

Вихревые преобразователи расхода производства ЗАО НПО «Промприбор»

Статья посвящена вихревым преобразователям расхода ВПС, выпускаемым в настоящее время предприятием ЗАО НПО «Промприбор». Некоторая информация об этапах создания преобразователей ВПС представлена в опубликованных ранее статьях [1,2]. С момента публикации материалов преобразователи ВПС, по результатам наработанного опыта эксплуатации, подверглись усовершенствованию, с 2009 года серийно выпускаются преобразователи расхода с корпусом, отлитым из конструкционных термопластов Фортрон 4. В настоящее время вихревые преобразователи расхода достойно занимают свою нишу на рынке приборов учета. Поэтому предприятие сочло необходимым подвести итоги пройденному за 15 лет пути создания современных преобразователей расхода ВПС (далее - преобразователи).

Главная цель технической политики предприятия - создание и продвижение на рынок простой по конструкции и в то же время надежной продукции (преобразователей расхода, счетчиков – расходомеров, теплосчетчиков и т.д.). В части преобразователей расхода – это создание приборов, способных работать, при сохранении метрологических характеристик, в российских условиях, характеризующихся нестабильностью параметров и низким качеством измеряемых сред [4].

Предприятие, имея опыт разработки, производства и эксплуатации преобразователей расхода (с 1993 года выпускались левитирующие преобразователи, использовавшие принцип перемещения постоянного магнитного поля относительно проводника), в 1996 году разрабатывает, а в 1997 году сертифицирует и начинает серийно производить вихревые электромагнитные преобразователи расхода ВЭПС – Т(И).

В основу разработки был заложен физический принцип, основанный на непосредственной связи частоты вихреобразования (количества вихрей) со скоростью (объемом) жидкости, обтекающей неподвижное тело – источник вихрей. Для индикации вихрей использована прямая зависимость силы воздействия постоянного магнитного поля на электрические заряды в движущейся электропроводной жидкости (сила Лоренца) от скорости движения жидкости. Разработанная конструкция электромагнитного преобразователя характеризовалась некоторыми особенностями, выгодно отличавшими ее от известных на тот момент аналогов:

1. Проточная часть преобразователя изготавливалась из нержавеющей немагнитной стали и представляла собой конфузorno – диффузорный канал, что позволяло реализовать динамический диапазон измерения расхода (далее - динамический диапазон) 25:1 с приемлемым при максимальном расходе гидравлическим сопротивлением, не превышающим 0.03 МПа.
2. Магнитное поле в зоне формирования электрического сигнала создавалось двумя цилиндрическими магнитами – кольцевым и дисковым, установленными в диаметрально противоположных точках, относительно оси электрода, что позволяло увеличить уровень полезного сигнала при малых расходах.
3. Для обработки сигналов в преобразователях была использована микропроцессорная техника, характеристика преобразователя – связь расхода объемного Q с частотой вихреобразования f аппроксимирована в виде прямой $Q = a \cdot f + b$, во всем диапазоне измерения реализована относительная погрешность, не превышающая $|\pm 1\%|$.
4. Применение микромощной электроники позволило создать единственный на тот момент преобразователь расхода с автономным питанием от литиевой батареи со сроком службы не менее четырех лет.
5. Прибор имел степень защиты IP65, электронный блок помещался в экранированный корпус.

Оригинальные технические решения, заложенные в конструкцию преобразователей, были защищены патентами. Выпускались преобразователи для всего ряда значений диаметров условного прохода в диапазоне от Ду 20 до Ду 200 мм. Для каждого типоразмера тщатель-

ными исследованиями подобрана магнитная система, обеспечивающая требуемое распределение магнитного поля в области формирования электрического сигнала, и определены оптимальные геометрические характеристики турбулизатора, электрода, расстояние между турбулизатором и электродом.

В настоящее время в России и в странах ближнего зарубежья эксплуатируются десятки тысяч преобразователей ВЭПС – Т(И), произведенных в ЗАО НПО «Промприбор». Прибор получился надежным, неприхотливым к условиям эксплуатации. Но уже первые годы эксплуатации обозначили чисто российские проблемы, к которым относятся: грязная вода с самыми разными включениями - от продуктов коррозии, солей металлов, ветоши, обыкновенной грязи и металлической стружки до нерастворенного воздуха, высокая влажность и значительные колебания температуры в окружающей среде, периодические сливы воды из тепловых сетей и технология их заполнения, наличие значительных электрических токов в трубопроводах, а также электромагнитных помех промышленной и других частот. По мере накопления информации о работе преобразователей в руководстве по эксплуатации появляются соответствующие требования, правила и рекомендации. Опыт эксплуатации преобразователей у заказчика показывает, что нарушения в работе приборов, как правило, обусловлены нарушениями положений руководства по эксплуатации или нарушениями технологических процессов в системах, в которых эксплуатируются преобразователи.

Прошло время и преобразователи ВЭПС – Т(И) по некоторым характеристикам начинают отставать от требований рынка и «суровой» реальности российских условий:

1. Динамический диапазон 25:1 ограничивает применение преобразователей расхода в системах со значительным изменением расхода (открытые системы теплоснабжения, системы домового холодного и горячего водоснабжения). Время требует наличия преобразователей с динамическим диапазоном не менее 50:1.
2. Заметное гидравлическое сопротивление преобразователя (0.03 МПа при максимальном расходе) снижает его конкурентоспособность (относительно электромагнитных преобразователей расхода) при участии в выставках и тендерах.
3. Низкое качество воды, о котором упомянуто ранее, накладывает заметные ограничения на востребованность и использование приборов без магнито-механических фильтров, наличие которых далеко не всегда гарантирует работоспособность преобразователя на конкретных измеряемых средах.

Потребность в более широком динамическом диапазоне объективно продиктована желанием измерить все, что поставляется и потребляется. Что касается «заметных» на максимальном расходе гидравлических потерь в преобразователе, то, при российском выборе преобразователей (как правило, по диаметру), снижение конкурентоспособности преобразователей по этой причине определяется в основном психологическим моментом. На рабочих – эксплуатационных режимах гидравлическое сопротивление преобразователей соизмеримо с погрешностью определения давления в трубопроводе [3], но в условиях рыночной конкуренции упускать из виду психологические моменты не рекомендуется. Борьба с низким качеством измеряемых сред в России (если хочешь продавать свои преобразователи) – задача безнадежная (до настоящего времени) [4].

В силу вышеизложенного в 2000 году предприятие приступило к разработке совершенно нового вихревого электромагнитного преобразователя, который должен удовлетворить более жестким требованиям рынка – увеличенный динамический диапазон, уменьшенное гидравлическое сопротивление и устойчивость к загрязнению измеряемой среды.

Задача непростая, т.к. одновременная реализация двух первых обозначенных требований в существующей конструкции турбулизатора практически невозможна (увеличение динамического диапазона требует увеличения размеров турбулизатора, а уменьшение гидравлического сопротивления – его уменьшения).

И здесь уместно рассмотреть особенности физики процесса, происходящего в канале (содержащем турбулизатор) при вихреобразовании. О турбулизаторе большинство авторов

упоминают как о **плохо обтекаемом симметричном теле**[5]. Не вдаваясь в детали, определяющие появление вихря на поверхности турбулизатора, следует обратить внимание на то, что само появление вихря создает циркуляцию скорости у турбулизатора, обеспечивающую при отрыве вихря от поверхности турбулизатора замещение его дополнительным количеством жидкости, отобраным из области, в которой отрыв отсутствует. А это приводит к смещению точки разделения потока жидкости перед турбулизатором (на поверхности плохообтекаемой входной части турбулизатора, нормальной к набегающему потоку) в сторону безвихревой области. Скорость с вихревой стороны турбулизатора при этом возрастает, скорость с противоположной стороны турбулизатора падает. Изначально потенциальный поток в отсутствии воздействия внешних сил должен остаться потенциальным, поэтому в области с пониженной скоростью сформируется и оторвется вихрь с противоположной циркуляцией, и так, при наличии движения жидкости, до бесконечности. Следует обратить внимание, что в этом случае отрыв вихря связан с изменением характера течения всего набегающего потока (наличие перемещающейся – колеблющейся точки разделения потока) и именно с этим связан сравнительно небольшой динамический диапазон по расходу со стабильной генерацией вихрей. При течении в поле постоянных магнитов периодическая разница в скорости течения жидкости в разных областях турбулизатора и в следе за ним приводит к циклическому изменению электродвижущей силы, индицируемой электродом. Заметное снижение гидравлического сопротивления такого турбулизатора практически невозможно, т.к. может быть достигнуто только за счет придания его входной части удобообтекаемой (клинообразной) формы, но при этом появляется система из двух стационарных вихревых областей, поток становится безотрывным и в целом потенциальным.

В 2000 году в ЗАО НПО «Промприбор» был создан стенд визуализации для отработки турбулизатора с широким динамическим диапазоном изменения расхода и уменьшенным сопротивлением. Известно[6], что суммарное сопротивление двух «цилиндров» (цилиндрических тел), установленных друг за другом в потоке жидкости, при определенных условиях – расстояние между телами, может быть меньше сопротивления одиночного тела. За основу принимается схема турбулизатора (рис. 1), включающая два тела обтекания: компенсатор гидравлических сопротивлений 1 (далее компенсатор), представляющий трехгранную призму (в поперечном сечении равнобедренный треугольник, острым углом(вершиной) направленный навстречу потоку и основанием, ориентированным нормально к направлению потока), и непосредственно турбулизатор 2 – генератор вихрей, расположенный вниз по потоку и представляющий трехгранную призму (в поперечном сечении равнобедренный треугольник с вершиной, направленной вниз по потоку, и основанием, ориентированным нормально к направлению потока), разделенные зазором.

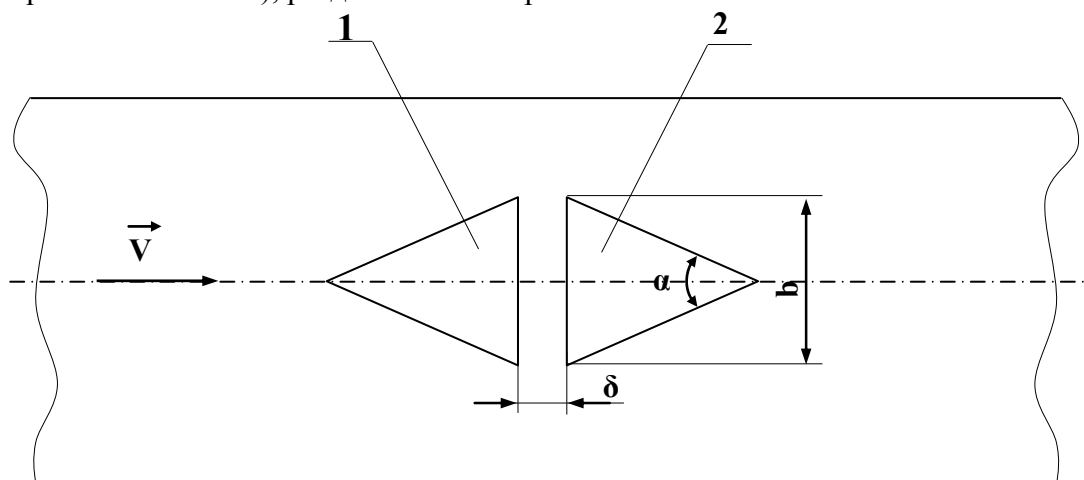


Рис. 1 Схема турбулизатора

Основная задача - определение геометрических параметров турбулизатора – ширины основания b , углов при вершине α и зазора δ , обеспечивающих устойчивое вихреобразование и минимальное гидравлическое сопротивление. Эксперименты подтвердили правильность выбранной схемы. Точка разделения потока жидкости в системе компенсатор – турбулизатор стационарно расположилась в области входной кромки компенсатора, течение до и у компенсатора приобрело стабильный характер - отрыв вихрей от поверхностей турбулизатора перестал сказываться на течении в канале перед турбулизатором. Процесс замещения жидкости, уносимой при отрыве вихря от поверхности турбулизатора, - отбор жидкости из безотрывной области осуществляется через зазор между компенсатором и турбулизатором. На рис.2 представлены два фрагмента из съемки процесса вихреобразования на стенде визуализации, в зазор между компенсатором гидравлического сопротивления и турбулизатором впрыскивается краситель(чернила), отчетливо наблюдается формирования вихря и замещение жидкости в нем жидкостью из зазора. Отрыв вихрей приводит к колебательному характеру движения жидкости в зазоре. При согласовании колебательных процессов вихреобразования у турбулизатора и в зазоре реализуется устойчивая генерация в широком диапазоне изменения расходов, практически не зависящем от ширины (миделя) турбулизатора. В условиях стенда был достигнут динамический диапазон более 200:1. Технические решения, заложенные в конструкцию турбулизатора, защищены патентом.

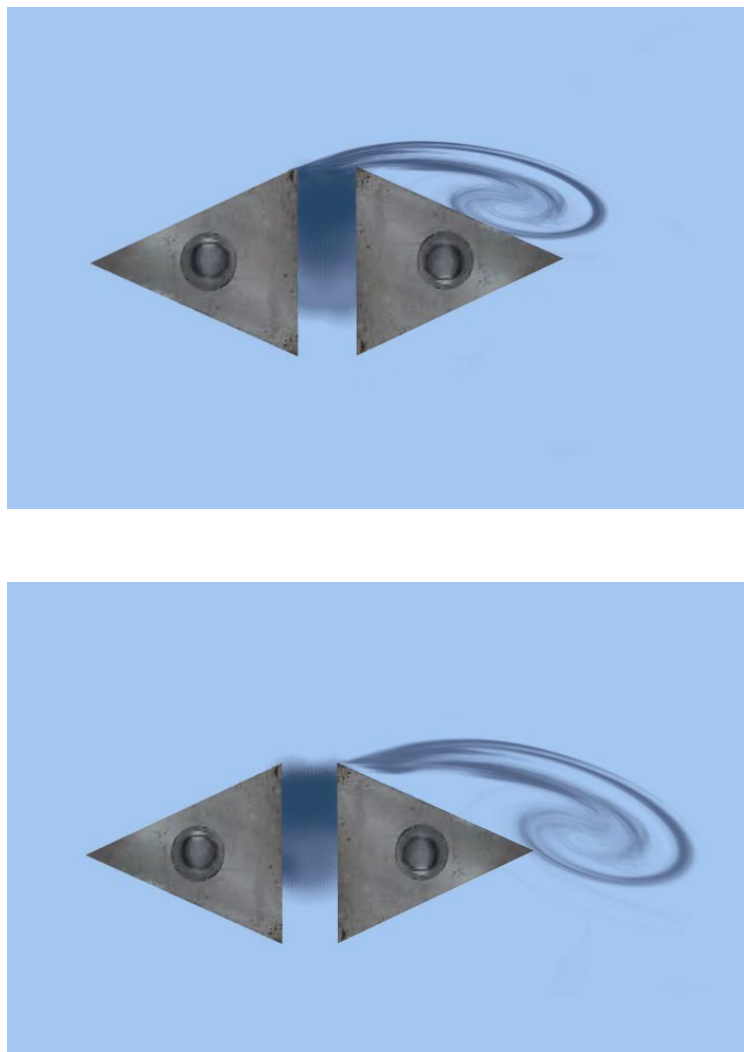


Рис. 2 Фрагменты процесса вихреобразования

Обработка конструкции осуществляется на модели преобразователя для Ду 40мм. В результате определены оптимальные параметры турбулизатора: ширина основания турбулизатора, зазор турбулизатора и углы при вершинах компенсатора и турбулизатора. При этом обозначен динамический диапазон 100:1, полученный за счет уменьшения, относительно реализованных в ВЭПС – Т(И), минимального и увеличения максимального расходов, гидравлическое сопротивление уменьшено более чем в три раза, как за счет компенсатора, так и за счет уменьшения ширины турбулизатора.

Результаты, полученные при обработке модели преобразователя Ду 40 мм (гарантированный динамический диапазон 100:1 и гидравлическое сопротивление при номинальном расходе менее 0.01 МПа), положены в основу разработки преобразователей типа ВПС всего ряда типоразмеров диаметров условного прохода от 20 до 200 мм. Частичная унификация узлов электронного блока и других элементов преобразователя в ряде случаев привела к отказу от простого моделирования преобразователя Ду 40 мм. Геометрические параметры компенсатора для всех преобразователей смоделированы из экспериментального, а турбулизатор имеет углы при вершине от 38 до 90 градусов. Формула для зазора между компенсатором и турбулизатором при любых углах в турбулизаторе, полученная решением уравнений неразрывности и количества движения для отрывной зоны и зазора в турбулизаторе и проверенная экспериментально, имеет вид

$$\delta = \frac{Sh \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot b_0}{\pi}\right)^2 \cdot \pi \cdot d_0}{2.08}$$

где:

δ – зазор в турбулизаторе;

b_0 – ширина(мидель) турбулизатора b , отнесенная к внутреннему диаметру канала d_0 ;

Sh – число Струхала;

$$Sh = \frac{f \cdot b}{C_0}$$

f – частота вихреобразования;

C_0 – осредненная скорость в канале преобразователя.

Расширение динамического диапазона преобразователя приводит к заметному увеличению степени нелинейности в нижней половине его характеристики [1], сравнительные данные преобразователей, полученные при температуре воды 20-30 °С представлены на рис.3. Преобразователи градуируются и поверяются на проливных установках, как правило, при температурах $20 \pm 10^\circ\text{C}$. В реальных условиях они работают при температурах от $+1^\circ\text{C}$ до $+150^\circ\text{C}$. Увеличение температуры воды (теплоносителя) приводит к уменьшению кинематической вязкости, соответствующему увеличению числа Рейнольдса (Re) и уменьшению, в нижней половине характеристики преобразователя, числа Струхала (Sh), т.е. частоты (f), и, следовательно, к уменьшению, относительно реального, измеренного расхода: до 5% при температуре воды $+50^\circ\text{C}$, до 9% при температуре воды $+90^\circ\text{C}$, до 11% при температуре воды 135°C и к увеличению до 3% при температуре воды $+10^\circ\text{C}$. Приведенные результаты получены при испытаниях преобразователей ВПС для Ду 40 мм. При уменьшении диаметра типоразмера влияние температуры заметно увеличивается и достигает при Ду 20 и 25 мм уровня до 3-4% на каждые 10°C увеличения температуры. В связи с вышеизложенным в преобразователях ВПС вводится температурная коррекция, осуществленная введением поправки на вязкость [1,2], позволившая преобразователям ВПС обеспечить неизменность метрологических характеристик в диапазоне изменения температур от $+1$ до $+150^\circ\text{C}$, что неоднократно подтверждено испытаниями на «холодной» воде на проливных установках ЗАО НПО «Промприбор», Калужского ЦСМ и ОАО «ТЕВИС» г. Тольятти, на холодной и горячей воде (с температурой до $+96^\circ\text{C}$) в ГЦИ СИ НИИ ТЕПЛОПРИБОР [1,2].

Для преобразователей типа ВЭПС – Т(И) с динамическим диапазоном 25:1 это влияние на порядок меньше, но в общем случае степень такого влияния определяется нелинейностью

характеристики конкретного преобразователя и должна определяться испытаниями на горячей воде.

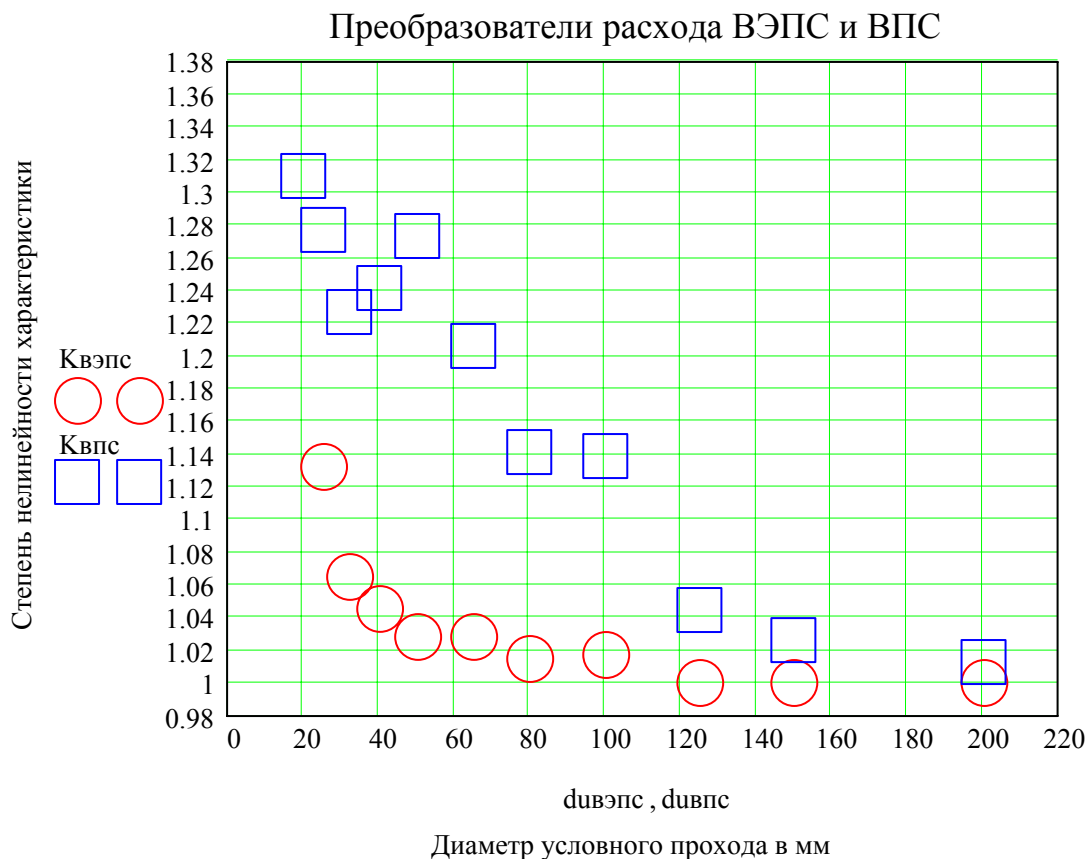


Рис.3 Зависимость степени нелинейности характеристики преобразователей расхода от диаметра условного прохода

Весь ряд типоразмеров диаметров условного прохода от 20 до 200 мм преобразователей ВПС выполнен по одной схеме – измерительный канал круглого сечения с турбулизатором. Предприятием рассматривалась возможность создания, начиная с диаметра условного прохода 80 мм, модульной конструкции преобразователя, выполненного в виде трубы с размещаемым в ней модулем – преобразователем меньшего типоразмера. Схема сулила массу преимуществ: уменьшение гидравлического сопротивления, удешевление конструкции (за счет материалов и сокращения сроков разработки и доводки) и возможность освоения в дальнейшем области больших диаметров. Изготовлены и испытаны образцы Ду 80, 100 и 125 мм. Но первые же испытания выявили существенные недостатки этой конструкции. Разброс результатов измерений составил до 1%, в то время как на предприятии допускаемый уровень не превышает 0.6%, а на практике не превышает 0.4%. Анализ показал, что причина заключается в низкочастотных, с частотой менее 0.1 c^{-1} , колебаниях - перераспределении расхода между основным каналом и каналом модуля. Выявились влияние изменения температуры воды на погрешность преобразователя. Даже в условиях проливной установки при расходе, составлявшем 75% от максимального, увеличение температуры воды на 10°C приводило к изменению погрешности до 1%. Причина обусловлена перераспределением гидравлических сопротивлений каналов основного и модуля при изменении температуры, связанная в основном с разным изменением местных сопротивлений этих каналов. На рис. 4 представлена зависимость относительного расхода через канал модуля модели модульного преобразователя Ду 80 мм, при неизменном расходе суммарном через преобразователь 75 м³/час, от темпера-

туры воды, полученная расчетным путем. Причем этот эффект не зависит от динамического диапазона преобразователя, т.к. имеет место при любом расходе. Для снижения этого эффекта необходимо вводить в основной канал добавочное местное сопротивление. Правильность выбора этого сопротивления обязательно проверять на горячей воде. Приняв во внимание, что потенциально возможные преимущества не состоялись, а еще одна термо- или дополнительная гидравлическая коррекция это еще два **очень серьезных** направления в работе, предприятие отказалось от модульной схемы.

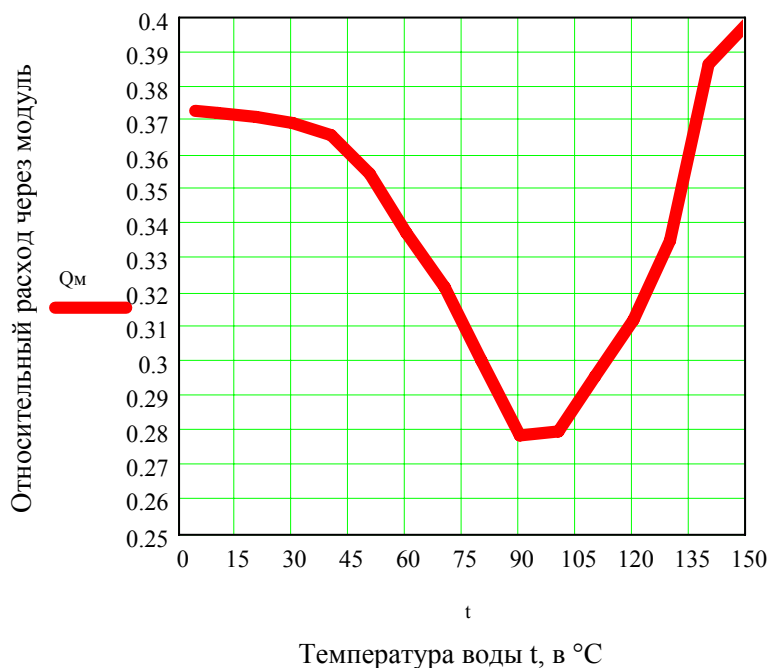


Рис. 4 Влияние температуры воды на относительный расход через модуль (преобразователь Ду 80 мм, модуль Ду 50 мм, расход суммарный через преобразователь 75 м³/час)

В процессе эксплуатации преобразователей на объектах (в частности тепловые сети в Тульской области) проявились случаи отказов в работе, особенно в системах с регулированием расхода теплоносителя в течение суток. Анализ ситуации выявил наличие мощных отложений ферромагнитных включений, «выловленных» дисковым (нижним) магнитом из теплоносителя при уменьшении расхода теплоносителя. С целью устранения возможности появления таких отложений была модернизирована магнитная система. Дисковый магнит заменяется кольцевым и оба – верхний и нижний кольцевые магниты снабжаются цилиндрическими полюсными наконечниками, которые размещаются на торце магнитов соосно их оси и обращены торцами к поверхности измерительного участка преобразователя. Полюсный наконечник представляет собой полый цилиндр, с наружным диаметром и высотой, равными наружному диаметру и толщине соответственно кольцевого магнита. Толщина стенки составляет от 0.005 до 0.2 наружного диаметра кольцевого магнита. На рис. 3 и 4 представлены результаты измерений распределения магнитной индукции вдоль линии пересечения внутренней поверхности трубы преобразователя ВПС Ду 65 мм с плоскостью электрода, нормальной к оси трубы преобразователя для магнитной системы с обычными магнитами (Рис.5) и для магнитной системы с полюсными наконечниками (Рис. 6).

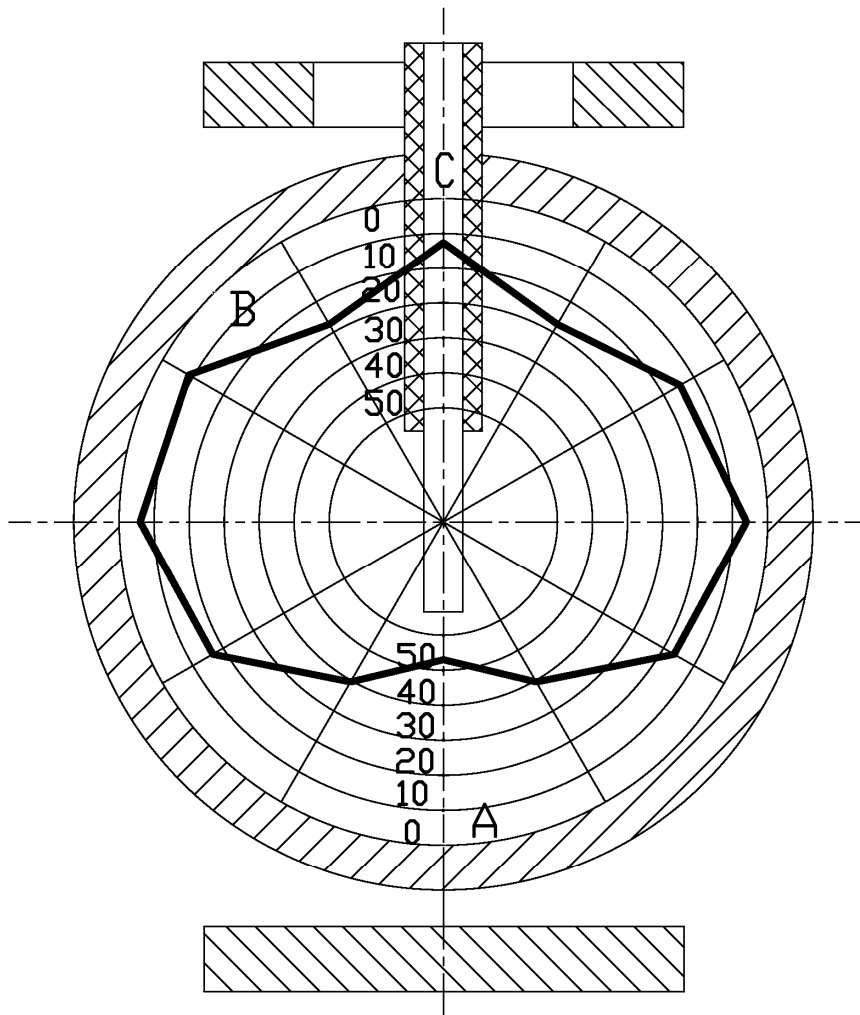


Рис. 5 Распределение магнитного поля в плоскости электрода преобразователя ВПС1 Ду 65 мм, магнитная система с обычными магнитами (индукция магнитного поля в мТл)

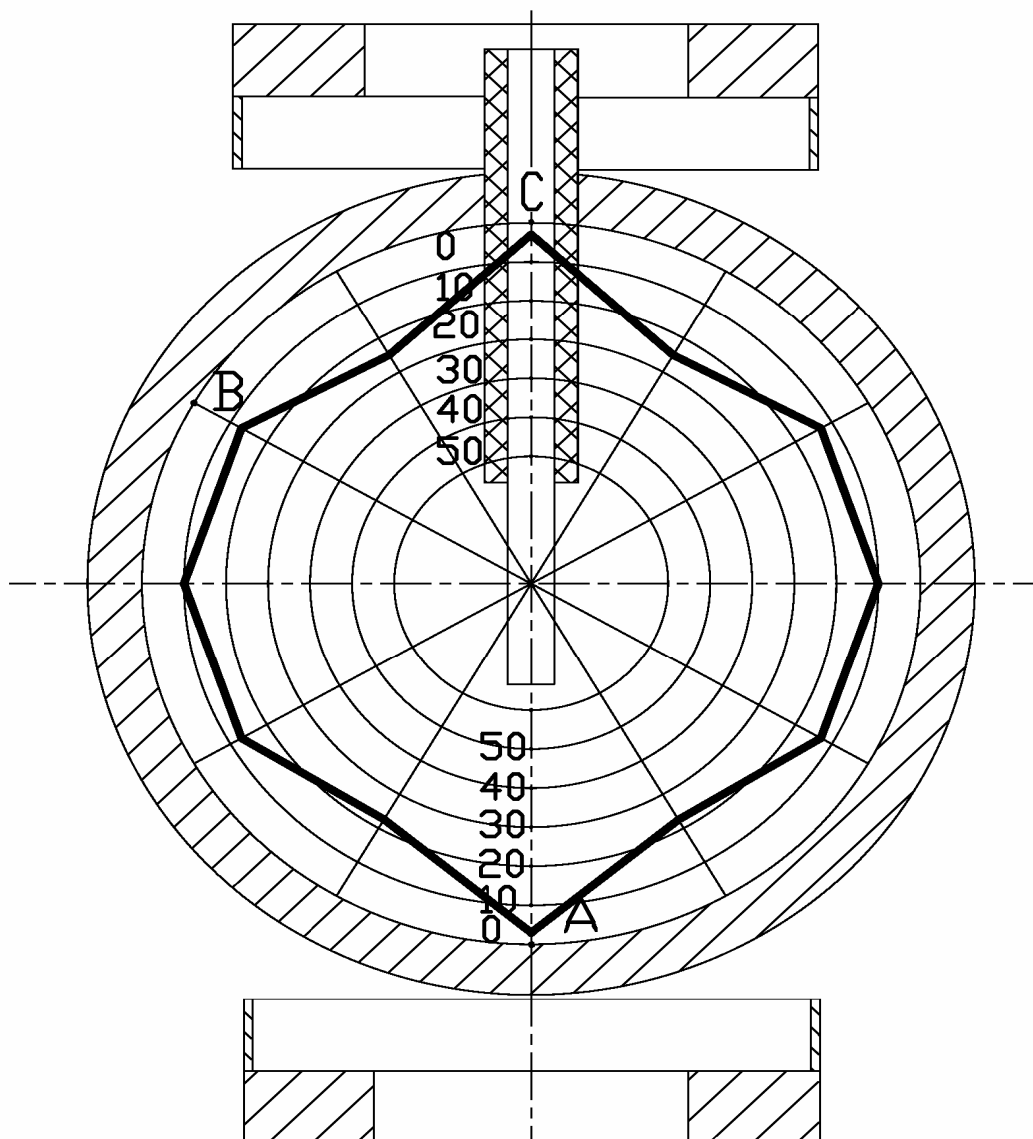


Рис. 6 Распределение магнитного поля в плоскости электрода преобразователя ВПС1 Ду 65 мм, магнитная система с полюсными наконечниками (индукция магнитного поля в мТл)

Магнитная система с полюсными наконечниками обеспечивает распределение магнитного поля на внутренней поверхности трубопровода в области электрода, при котором его максимум локализован на узкой овально - кольцевой площадке, вследствие чего магнитные силы, действующие на ферромагнитные частицы, в отличие от магнитной системы без наконечников, недостаточны для противодействия напору движущейся жидкости. Ферромагнитные частицы не удерживаются на внутренней поверхности трубопровода даже при минимальном расходе, а возможное задержание на некоторое время частиц, в силу удаленности их от электроконтактной части электрода, не может оказать заметного влияния на характер электриче-

ского сигнала. Сила притяжения ферромагнитных частиц по внутренней поверхности трубопровода в области электрода снизилась почти в 10 раз. При этом динамический диапазон и метрологические характеристики преобразователей не изменились.

Технические решения, заложенные в конструкцию магнитной системы, защищены патентом.

В серийное производство запущена новая, базирующаяся на цифровой обработке сигналов, электроника преобразователей расхода ВПС, на порядок увеличившая помехоустойчивость преобразователей к электромагнитным полям промышленной частоты (50 Гц) и блуждающим в трубопроводах переменным токам, частотой 50 Гц. Специальная логическая программа системы автоподстройки частоты позволила в несколько раз увеличить устойчивость работы преобразователей на средах, загрязненных магнитопроводными включениями.

Следует отметить, что при разработке преобразователей Ду 20 мм предприятие столкнулось с проблемой достаточно высокой их себестоимости изделия. Поэтому было принято решение корпус измерительного канала преобразователя отливать из конструкционных термопластов типа Фортрон. Выбран Фортрон марки I 140L4, обладающий следующими свойствами:

- высокая механическая прочность;
- возможность продолжительной эксплуатации при температурах до + 240°C, допускает кратковременное воздействие температуры до + 270°C;
- очень хорошая химическая и окислительная стойкость;
- очень низкое водопоглощение;
- низкая ползучесть даже при повышенных температурах.

Указанные свойства материала получили экспериментальное подтверждение при многочасовых испытаниях преобразователя на горячеводном стенде ЗАО ИВК «Саяны» в г. Малоярославце при температурах воды (+ 110) - (+150)°С и более. Преобразователь расхода отработал в штатном режиме, сохранив функциональные и метрологические свойства. Преобразователь присутствует на рынке с начала 2009 года и до настоящего времени предприятие не имеет информации об отказах, обусловленных применением Фотрона для изготовления корпуса измерительного канала. Предприятием запущен в серийное производство преобразователь ВПС Ду 25 мм с корпусом, также отлитым из Фортрона.

В настоящее время ЗАО НПО «Промприбор» производит преобразователи вихревого типа ВПС в двух модификациях:

ВПС1 с динамическим диапазоном 100:1

ВПС2 с динамическим диапазоном 50:1

И в заключение следует обратить внимание на преимущества, присущие только вихревым преобразователям:

- определенность в работе – либо работают, либо нет;
- стабильность метрологических характеристик во времени;
- автономное питание, т.е. возможна установка вдали от источников электроэнергии (и в сырых или полузатопленных подвалах).

Увеличенное по сравнению с полнопроходными гидравлическое сопротивление вихревых преобразователей в условиях эксплуатации, как указывалось ранее, является величиной одного порядка с погрешностью измерения давления в измеряемом канале, и не должно являться ни энергетическим, ни экономическим критериями при выборе типа преобразователя.

Выбирать потребителю, исходя из конкретных условий на объекте и характеристик измеряемой среды.

На текущий момент в эксплуатации находятся более 30 000 преобразователей расхода ВПС, относительное количество отказов не превышает 0.05 %.

Литература:

1. А.С. Анчишкин, А.Л. Горохов, В.А. Магала, А.Л. Манин. Опыт ЗАО НПО «Промпри-

бор» по созданию преобразователей расхода для работы в широком диапазоне изменения температур измеряемой среды. Коммерческий учет энергоносителей.»Материалы 19-й Международной научно-практической конференции. 20-22 апреля 2004 Санкт-Петербург, 2004.

2. 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 3го 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.
3. Магала В.А., Манин А.Л. О «российском выборе» типа преобразователя. «Коммерческий учет энергоносителей» Материалы 26й международной научно-практической конференции 20-22 ноября 2007 года. Санкт Петербург 2007 г.
4. Магала В.А., Манин А.Л. О небалансе расходов в закрытых системах теплоснабжения. Материалы 26й международной научно-практической конференции 20-22 ноября 2007 года. Санкт Петербург 2007 г.
5. П.П. Кремлевский «Расходомеры и счетчики количества вещества» Справочник. Книга вторая. Политехника Санкт-Петербург 2004.
6. И.Е. Идельчик «Справочник по гидравлическим сопротивлениям» Издание второе, переработанное и дополненное. Москва «Машиностроение», 1975.

Авторы:

Магала Владимир Александрович, заместитель директора ЗАО НПО «Промприбор»,
к.т.н.
т/ф (4842) 550-258, 556- 583

Манин Андрей Львович, генеральный директор ЗАО НПО «Промприбор».
т/ф (4842) 550-248, 550-438

ЗАО НПО «Промприбор»
248016, г. Калуга, ул. Складская, 4