

И. А. Яценко, А. Н. Сабирзянов, В. А. Фафурин,
В. Б. Явкин

КОЭФФИЦИЕНТ ИСТЕЧЕНИЯ ТОРЦЕВОГО СОПЛА БЕЗ ВХОДНОГО УЧАСТКА

Ключевые слова: расход газа, торцевое сопло, эталон массового расхода газа, коэффициент истечения, неопределенность измерений, число Рейнольдса, относительный диаметр, математическое моделирование, модели турбулентности, стандартное сопло.

Проведены экспериментальные и численные исследования коэффициента истечения торцевых сопел без входного участка. Эксперименты проводились на государственном эталоне массового расхода газа ФГУП ВНИИР. Получены экспериментальные зависимости коэффициента истечения торцевого сопла от числа Рейнольдса и относительного диаметра. Численные исследования проведены с использованием современных средств вычислительной гидродинамики. Представлены результаты моделирования коэффициента истечения сопла ИСА 1932 в условиях стандартного монтажа и показана возможность рассчитывать его в пределах неопределенности, установленной стандартом. Проведено сопоставление результатов численного моделирования коэффициента истечения торцевых сопел с полученными экспериментальными данными. Расхождение экспериментальных и расчетных значений коэффициента истечения торцевых сопел, полученных по моделям турбулентности со стандартным набором модельных констант, не превышает 1,5 % в диапазоне чисел Рейнольдса выше 10^5 . Более удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных получено при модификации констант в моделях турбулентности.

Keywords: gas flowrate, end-holed nozzle, mass flowrate standard, discharge coefficient, measurement uncertainty, Reynolds number, relative diameter, mathematic modeling, turbulence model, standard nozzle.

The article describes experimental and numerical investigation of discharge coefficient of end-holed nozzles. Experiments have been held on a national standard of mass flow rate at Federal State Unitary Enterprise "All-Russian Research Institute of Flow Metering". As a result a dependence of discharge coefficient of end-holed nozzle and orifice on Reynolds number and relative diameter has been acquired. Numerical investigations have been held using contemporary CFD methods. Article contains results of mathematical modeling of discharge coefficient of ISA 1932 nozzle for a standard mounting thus proving the ability of its calculation within uncertainty of an appropriate standard. Also article gives the comparison of the result of numerical modeling and experimental investigation. Deviation of the calculated values on and experimental values for a turbulence models with a standard set of constants for a Reynolds number more than 105 does not exceed 1,5 %. Better A satisfactory agreement between the experimental and calculated data has been obtained by modifying constants in turbulence models.

Введение

Для измерения расходов жидкостей и газов при заборе из большого объема или при сбросе в большой объем могут использоваться торцевые сужающие устройства (СУ), которые монтируются, соответственно, на входе или на выходе измерительного трубопровода (ИТ). Первый случай измерений удобен при испытаниях различных компрессоров, горелочных устройств и т.п. Второй – при решении экологических и др. задач. Для широкого применения торцевых СУ необходимы знания их метрологических характеристик в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров. В настоящий момент применение торцевых СУ ограничено отсутствием официальных Правил и методик измерения расхода на их основе.

В классе торцевых СУ для измерения расхода на входе в ИТ наибольшее распространение имеют стандартные диафрагмы. Результаты первых исследований коэффициента расхода торцевых диафрагм были опубликованы в 1934 году Штахом [1]. Независимо от относительного диаметра получено, что коэффициент расхода при $Re \geq 5,5 \cdot 10^4$ составляет величину 0,6. Другие исследования [2-4] подтвердили данное значение. Отсутствие зависимости коэффициента расхода от числа Рейнольдса и относительного диаметра свидетельствует о широком и универсальном характере использования торцевой диафрагмы.

В условиях стандартного монтажа сопло по сравнению с диафрагмой обладает более стабильными характеристиками при длительной эксплуатации, имеет меньшие потери давления и в меньшей степени реагирует на турбулентные пульсации потока, но неопределенность коэффициента истечения больше, чем у диафрагмы [5]. Во многом достоинства сопла определяются достаточно полным сжатием струи, что обеспечивает профиль сопла, и меньшим вихреобразованием за соплом [6].

Для стандартного сопла ИСА 1932 существует зависимость коэффициента истечения от числа Рейнольдса и относительного диаметра $\beta = d/D$ [7], где d , D – диаметры отверстия СУ и ИТ, соответственно. Предположение об отсутствии качественных отличий в структуре потока за СУ в условиях стандартного монтажа и при торцевом исполнении дает основание для существования зависимостей коэффициента истечения торцевого сопла от Re и от β .

В отношении метрологических характеристик торцевых сопел данные, представленные в литературе, весьма скудные. Так, Штах для торцевых сопел без входного участка с $\beta_{вых} = 0,4 \div 0,7$ (индекс «вых» означает, что относительный диаметр рассчитывался по диаметру ИТ на выходе СУ, т.к. на входе $D \rightarrow \infty$ и $\beta \rightarrow 0$) при $Re \geq 5,5 \cdot 10^4$ независимо от относительного

диаметра получил значение коэффициента расхода 0,99. В более поздних работах [8] с погрешностью 0,6 % было получено значение коэффициента расхода 0,992.

Анализ современного состояния исследований метрологических характеристик торцевых сопел без входного участка позволяет сделать следующие выводы:

- коэффициент расхода практически не зависит от числа Рейнольдса, что вызывает сомнения при сопоставлении зависимостей коэффициента истечения стандартного сопла;
- отсутствует зависимость коэффициента расхода от геометрических параметров сопла.

Цель работы

Изложенное выше определило цель работы – исследовать метрологические характеристики торцевого сопла. Достижение данной цели предполагает выполнение следующих задач:

- проведение экспериментальных и численных исследований коэффициента истечения торцевых сопел с забором из безграничного объема (отсутствует входной трубопровод);
- численное моделирование коэффициента истечения сопла ИСА 1932 в условиях стандартного монтажа [7] в целях верификации расчетных моделей.

Экспериментальная часть

Экспериментальное определение коэффициента истечения торцевого сопла проводилось на государственной эталонной установке Эу-2 Государственного первичного эталона массового и объемного расходов газа ГЭТ-118-2006 ФГУП ВНИИР с расширенной стандартной неопределенностью $\leq 0,094$ %.

В качестве торцевого сопла исследовалось сопло ИСА 1932 для ИТ диаметром 200 мм. Для проведения экспериментов были изготовлены 2 торцевых сопла согласно требованиям ГОСТ 8.586.3–2005 [7] с $\beta_{\text{вых}} = 0,6$ и $0,75$. Исследуемые торцевые сопла с угловым отбором давления через кольцевую камеру осреднения монтировались на трубопроводе диаметром 200 мм и длиной 4 м, что превышало минимально допустимую длину выходного участка после СУ [7]. Подвод воздуха к торцевому СУ соответствовал естественным нестесненным условиям, что обеспечивалось отсутствием препятствий, нарушающих движение воздуха на расстояниях не менее $20d$ перед СУ по направлению оси и не менее $10d$ перпендикулярно оси от СУ [1].

В процессе экспериментальных исследований набором калиброванных критических сопел задавался эталонный расход газа $q_{m,эт}$, измерялись давление p , температура T , влажность поверочной среды в невозмущенных условиях помещения и перепад давления Δp на исследуемом торцевом сопле. По результатам измерений давления, температуры и влажности косвенным методом определялась плотность среды ρ .

Уравнение для определения коэффициента истечения имеет вид:

$$C = q_{m,эт} / \left(\frac{\pi}{4} d^2 \varepsilon \sqrt{2 \Delta p \rho} \right), \quad (1)$$

где ε – коэффициент расширения, учитывающий сжимаемость среды, который рассчитывался по формуле

$$\varepsilon = \sqrt{\left(\frac{k \tau^{2/k}}{k-1} \right) \left(\frac{1 - \tau^{(k-1)/k}}{1 - \tau} \right)},$$

здесь $\tau = 1 - \Delta p / p$.

Неопределенность коэффициента истечения зависит от точности измерений.

Для обеспечения точности задаваемого расхода $q_{m,эт}$ проводилась калибровка критических сопел по методике ВНИИРа [9].

Перепад давлений на торцевом сопле измерялся преобразователем перепада давлений «Yosogawa» ЕА 110А с пределом приведенной погрешности $\pm 0,15\%$. Верхний предел измерений перепада давлений 10 кПа. С уменьшением перепада давления пределы допускаемой основной приведенной погрешности увеличиваются. В нижнем диапазоне 130 – 150 Па относительная погрешность преобразователя достигает 5%.

Для повышения точности измерений преобразователь перепада давления подвергался индивидуальной калибровке с помощью калибратора давления Метран-517. Для проведения калибровки использовался эталонный модуль Метран-518 с диапазоном измерения давлений 0 – 10 кПа и предел допускаемой приведенной погрешности $\pm 0,02\%$. Результаты калибровки показали, что погрешность преобразователя перепада давления не выходит за пределы погрешности калибратора. В расчетах погрешности преобразователя перепада учитывались как случайные, так и инструментальные погрешности.

Точность измерения температуры и влажности обусловлена параметрами преобразователя ИВТМ-7: в диапазоне от -20°C до 60°C абсолютная погрешность измерения температуры $\Delta_T = 0,1^\circ\text{C}$; абсолютной погрешность измерения влажности в диапазоне от 2 до 98 % составляла $\Delta_\phi = 1$ %. Методическая погрешность определения давления насыщенного водяного пара не превышала 0,05 %.

Неопределенность коэффициента истечения согласно ГОСТ 8.586.5 рассчитывалась как неопределенность измерений величин, связанных с коэффициентом истечения функциональной зависимостью (1), по формуле

$$u'_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n (g_i u'_i)^2},$$

где g_i , u'_i – коэффициент влияния и неопределенность параметра X_i , входящего в уравнение (1). В свою очередь, коэффициенты влияния рассчитывались следующим образом

$$g_i = \frac{\partial C}{\partial x_i} \frac{x_i}{C}.$$

Расчеты показали, что в диапазоне от 180 до 3500 Па по перепаду давления на сопле инструментальная погрешность не превышает 0,61 %.

Результаты измерений и проведенные расчеты показали, что случайная составляющая для различных диапазонов перепада давления изменялась от 0,02% (при больших перепадах) до 0,1% (при перепадах около 120 Па). Эти значения составляют менее 1/3 от величины инструментальной погрешности преобразователя перепада.

Расчитанные значения неопределенности коэффициента истечения не превышают неопределенность, определяемую стандартом.

Результаты экспериментальных исследований

Исследования коэффициента истечения торцевых сопел проведены в диапазоне $3 \cdot 10^4 \leq Re_D \leq 4,5 \cdot 10^5$, рассчитанного относительно диаметра ИТ.

При измерениях в низком диапазоне чисел Рейнольдса возникали трудности с точностью измерений малых перепадов давления. В свою очередь ограничения по наибольшему значению Re_D определялись возможностями подачи эталонного расхода поверяемой среды.

Экспериментальные зависимости $C = f(Re_D)$ приведены на рис.1. Полученные значения коэффициента истечения торцевого сопла в диапазоне $Re_D \geq 10^5$ соответствуют экспериментальным данным [8]. Показано, что коэффициент истечения торцевого сопла увеличивается с ростом Re и зависит от $\beta_{\text{вых}}$. Неопределенность коэффициента истечения для сопла с $\beta_{\text{вых}} = 0,75$ выше, чем для сопла с $\beta_{\text{вых}} = 0,6$.

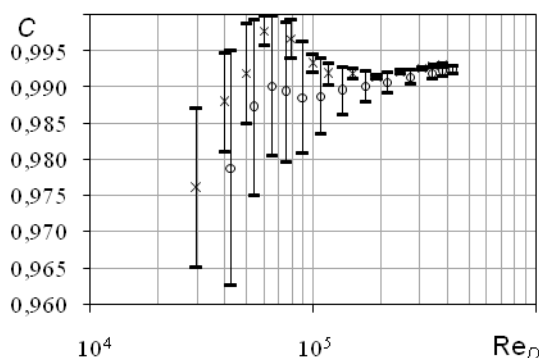


Рис. 1 - Экспериментальные зависимости коэффициента истечения торцевых сопел:
× – $\beta_{\text{вых}} = 0,6$; ○ – $\beta_{\text{вых}} = 0,75$

При перепадах $\Delta p > 200$ Па, соответствующих $Re_D > 10^5$, расширенная неопределенность < 1 % и зависимостям $C = f(Re_D)$ свойственно монотонное увеличение, а при $\Delta p \leq 100$ Па ($Re_D < 10^5$) неопределенность

коэффициента истечения > 1 % и монотонный характер зависимостей $C = f(Re_D)$ отсутствует.

При $Re_D \geq 10^5$ максимальные отклонения предельных экспериментальных значений коэффициента истечения относительно их среднего значения < 1 %, что хорошо согласуется с расчетами неопределенности. С ростом числа Рейнольдса разброс экспериментальных значений коэффициента истечения, как и его неопределенность, монотонно убывает.

Численные исследования

Экспериментальное определение коэффициента истечения в широком диапазоне режимных и конструктивных параметров торцевых сопел требует существенных материальных затрат. Особенно проблемно получить экспериментальные данные для торцевых сопел при высоких числах Рейнольдса. Численные методы, позволяющие корректно рассчитывать коэффициент истечения, могут позволить сократить объем экспериментальных работ и способствовать получению инженерных зависимостей для расчета коэффициента истечения.

Применение численных методов для расчета коэффициента истечения стандартной диафрагмы, как показано в [10,11], обеспечивает точность определения C в пределах систематической погрешности.

Апробация применения численных методов к расчету коэффициента истечения торцевых сопел проведена на примере расчета течения на участке ИТ с соплом ИСА 1932 в условиях стандартного монтажа [7]. Рассматривался ИТ диаметром $D = 200$ мм и сопло ИСА 1932 с относительным диаметром в диапазоне $0,4 \leq \beta \leq 0,6$. Расчеты выполнялись с применением программного обеспечения ANSYS Fluent.

Моделирование проводилось в осесимметричной постановке в рамках изотермического несжимаемого течения. Геометрия расчетной области отражала все конструктивные особенности монтажа и обеспечивала отсутствие влияния граничных условий на результаты расчета. Сетка создавалась с выделением пограничных слоев, что обеспечивало возможность сеточного разрешения вязкого подслоя. Расчеты проводились по двум моделям турбулентности – $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST со стандартным набором эмпирических констант. Коэффициент истечения сопла ИСА 1932 при стандартных условиях монтажа рассчитывался по формуле

$$C = q_m / \left(\frac{\pi}{4} d^2 \left(1 / \sqrt{1 - \beta^4} \right) \sqrt{2 \Delta p \rho} \right).$$

Результаты моделирования показали возможность рассчитывать коэффициент истечения в пределах неопределенности, установленной стандартом ($U'_C = 0,8$ % для $\beta \leq 0,6$). Независимо от β при $Re_D > 3 \cdot 10^4$ относительные отклонения расчетных значений коэффициента истечения от данных [7] не превышают 0,7 %. В качестве примера

на рис.2. приведены результаты расчета для сопла с $\beta = 0,6$.

Следует отметить, что, например, для $\beta = 0,4$ модели турбулентности $k-\omega$ SST и $k-\varepsilon$ RNG практически одинаково прогнозируют коэффициент истечения (отличия не превышают 0,5 %). С увеличением β появляются определенные отличия в структуре потока по рассматриваемым моделям турбулентности и соответственно растут различия в коэффициенте истечения. Для $\beta = 0,6$ при $Re_D < 2 \cdot 10^4$ расчетные значения коэффициента истечения выходят за рамки допустимой стандартном неопределенности.

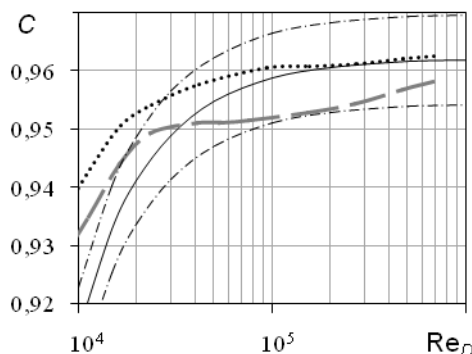


Рис. 2 - Сопоставление расчетных зависимостей $C = f(Re_D)$ сопла ИСА 1932 при $\beta = 0,6$ в условиях стандартных монтажа с данными стандарта (—) и допустимой неопределенностью (---) [7]; – модель турбулентности $k-\omega$ SST; — — — $k-\varepsilon$ RNG

Зависимости $C = f(Re_D)$ торцевого и стандартного сопел отличаются между собой. Очевидно, что зависимости коэффициента истечения стандартного сопла ИСА 1932 не пригодны для оценки значений коэффициента истечения торцевого сопла.

Целью численных исследований течения в ИТ с торцевым соплом был выбор модели турбулентности, обеспечивающей лучшее согласование результатов расчета с экспериментальными данными.

Для организации численных исследований использовалась постановка задачи, аналогичная расчету сопла в стандартных условиях. Расчетная область строилась в соответствии с условиями эксперимента. Граница расчетной области на входе располагалась по радиусу на расстоянии $\approx 10d$ от оси сопла, что исключало ее влияние на результаты расчета. Сетка строилась с необходимым разрешением вязкого подслоя. Для проведения расчетов использовались те же 2 модели турбулентности – $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST.

Расчеты со стандартным набором констант в выбранных моделях турбулентности показали, что существует расхождение расчетных и экспериментальных данных (рис. 3). Качественный характер полученных численных зависимостей $C = f(Re_D)$ соответствует экспериментальному.

Модели турбулентности $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST практически одинаково прогнозируют коэффициент истечения торцевого сопла. Существенные отличия в результатах расчета между моделями турбулентности $k-\varepsilon$ RNG и $k-\omega$ SST наблюдаются для сопла с $\beta_{\text{вых}} = 0,6$ в диапазоне $Re_D \leq 3 \cdot 10^4$. В других случаях отличия не превышают 0,4 %.

Наибольшие расхождения расчетных и экспериментальных данных существует в диапазоне $Re_D \leq 10^5$ и составляет $> 2\%$. Следует отметить, что при $Re_D \leq 10^5$ экспериментальные данные получены с неопределенностью, превышающую допустимую, о чем свидетельствует разброс результатов измерений. С увеличением Re расхождение уменьшается, но сохраняется до 1,5 %.

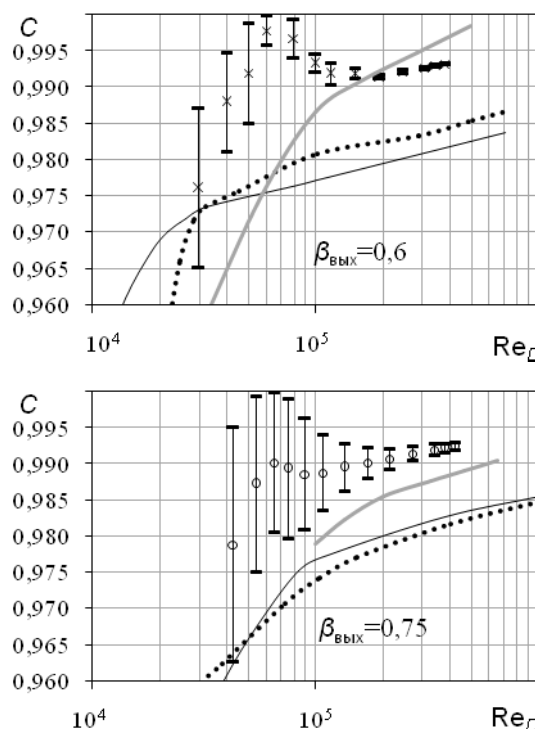


Рис. 3 - Сопоставление экспериментальных и расчетных зависимостей $C = f(Re_D)$ торцевых сопел: – модель турбулентности $k-\omega$ SST; — — — модель $k-\varepsilon$ RNG; — — — модель $k-\varepsilon$ RNG с модифицированным набором констант

Полученное расхождение расчетных и экспериментальных данных может быть вызвано многими причинами, одна из которых, неравномерность профиля скорости по соплу. Выравнивание профиля скорости в математической модели можно обеспечить за счет повышения интенсивности турбулентности, что возможно за счет корректировки значений констант в моделях турбулентности.

Модель $k-\varepsilon$ RNG является более привлекательной для исследований влияния значений модельных констант на величину коэффициента истечения, т.к. без учета эффектов вращения имеет всего три модельных константы, а модель $k-\omega$ SST – пять. Кроме этого, при $Re_D \geq 10^5$ рассматриваемые модели турбулентности

практически одинаково прогнозируют коэффициент истечения.

В модели RNG используются константы C_μ , $C_{1\varepsilon}$ и $C_{2\varepsilon}$. Константа C_μ необходима для расчета турбулентной вязкости μ_t , которая в пределе $Re \rightarrow \infty$ имеет значение 0,0845, а в низкорейнольдсовой области определяется расчетным путем. Константы $C_{1\varepsilon}$ и $C_{2\varepsilon}$ соответственно используются в членах, отвечающих за генерацию и диссипацию кинетической энергии турбулентности (стандартные значения констант: $C_{1\varepsilon}=1,42$; $C_{2\varepsilon}=1,68$). При заданном перепаде давления последовательно исследовалось влияние той или иной константы при постоянных значениях других. Влияние констант на коэффициент истечения исследовалось для ИТ с различными $\beta_{\text{вых}}$ торцевых сопел в зависимости от Re .

Исследования показали, что максимальные значения коэффициента истечения торцевого сопла получаются при значениях констант $C_\mu=0,16$, $C_{1\varepsilon}=1$ и $C_{2\varepsilon}=2$. Модификация констант приводит к снижению расхождения между расчетом и экспериментом. После корректировки констант в диапазоне $Re_D > 10^5$ расхождение результатов расчета с экспериментальными данными не превышает 0,5 % для сопла с $\beta_{\text{вых}}=0,6$ и 0,9 % для сопла с $\beta_{\text{вых}}=0,75$. Сопоставления расчетных зависимостей $C=f(Re_D)$ с откорректированными значениями констант и со стандартным набором модельных констант отражены на рис.3.

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Получены экспериментальные зависимости коэффициента истечения торцевых сопел от числа Рейнольдса и от относительного диаметра.

2. Численные исследования коэффициента истечения стандартного сопла ИСА 1932 показали адекватную возможность расчета коэффициента истечения в пределах неопределенности, установленной стандартом.

3. Расчетные значения коэффициента истечения торцевого сопла по моделям турбулентности со стандартным набором модельных констант в диапазоне $Re_D > 10^5$ дает

расхождение с экспериментальными данными до 1,5 %.

4. Модификация констант в моделях турбулентности приводит к уменьшению расхождения между результатами численного и экспериментального исследований.

Литература

1. П.П. Кремлевский, Расходомеры и счетчики количества: Справочник. Л.: Машиностроение, 1989.701с.
2. В.Ф. Рис, Н.А. Широков, Энергомашиностроение, №10, 13-14 (1984)
3. ISO/DIS 5221. Draft International standard. Guide to methods of measuring air flow rate in an handling duct. 1980.
4. Р.С. Гареев, И.А. Быков, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин, И.Ф. Яценко, Вестник Казан. технол. ун-та, т.16, №17, 197-200 (2013)
5. ГОСТ 8.586.1–2005 (ИСО 5167-1:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 1. Принцип метода измерений и общие требования.
6. В.П. Преображенский, Теплотехнические измерения и приборы: Учебник для вузов по специальности «Автоматизация теплотехнических процессов». М.: «Энергия», 1978. 704 с.
7. ГОСТ 8.586.3–2005 (ИСО 5167-3:2003). Измерение расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Часть 3. Сопла и сопла Вентури. Технические требования.
8. E. Eujen, O. Burcke, BWK, Bd.12, №10, 63-64 (1960)
9. Методика калибровки эталонных критических сопел при атмосферном давлении на исходной эталонной установке Государственного первичного эталона единиц объемного и массового расходов газа ГЭТ 118-2006. МК 2567988-03-2008. Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт расходомерии». Казань, 2008 г., 19 с.
10. Р.И. Ганиев, Н.А. Николаев, А.Н. Сабирзянов, В.А. Фафурин, В.Б. Явкин, Изв. Вузов. «Авиационная техника», №4, 21–24 (2008)
11. Р.А. Тырышкин, А.Н. Сабирзянов, В.А. Фафурин, В.В. Фелелов, В.Б. Явкин, Вестник Удмуртского университета. Математика. Механика. Компьютерные науки. Вып.2, 109-116 (2010)

© И. А. Яценко – технич. дир., Метрологический центр ООО «СТП»; office@ooostp.ru; А. Н. Сабирзянов – к.т.н., доц. каф. реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ им. А.Н.Туполева, ANSabirzyanov@kai.ru; В. А. Фафурин – д.т.н., проф., зав. каф. систем автоматизации и управления технологическими процессами КНИТУ, fafurin_va@kstu.ru; В. Б. Явкин – к.т.н., доц. каф. реактивных двигателей и энергетических установок КНИТУ им. А.Н.Туполева, vd.yavkin@gmail.com.