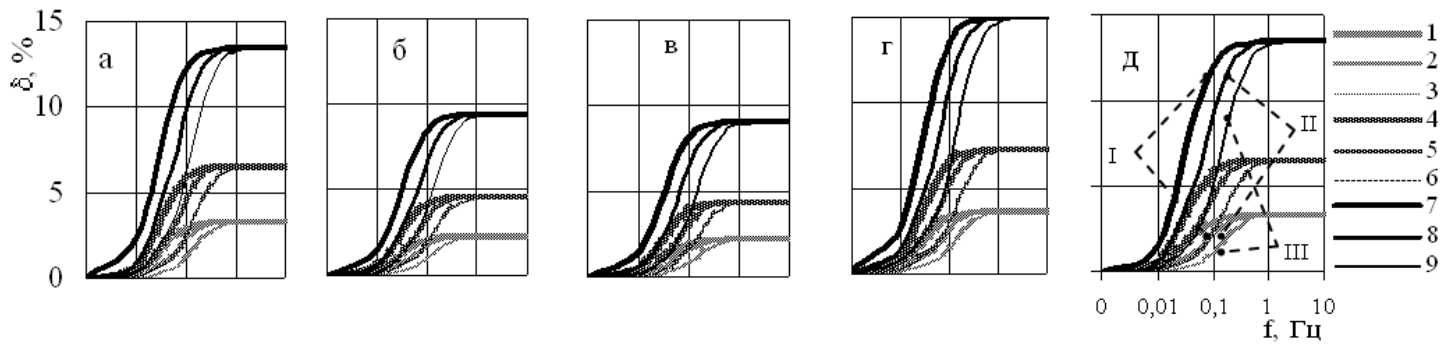
по фазе, а ее закон все более приближается к косинусоидальному. При достаточно больших частотах пульсации (порядка 1...10 Гц) из-за инерционности ТСГ практически не отслеживает пульсации потока, и частота его вращения остается постоянной, при этом превышая частоту, соответствующую среднему расходу. Это превышение определяет динамическую погрешность ТСГ.

**Динамическая погрешность и амплитуда пульсации показаний ТСГ**

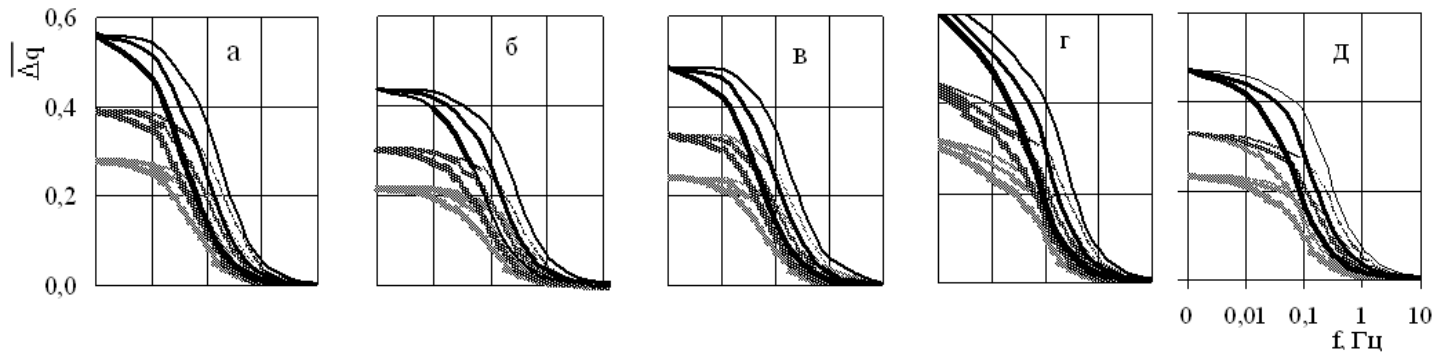
Зависимость динамической погрешности и амплитуды пульсации показаний ТСГ MZ100 от частоты пульсации расхода при разных амплитудах пульсации и разных величинах расхода представлены на рис. 3 и 4 для исследованных законов пульсации из табл. 1.

Характер изменения динамической погреш-

ности качественно такой же, как в случаях простых законов пульсации. При достаточно малых частотах пульсации расхода, когда инерционность счетчика не проявляется, динамическая погрешность близка к нулю. С увеличением частоты пульсации динамическая погрешность возрастает с возрастающим темпом. При достижения некоторого значения частоты темп роста погрешности достигает своего максимального значения, после чего с дальнейшим ростом частоты начинает уменьшаться. Динамическая погрешность при этом продолжает расти до достижения при частоте порядка (1...10) Гц своего наибольшего предельного значения  $\delta_{пр}$ , далее оставаясь неизменной. Это происходит в то же время, когда частота вращения ротора ГСТ перестает пульсировать и зависеть от частоты пульсаций. Т.о., зависимости динамической погрешности и отклика ТСГ от частоты пульса-



**Рис. 3. Зависимость динамической погрешности ТСГ МZ100 от частоты пульсации;**  
**а, б, в, г, д – законы пульсации 1 - 5 по табл. 1; I, II, III – расход 10, 200, 400 м<sup>3</sup>/час;**  
**1 - 3, 4 - 6, 7 - 9 –  $\Delta\bar{Q}_y = 0,25; 0,35; 0,5$  соответственно.**



**Рис. 4. Зависимость амплитуды пульсации показаний ТСГ МZ100 от частоты пульсации; обозначения те же, что и на рис. 3.**

ции соответствует одна другой. Характер этих зависимостей точно тот же, что и для простых законов пульсации.

Также соответствуют одна другой зависимости динамической погрешности и амплитуды пульсации показаний от частоты пульсации, как это следует из совместного рассмотрения рис. 3 и 4. Зависимость суммы  $(\Delta\bar{q} / \Delta\bar{Q} + \delta / \delta_{np})$  двух параметров в безразмерном виде от частоты для двух сложных законов представлена на рис. 5.

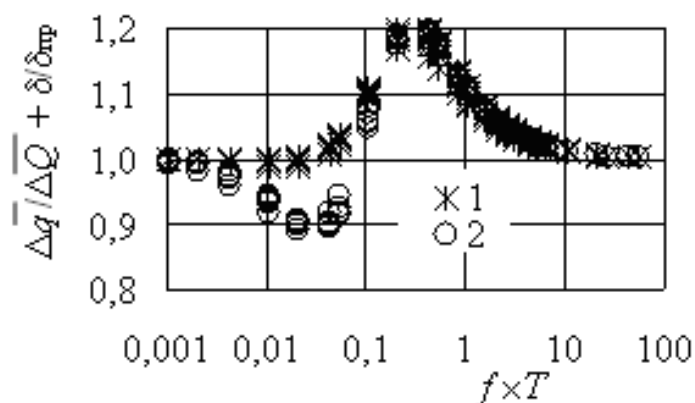
При достаточно малых и достаточно больших значениях частоты сумма равна единице, при промежуточных – отклоняется до 20% в ту или иную сторону, в зависимости от закона пульсации.

### **Предельная величина динамической погрешности**

Предельная величина динамической погрешности  $\delta_{np}$  зависит только от амплитуды пульсации расхода  $\Delta\bar{Q}$  :

$$\delta_{np} = C_a \Delta\bar{Q}^2. \quad (6)$$

Константа  $C_a$  в этом уравнении зависит только от закона пульсации. Для простых законов пульсации – прямоугольного, косинусоидального и треугольного  $C_a = 100, 50$  и  $33,5$  соответственно. Значения  $C_a^a$  для исследованных сложных законов пульсации приведены в табл. 1. Они близки к значениям  $C_a$  для косинусоидального и треугольного законов.



**Рис. 5. Зависимость суммы динамической погрешности и амплитуды пульсации показаний от частоты пульсации. 1 и 2 – законы пульсации 1 и 4 соответственно.**

### Выводы

1. Ранее разработанный нами метод численного моделирования отклика и динамической погрешности ТСГ применен для близких к практике сложных законов пульсации.

2. Динамическая погрешность и амплитуды пульсации отклика ТСГ связаны между собой. Характер зависимостей для них в случаях сложных законов пульсаций тот же, что и простых.

3. Динамическая погрешность может быть рассчитана по приведенному методу для любых законов пульсации в различных, в том числе полевых условиях.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Lehmann N.* Dynamisches Verhalten von Turbinenradgaszahlern // Das Gas und Wasserfach –GWF. – 131. – 1990, Nr.4. – pp. 160–167.

2. *McKee R. J.* Pulsation effects on single- and two rotor turbine meters, Flow Meas. Instrum. 1992, 3 No 3.– pp. 151–166.

3. *Cheesewright R., Bisset D., Clark C.* Factors which influence the variability of turbine flow-

meter signal characteristics, Flow Meas. Instrum. 1998, 9 No 2.– pp. 83–189.

4. *Lee B., Cheesewright R., Clark C.* The dynamic response of small turbine flowmeters in liquid flows, Flow Meas. Instrum. 2004, 15 No 5-6, pp. 239–248.

5. *Atkinson K. N.* A software tool to calculate the overregistration error of a turbine meter in pulsating flow, Flow Meas. Instrum. 1992, 3 No 3. – pp. 167–172.

6. *ISO/TR 3313:1998* Measurement of fluid flow in closed conduits – Guidelines on the effects of flow pulsations on flow-measurement instruments.

7. *Cheesewright R. et al.* Field tests of correction procedures for turbine flowmeters in pulsate flows, Flow Meas. Instrum. 1996, 7.– No 1.– pp. 7–17.

8. *Тонконогий Ю.* Новое уравнение вращения турбинного счетчика газа в нестационарных потоках // Энергетика. ISSN 0235-7208.– 2009, Т. 55.– № 3. – С. 172–177.

9. *Tonkonogij J., Pedišius A.* Numerical simulation of the turbine gas meters behavior in the pulsing flow // Journal of heat transfer research. ISSN 1064-2285, 2008. – Vol.39. – No 7. pp. 559–570.

10. *Tonkonogij J., Pedišius A., and Stankevičius A.* The New Semi-Experimental Method for Simulation of Turbine Flow Meters Rotation in the Transitional Flow // Proceedings of World Academy of science, engineering and technology – ISSN 1307-6884. Paris.– Vol. 30.– July 2008.– pp. 208–213.

11. *Тонконогий Ю. и др.* Динамическая погрешность турбинных счетчиков газа в пульсирующем потоке // Промышленная теплотехника. ISSN 0204-3602. 2008.– Т.30.– №4. – С. 85–93.

Получено 01.03.2010 г.