

А.С.Анчишкин, А.Л.Горохов,
В.А..Магала, А.Л.Манин

ОПЫТ ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР» ПО СОЗДАНИЮ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ РАСХОДА ДЛЯ РАБОТЫ В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ ТЕМПЕРАТУР ИЗМЕРЯЕМОЙ СРЕДЫ

Преобразователи расхода, выпускаемые предприятием ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР», преобразуют расход или объем потребляемой жидкости в частотный или импульсный электрические сигналы и используются при измерении расхода или объема жидкости в напорных трубопроводах для технологических целей и учетно – расчетных операций. В настоящее время предприятием выпускаются преобразователи двух типов: ВЭПС – Т(И) с динамическим диапазоном расходов 1 : 100, температура измеряемой среды может иметь любое значение из ряда $t = 0 - 150^{\circ}\text{C}$. Частично информация об опыте создания таких приборов представлена в [1], однако формат статьи и задачи, ставившиеся перед ней, делали несвоевременным изложение видения предприятием проблем и способов их решения, сопровождавших разработчиков на всем пути создания прибора с динамическим диапазоном 1 : 100. В настоящее время преобразователь выпущен в продажу. А опыт возможно будет полезен создателям приборов с динамическим диапазоном выше 1 : 100, например для – 1 : 250 или 1 : 500.

Приборы используют «прямую» зависимость частоты схода вихрей с кромки (кормовой части) «плохо» обтекаемого тела (турбулизатора) от скорости «невозмущенного» потока. На рис.1 представлена опубликованная в [2] характеристика течения у цилиндра, обтекаемого бесконечным невозмущенным потоком – зависимость числа Струхала

$$\text{Sh} = \frac{f \cdot b}{C_0}, \quad (1)$$

где: f – частота схода вихрей, 1/с
 b – мидель сечения турбулизатора - обтекаемого тела, м
 C_0 – скорость потока в невозмущенном сечении, м/с
от числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{C_0 \cdot b}{\nu}, \quad (2)$$

где ν – вязкость кинематическая, $\text{м}^2/\text{с}$,

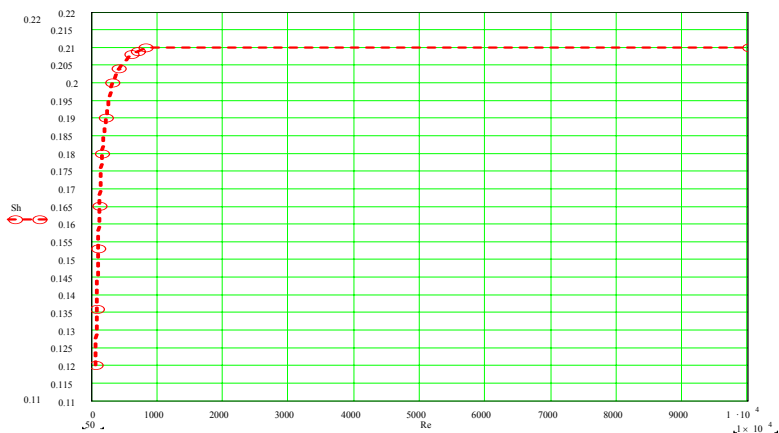


Рис. 1 Зависимость числа Струхала (Sh) от числа Рейнольдса (Re) для течения у круглого цилиндра

Увеличение числа Рейнольдса приводит к увеличению числа Струхала, в области чисел Рейнольдса $Re > 800$ число Струхала принимает постоянное значение $Sh = 0.21$.

На рис. 2 представлена характеристика преобразователя расхода ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР» $d_u 25$ мм, полученная по результатам испытаний при изменении расхода в диапазоне 1 : 100 и температур от 18 до 90°C.

Характеристики, представленные на рис. 1 и 2 и построенные в критериях подобия, отличаются не только по значению параметра Sh, но и по характеру зависимости $Sh = f(Re)$. Для течения в бесконечном потоке увеличение числа Re приводит к увеличению числа Sh, для течения в преобразователе (пространство, ограниченное стенками канала преобразователя) увеличение числа Re приводит к уменьшению числа Sh практически во всем диапазоне изменения расхода.

Однако противоречий в этом факте нет.

Образование и отрыв вихрей у цилиндра вызваны диффузорным характером течения в пограничном слое на тыльной стороне цилиндра, поэтому при достижении режима автомодельности, при котором течение в пограничном слое на поверхности цилиндра

стабилизируется, критерий частоты схода вихрей Sh принимает постоянное значение.

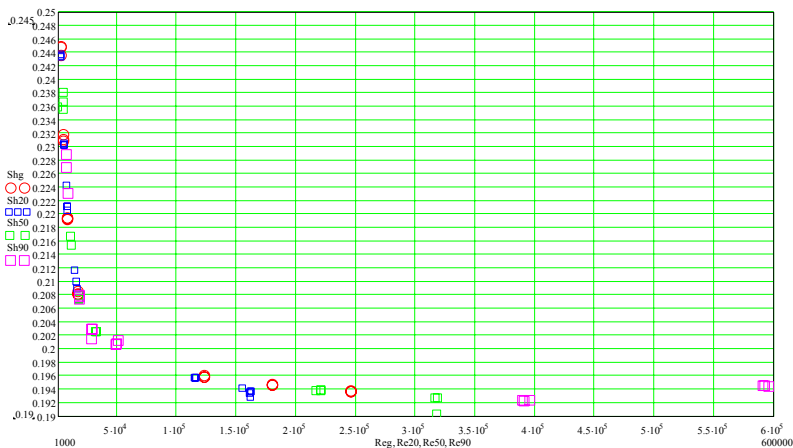


Рис. 2 Зависимость числа Струхала от числа Рейнольдса для течения в канале преобразователя

Образование и отрыв вихрей у турбулизатора (тела обтекания) преобразователя вызвано диффузорным характером всего течения в канале преобразователя, характеризуемого изменением сразу двух параметров, прямо влияющих на частоту схода вихрей. На течение у турбулизатора преобразователя непосредственное влияние оказывает пограничный слой, образующийся на стенках, ограничивающих канал преобразователя. Наличие пограничного слоя на стенках «трубы» приводит к изменению скорости потока жидкости по всему поперечному сечению канала - от $C = 0$ на стенках до $C = C_{max}$ на оси канала, при этом значение максимальной скорости (на оси трубы), отнесенной к осредненной по расходу скорости потока Co ($C_m = C_{max}/Co$), прямо зависит от числа Re , определенного как

$$Re = \frac{Co \cdot d_0}{\nu},$$

где d_0 — внутренний диаметр канала преобразователя, м. Такая зависимость для диапазона изменения числа Re от 2 500 до 2 000 000 представлена на рис. 3. На рис. 4 представлено распределение

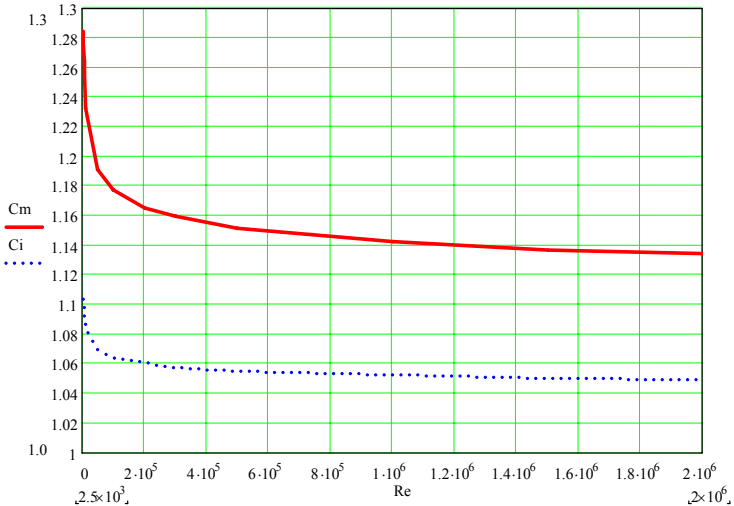


Рис. 3 Влияние числа Re на максимальную скорость в канале C_m и интеграл скорости в диаметральной плоскости C_i

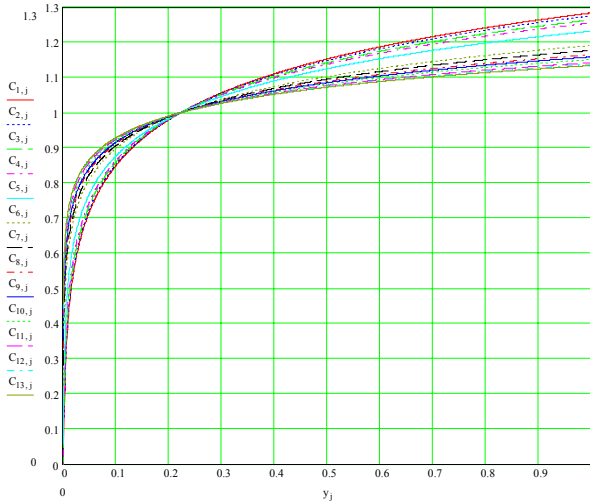


Рис. 4 Распределение скорости течения по сечению канала (C_1 при $Re = 2\,500$, C_{13} при $Re = 2\,000\,000$)

относительной скорости (скорости C , отнесенной к скорости, осредненной по расходу C_0) вдоль безразмерного радиуса для чисел Re от 2 500 до 2 000 000. Уменьшение числа Re приводит:

- к увеличению скорости в ядре потока C_{max} , так значение C_m увеличивается от $C_m = 1.13$ до $C_m = 1.284$ (при ламинарном режиме течения $Re < 2\ 300\ C_m \rightarrow 2.0$);
- заметному уменьшению энергии потока в пограничном слое, снижающему возможность потока к движению в сторону растущего давления.

Следует отметить, что аналогичный пограничный слой имеется и на поверхности турбулизатора. Такие особенности обтекания тела потоком в канале приводят к изменению способности потока, обтекающего тело в канале, к отрыву практически во всем диапазоне изменения расхода, ($Sh = f(Re)$) во всем диапазоне изменения расхода, что подтверждают результаты экспериментальных исследований) и нелинейности градуировочных характеристик преобразователей.

Для оценки нелинейности характеристики преобразователя предлагается отношение K значений числа Sh при минимальном и максимальном расходах

$$K = \frac{Sh_{max}}{Sh_{min}} \quad (3)$$

На рис. 5 представлены значения коэффициента нелинейности преобразователей типа ВПС (динамический диапазон 1 : 100) и ВЭПС – Т(И) (динамический диапазон 1 : 25), рассчитанные по результатам экспериментальных данных. Увеличение диаметра преобразователя приводит к уменьшению коэффициента нелинейности для всех типов преобразователей, что связано с увеличением числа Re на границах рабочего диапазона преобразователей при увеличении их диаметра и, как следствие, уменьшением крутизны характеристики функции $Sh = f(Re)$. Из вышеизложенного следует, что увеличение динамического диапазона вихревого преобразователя расхода неизбежно приводит к увеличению нелинейности градуировочной характеристики преобразователя.

И наконец о влиянии температуры измеряемой среды на характеристику преобразователя. Изменение температуры измеряемой среды приводит к изменению вязкости кинематической, достаточно заметить, что для воды изменение температуры от 20°C до 150°C

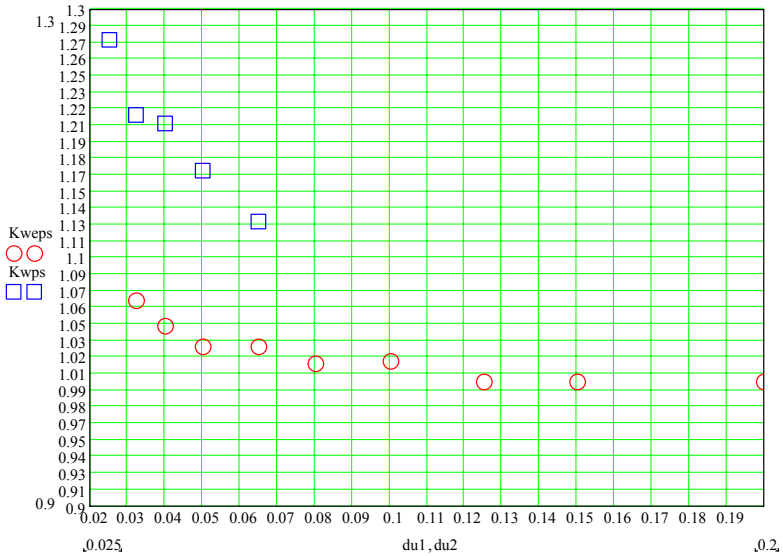


Рис. 5 Коэффициент нелинейности преобразователей, производимых ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР»
 (□- преобразователи ВПС, ○ – преобразователи ВПС – Т(И))

приводит к уменьшению вязкости в 5 раз и соответственному увеличению числа Re . Такое изменение числа Re приведет к уменьшению числа Sh - заметному при минимальных расходах и незначительному при расходах больше номинального. Причем степень влияния в нижней части характеристики преобразователя будет определяться коэффициентом нелинейности характеристики K преобразователя. Согласно рис. 5 увеличение динамического диапазона неизбежно приводит к заметному влиянию температуры на градуировочную характеристику преобразователя.

Авторами в [1] отмечено, что линейная зависимость между расходом и частотой схода вихрей вида

$$Q = A \cdot f + B, \quad (4)$$

где Q – расход часовой, $m^3/час$, а A и B постоянные, однозначно определяет степенной характер зависимости числа Sh от числа Re в виде

$$Sh = F + \frac{D}{Re}, \quad (5)$$

где F и D – постоянные, причем

$$A = \frac{900 \cdot \pi \cdot d_o^2 \cdot b}{F} \quad (4a)$$

$$B = (-1) \cdot \frac{900 \cdot \pi \cdot d_o \cdot D}{F} \cdot \nu t, \quad (4б)$$

где νt – вязкость кинематическая при температуре измеряемой среды $t^\circ\text{C}$.

При увеличении динамического диапазона выше 1 : 25 реальная характеристика преобразователя расхода $Sh = f(Re)$ заметно отличается от степенной (5), а $Q = f(f)$ – от прямой (4) и характеризуется существенной нелинейностью в зоне малых расходов (см. рис. 5). Проблема разрешена кусочно - линейной аппроксимацией зависимости $Q = f(f)$ и соответственно кусочно – степенной – зависимости $Sh = f(Re)$. Температурная коррекция осуществляется введением поправки на вязкость кинематическую [1]. Следует уточнить, что поправка вводится в пределах конкретного участка - отрезка кусочно – аппроксимированной градуировочной функции и до введения поправки в обязательном порядке надлежит определить точку в которой преобразователь работает в текущий момент времени. Имеется в виду, что при изменении температуры относительно условий, в которых осуществлена градуировка преобразователя, работающего в широком диапазоне изменения температуры (на холодной и горячей воде, в системе отопления), число Re изменяется в несколько раз. Отсутствие температурной коррекции в преобразователях с широким динамическим диапазоном неизбежно приведет к заметным ошибкам при определении расхода в нижнем диапазоне характеристики.

Опыт работы с преобразователями типа ВПС (динамический диапазон 1 : 100) показал, что рост температуры измеряемой среды при отсутствии температурной коррекции приводит к ошибке в определении минимального расхода до:

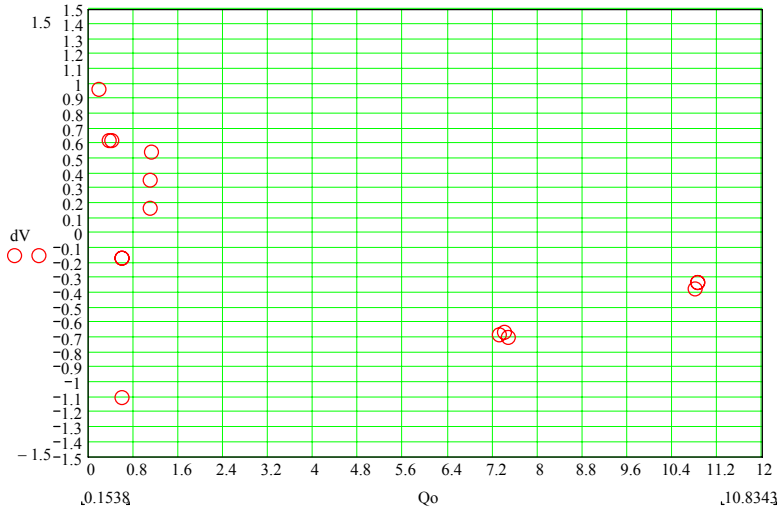
- 5% при температуре воды 50°C
- 9% при температуре воды 90°C
- 11% при температуре воды 135°C
- + 3% при температуре воды 10°C

У преобразователей ВЭПС – Т(И) (динамический диапазон 1 : 25) влияние температуры на порядок ниже.

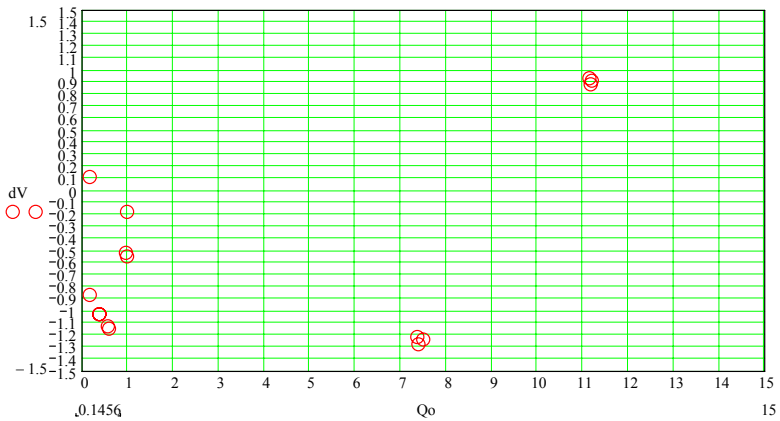
На рис. 6, 7 и 8 представлены результаты горячих проливок отградуированных на поверочной установке ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР» преобразователей ВПС du 25, 32, 40 и 50 мм на горячеводной установке ГЦИ СИ НИИ «ТЕПЛОПРИБОР», выполненных в феврале 2004 года. Температура воды изменялась в пределах от 20 до 90°C. На рисунках представлены результаты поверки только на горячей воде для температур воды от 50 до 90°C. Практически во всем исследованном диапазоне расходов ошибка в определении объема не вышла за пределы заявленных характеристик преобразователей, что подтвердило правильность представлений и технических решений, заложенных в систему температурной коррекции преобразователей расхода вихревого типа, выпускаемых предприятием.

Главное, на что авторы статьи хотели обратить внимание читателя, - причина заметного влияния температуры на характеристики преобразователей расхода обусловлена вязкостью жидкости, ее зависимостью от температуры (у воды, при изменении температуры от 0 до 150°C, вязкость изменяется в 8.83 раз) и наличием жестких поверхностей, ограничивающих канал преобразователя, совместно формирующих профиль скоростей в канале, постоянно изменяющийся при изменении температуры и расхода. Поэтому влияние температуры при широком динамическом диапазоне изменения расхода следует ожидать для всех преобразователей, сигнал которых формируется полем скоростей в канале – электромагнитных, ультразвуковых и др.

Для преобразователя электромагнитного или ультразвукового выходной сигнал пропорционален интегралу от скорости по диаметру. На рис. 3 представлена функция $C_i = f(Re)$, где C_i есть интеграл от скорости по радиусу, отнесенный к скорости C_0 , осредненной по расходу. Для преобразователей электромагнитных до du 40 мм с динамическим диапазоном более 1 : 100 при отсутствии температурной коррекции увеличение температуры на 100°C приведет в области малых расходов к ошибке – (4 – 5) %. Поэтому производители преобразователей с динамическим диапазоном 1 : 250 и

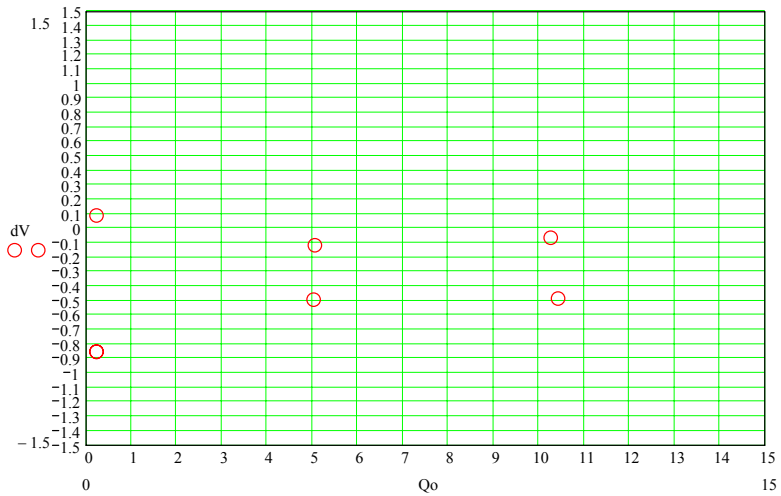


а)

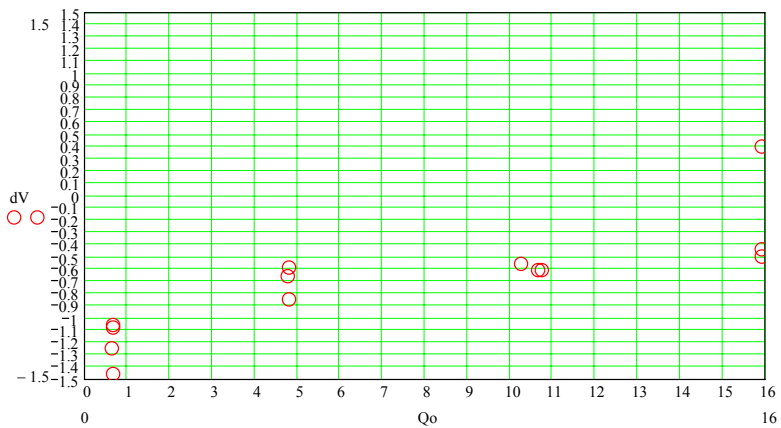


б)

Рис. 6 Экспериментальные характеристики преобразователя du 25 зав. № 02520009 (а – температура воды 50°C, б - 90°C, dV в %, Q в $\text{m}^3/\text{час}$)



а)



б)

Рис. 7 Экспериментальные характеристики преобразователей:
 (а - du 32 зав. № 03220009 при температуре воды 80°C
 б - du 40 зав. № 04020010 при температуре воды 90°C
 dV в %, Q в м³/час)

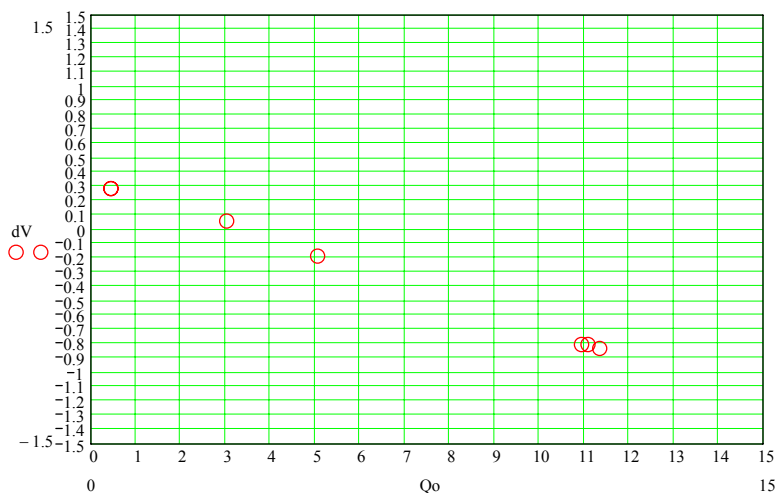


Рис. 8 Экспериментальная характеристика преобразователя du 50 зав. № 05020008 при температуре воды 60 - 80°C
(dV в %, Q в м³/час)

более часто заявляют в нижней области характеристики допускаемую погрешность $\pm (5 - 10)\%$. Но в этом есть элементы некоторого лукавства, т.к. при таких динамических диапазонах изменения расхода неизбежна работа преобразователей, по крайней мере до du 50мм при минимальных расходах, в области чисел $Re = 2\ 300$ и менее – «классической» границы раздела между турбулентным (достаточно понятным и прогнозируемым) и ламинарным режимами течения, с заметно отличающимися профилями скорости. В этом случае имеет место перемежаемый характер течения, прямо зависящий от значения числа Re (скорости или температуры) и длины начального участка [2], который должен составлять от 75 до 500 условных диаметров. Поэтому в настоящее время, из-за отсутствия установок, располагающих соответствующими входными участками, практически невозможны ни объективная градуировка такого преобразователя в области минимального расхода, ни его поверка на другой установке, ни прогнозирование ошибки при работе у потребителя.

Именно по этим причинам ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР», располагающее техническими решениями по корректировке нелинейности характеристик

преобразователей и увеличению динамического диапазона своих преобразователей по крайней мере до 1 : 200 , в настоящее время выбрало для преобразователей ВПС динамический диапазон изменения расхода 1 : 100.

Из вышеизложенного также следует возможность получения градуировочной характеристики преобразователей вихревых (да и электромагнитных) для работы в любом диапазоне температур на холодноводной установке. Для этого достаточно «пролить» преобразователи на холодноводной установке в диапазоне чисел Re , соответствующем реальным условиям эксплуатации, и рассчитать коэффициенты - для вихревых преобразователей А и В согласно (4а) и (4б), для электромагнитных - согласно разработанной методике.

Преобразователи расхода со значительным динамическим диапазоном (более 1 : 30) при отсутствии температурной коррекции должны градуироваться в диапазоне изменения чисел Re , соответствующем температуре эксплуатации (для 20, 60, 90 или 150°C).

Литература

1. А.С.Анчишкин, А.Л.Горохов, В.А.Магала, А.Л.Манин Опыт создания и эксплуатации преобразователей расхода, выпускаемых ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР» «Совершенствование измерений расхода, регулирование и коммерческий учет энергоносителей» Материалы 3 го Международного научно – практического форума двух конференций: 18 – й - «Коммерческий учет энергоносителей» и 13 - й – «Совершенствование измерений расхода жидкости, газа и пара» 2 – 4 декабря 2003 Санкт – Петербург 2003 г.
2. Г. Шлихтинг Теория пограничного слоя. Издательство «НАУКА» Главная редакция физико – математической литературы. МОСКВА 1974.

Авторы:

Анчишкин Александр Сергеевич, генеральный директор ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР»;

Горохов Андрей Львович, технический директор ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР»

Магала Владимир Александрович, к.т.н., зам. генерального директора ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР» по науке;

Манин Андрей Львович, главный конструктор ЗАО НПО «ПРОМПРИБОР»

248 016, г. Калуга, Складская, 4
(4842) 55 – 02 – 48

e-mail: prompribor@kaluga.ru

www.prompribor-kaluga.ru