

УДК 621.317:697.034

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ НА ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ПОЛЕ СКОРОСТИ ЖИДКОСТИ В ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ РАСХОДОМЕРА И ПОГРЕШНОСТЬ ЕГО ПОКАЗАНИЙ**

*А.И. Новиков, В.Г. Зезин, О.Н. Шабанов*

Приведены результаты экспериментальных исследований на гидравлическом поверочном стенде показаний электромагнитного расходомера в зависимости от конструктивного оформления трубопровода перед расходомером, а также компьютерного 3D моделирования с использованием программного комплекса ANSYS CFX. Показано, что пренебрежение требованиями нормативной документации по выполнению прямолинейных участков трубопровода перед расходомером заданной длины может явиться причиной появления очень большой систематической положительной погрешности при измерении расхода воды в системе отопления и горячего водоснабжения.

Ключевые слова: коммерческий учет теплоносителя, электромагнитный расходомер, погрешность измерения расхода, 3D моделирование, экспериментальные исследования.

### **Введение**

Одной из важных задач, решаемых в настоящее время в сфере ЖКХ, является организация коммерческого учета тепловой энергии и горячей воды у конечных потребителей, для чего вводы их систем теплоснабжения оснащаются соответствующими приборами учета. Одним из приборов учета является расходомер.

Существующие расходомеры и счетчики количества можно условно разбить на следующие группы:

- приборы, основанные на гидродинамических принципах – переменного перепада давления, переменного уровня, обтекания, вихревые, парциальные;
- приборы с непрерывно движущимся телом – тахометрические, силовые, с автоколеблющимся телом;
- приборы, основанные на различных физических явлениях – тепловые, электромагнитные, акустические, оптические, ядерно-магнитного резонанса, ионизационные;
- приборы, основанные на особых методах – метод меток, корреляционные, концентрационные.

Из приборов третьей группы наибольшее распространение получили электромагнитные расходомеры (ЭМР).

### **Физические принципы работы ЭМР и требования по стабилизации потока**

В основе работы электромагнитных расходомеров лежит взаимодействие движущейся электропроводной жидкости с магнитным полем [1]. Наибольшее распространение получили расходомеры, у которых измеряется ЭДС, индуцируемая в жидкости, пересекающей магнитное поле. Для регистрации ЭДС используется участок трубопровода из немагнитного материала, покрытый неэлектропроводной изоляцией, содержащий два электрода, расположенных перпендикулярно, как направлению магнитных силовых линий, так и направлению движения жидкости, помещаемый между полюсами магнита.

Разность потенциалов  $U$  на электродах определяется уравнением

$$U = BDv = \frac{4BQ}{\pi D}, \quad (1)$$

где  $B$  – магнитная индукция,  $D$  – расстояние между электродами, численно равное внутреннему диаметру трубопровода,  $v$  – средняя скорость жидкости,  $Q$  – объемный расход жидкости.

Преобразовав формулу (1), получаем выражение для расхода:

$$Q = \frac{\pi DU}{4B}. \quad (2)$$

Показания электромагнитных расходомеров существенно зависят от симметрии поля скоростей измеряемого потока. При осесимметричном потоке показания расходомера при одном и том же расходе будут одинаковы как при турбулентном, так и при ламинарном течении. Это является большим преимуществом электромагнитных расходомеров по сравнению с другими типами. Однако при нарушении осевой симметрии, вызванной влиянием различных факторов механического характера, появляется влияние деформации поля скоростей на показания расходомеров. Это влияние обусловлено тем, что вклад отдельной частицы жидкости в создание разности потенциалов на электродах тем больше, чем ближе расположена эта точка к тому или другому электроду. Так как эта проблема существует и у расходомеров, работающих на других принципах, то было найдено простое техническое решение, позволившее ликвидировать осесимметричность эпюры скоростей. Проведенные ранее опыты [2–5] показали, что даже при очень сильных возмущениях потока, создаваемых дроссельным клапаном, или перегородкой с отверстием у края, достаточно прямого участка трубы длиной  $L \geq (20 \dots 22)D_y$  для устранения влияния деформации потока на показания расходомера. При меньших возмущениях, вызываемых, например, коленом, достаточно участка трубы длины  $L = (5 \dots 10)D_y$ . Кроме того необходимо учесть, что на деформацию эпюры скоростей оказывают влияние механические возмущения, расположенные не только до

рассматриваемого сечения, но и после него. Поэтому обычно ограничивается длина прямолинейного участка трубопровода и после измерительного прибора.

Производители расходомеров в документации на прибор всегда приводят требования на длину прямолинейного участка трубопровода до и после преобразователя расхода. Для некоторых приборов данная информация приведена в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительные данные по длинам прямых труб,  
устанавливаемых перед расходомерами

Наименование расходомера	Месторасположение информации	Длина прямолинейного участка трубы	
		до ЭМР	после ЭМР
ВЗЛЕТ ЭР	B41.30-0.00 ИМ	$3D_v$	$(2-3)D_v$
КАРАТ-550	<a href="http://тм-про.рф">http://тм-про.рф</a>	$(5-10)D_v$	$2D_v$
ПРЭМ	<a href="http://тм-про.рф">http://тм-про.рф</a>	$(5-10)D_v$	$2D_v$
ВСТ, ВСТН	<a href="http://тм-про.рф">http://тм-про.рф</a>	$5D_v$	$1D_v$
ЭМИС-МАГ 270	<a href="http://www.emis-kip.ru/prod/em270">www.emis-kip.ru/prod/em270</a>	$5D_v$	$3D_v$
Proline Promag	<a href="http://www.endress.nt-rt.ru">www.endress.nt-rt.ru</a>	$5D_v$	$2D_v$

Однако указанные требования не всегда выполняются, в связи с чем могут возникать противоречия между показаниями общедомовых приборов учета и суммарными показаниями индивидуальных потребителей [6].

### Теоретические исследования влияния местных сопротивлений на поле скоростей в трубопроводе

Для определения изменения профиля скорости и распределения средней скорости в потоке за возмущающими элементами и, соответственно, правильного выбора места размещения расходомера были проведены численные расчеты течения воды в трубе с использованием программного продукта ANSYS CFX.

При составлении 3-D модели течения жидкости в канале на стенках домена задавались граничные условия входа с заданной скоростью воды, а также граничное условие выхода с избыточным давлением 0 Па. На остальных границах доменов были заданы граничные условия типа «стенка» с абсолютной шероховатостью 0,05 мм, что соответствует среднему значению шероховатости используемых в технике стальных труб. Расчет проводился в стационарном режиме до достижения средней невязки по контрольным объемам порядка  $10^{-4}$ . Во всех расчетных случаях была использована  $k - \epsilon$  модель турбулентности.

Были рассмотрены следующие расчетные случаи:

1. Рассмотрено течение воды постоянной температуры через трубу диаметром условного прохода 80 мм, общей длиной 1 м с размещенной на расстоянии 100 мм от входа шайбой с произвольно расположенными в ней отверстиями. Расчеты проведены при двух значениях скорости на входе 0,5 м/с и 2 м/с. Результаты расчетов в виде распределения поля скоростей в нескольких сечениях трубы и вдоль по потоку приведены на рис. 1.

2. Рассмотрено течение воды со скоростью 2 м/с через трубу диаметром условного прохода 80 мм, общей длиной 1 м с размещенным на расстоянии 100 мм от входа стержнем круглого сечения диаметром 10 мм, имитирующим чувствительный элемент термометра сопротивления, а также с поворотом потока под прямым углом с последующим обтеканием стержня. Результаты расчетов в виде распределения поля скоростей в нескольких сечениях трубы и вдоль по потоку приведены на рис. 2.

3. Рассмотрено обтекание водой с начальной скоростью 0,335 м/с (соответствующей расходу 4 м<sup>3</sup>/час) препятствия в виде дискового затвора. Результаты расчетов распределения поля скоростей в нескольких сечениях трубы и вдоль по потоку приведены на рис. 3 и 4.

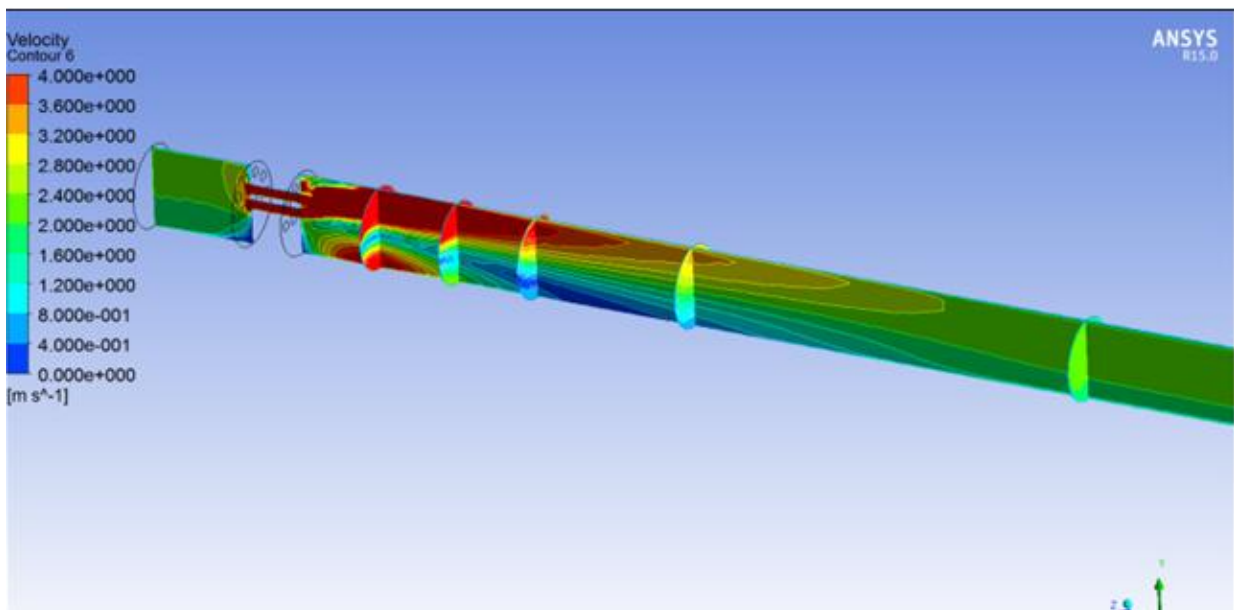


Рис. 1. Поле скоростей в трубе после прохождения потоком произвольного препятствия в виде шайбы с произвольно расположенными отверстиями различного диаметра

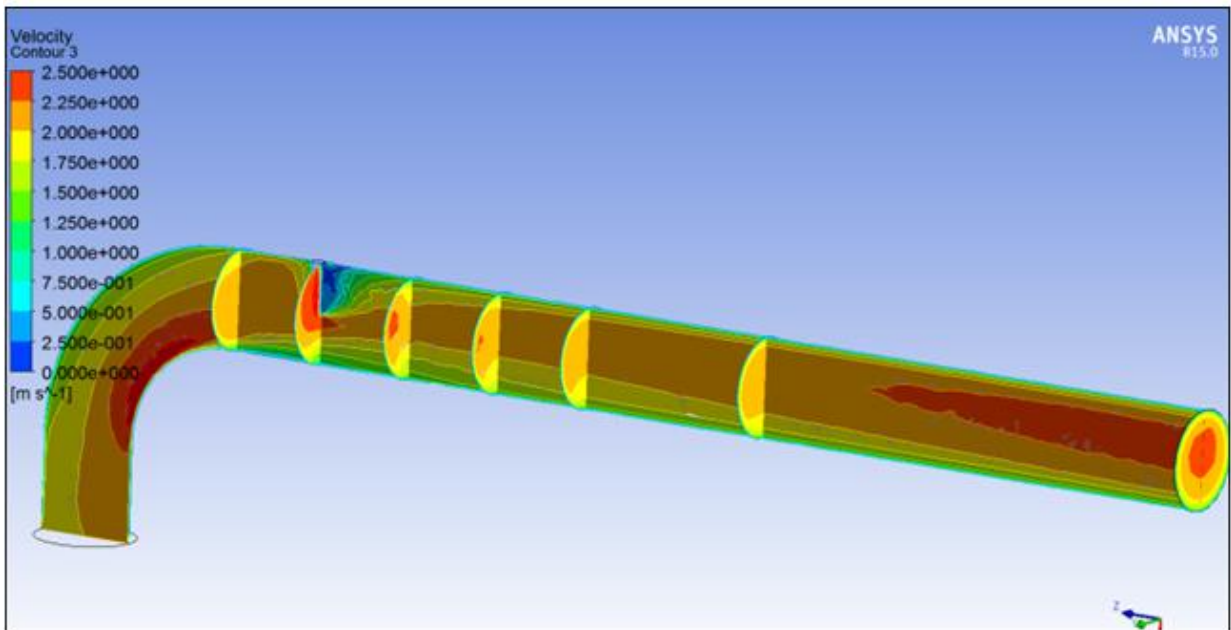


Рис. 2. Поле скоростей в трубе после поворота и обтекания стержня

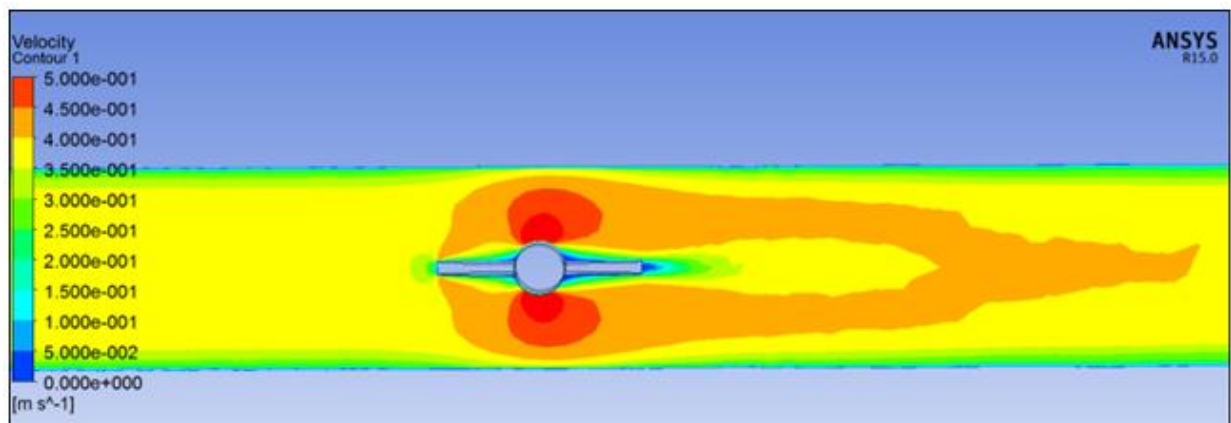


Рис. 3. Поле скоростей в трубе при прохождении потоком полностью открытого дискового затвора

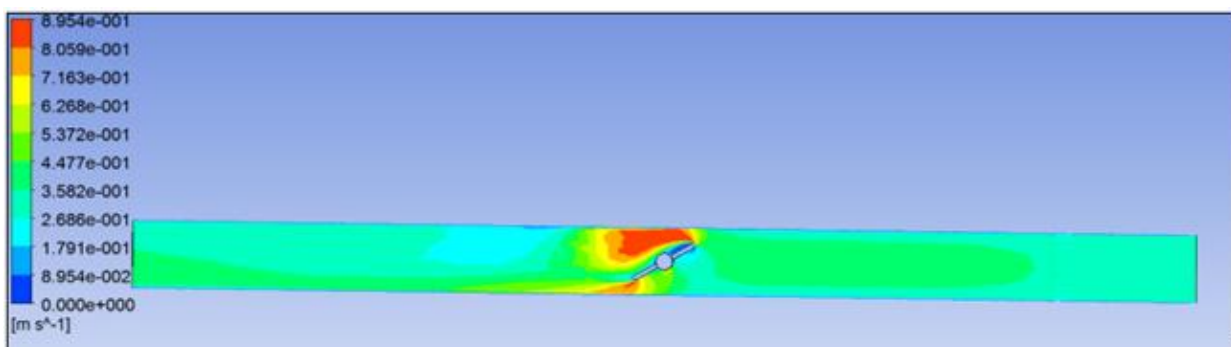


Рис.4. Поле скоростей в трубе при прохождении потоком частично прикрытого дискового затвора

Анализ рассмотренных случаев показывает, что имеет место существенное нарушение равномерности эпюры скоростей на расстоянии вплоть до  $5D_y$ , что подтверждает необходимость соблюдения требования по выравниванию профиля скорости перед расходомером.

Расчеты показали, что, например, для расчетного случая 1 средняя скорость потока на расстояниях от  $1D_y$  до  $3D_y$  отличается от средней скорости до препятствия. Данные этих расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Изменение средней по сечению трубы скорости потока  
в зависимости от расстояния от возмущающего препятствия

Расстояние от устройства возмущения по потоку	Средняя по сечению скорость, м/с	
	$v_{вх} = 0,5$ м/с	$v_{вх} = 2$ м/с
$1D_y$	1,018	4,168
$2D_y$	0,728	2,855
$3D_y$	0,550	2,143
$5D_y$	0,498	1,994
$10D_y$	0,499	1,995

Как следует из данных табл. 2 наблюдается увеличение средней скорости потока на расстоянии до  $4D_y$  от возмущающего препятствия. При размещении расходомера на расстояниях  $(2...3)D_y$  в соответствии с формулой (2) расходомер может показывать завышенный от 45 до 10 % расход жидкости.

### Экспериментальные исследования влияния возмущения потока на показания расходомера

Для определения влияния возмущения потока на показания расходомера и подтверждения теоретических исследований были проведены испытания расходомера на установке расходомерной поверочной УРП-250, свидетельство о поверке № 15732. Погрешность измерения расхода на установке в условиях проведенных исследований не более  $\pm 0,15$  %. Схема измерительного участка трубопровода на установке УРП-250 приведена на рис. 5:

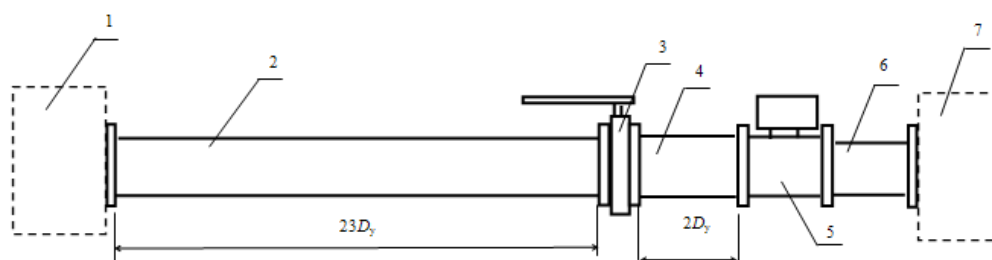


Рис. 5. Схема измерительного участка на установке УРП-250

На рисунке обозначены: 1 – устройство для стабилизации потока воды по давлению и расходу; 2 – труба для стабилизации потока при входе в цилиндрический канал с  $D_y = 65$  мм; 3 – устройство возмущения потока (дисковый затвор); 4 – канал стабилизации потока перед испытуемым прибором ( $D_y = 65$  мм); 5 – испытуемый прибор (расходомер ВЗЛЕТ ЭРСВ-410,  $D_y = 65$  мм); 6 – канал стабилизации потока после прибора; 7 – устройство сброса воды.

Испытания проводились при следующих параметрах потока: расход воды  $4 \text{ м}^3/\text{час}$  ( $66,7 \text{ л/мин}$ ), давление 5 атм. В качестве устройства, создающего возмущение потока, использовался дисковый затвор с  $D_y = 65$  мм. В задачи эксперимента входило сравнение показаний расходомера при невозмущенном и возмущенном потоке жидкости при одних и тех же параметрах движения.

На первом этапе были проведены испытания расходомера в невозмущенном потоке. Процесс измерений проводился в течение 15 мин с периодическим снятием показаний (не менее 10), при этом осредненное значение составило  $66,9 \text{ л/мин}$  ( $4,014 \text{ м}^3/\text{час}$ ). На втором этапе испытания проводились с установленным на расстоянии  $2D_y$  перед испытуемым прибором дисковым затвором, согласно рис. 5. Конструктивно затвор представляет собой корпус с проходным каналом  $D_y = 65$  мм с поворотным диском, укрепленным на сквозной оси диаметром  $15...16$  мм. Испытания проводились при двух положениях затвора – полностью открытом и закрытом на  $30^\circ$ . Измерения проводились аналогично первому этапу, при этом осредненные значения показаний расходомера составили:  $75,5 \text{ л/мин}$  ( $4,53 \text{ м}^3/\text{час}$ ) и  $86,55 \text{ л/мин}$  ( $5,19 \text{ м}^3/\text{час}$ ) соответственно, что превышает показания прибора при невозмущенном потоке соответственно на  $12,9 \%$  и  $29,4 \%$ .

Таким образом, эксперименты показали, что несоблюдение требований по длине прямолинейного участка трубопровода перед расходомером может привести к очень большой положительной систематической погрешности измерения расхода.

### **Выводы**

1. Показания электромагнитных расходомеров, также как и расходомеров, основанных на других физических принципах, существенно зависят от симметрии поля скоростей измеряемого потока.

2. Для стабилизации потока перед расходомером рекомендуется установка прямолинейной трубы длиной от 5 до 10 условных диаметров. Большинство производителей расходомеров, выполняя эту рекомендацию, в документации на приборы указывают соответствующую длину прямолинейного участка трубы.

3. Несоблюдение указанных требований может приводить к значительной положительной систематической погрешности измерения расхода жидкости, несмотря даже на высокую точность самого прибора.

4. Проведенные теоретические исследования с использованием 3-D моделирования показали, что механическое возмущение потока различными теплотехническими элементами, существенно нарушает симметрию поля скоростей на достаточно большом расстоянии от источника возмущения, при этом увеличение средней скорости потока в отдельных случаях может достигать несколько десятков процентов.

5. Экспериментально доказано, что установка перед расходомером полностью открытого поворотного клапана на расстоянии  $2D_y$  вызывает появление систематической положительной погрешности измерения расхода до +13 % (в зависимости от числа Рейнольдса на входе в расходомер). Аналогичную погрешность может вызвать установка на расстоянии  $(2...3)D_y$  перед расходомером грязевика, фильтра.

#### Библиографический список

1. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества: Справочник / П.П. Кремлевский. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 701 с.

2. Гаммерман, М.Я. Электромагнитные расходомеры, показания которых не зависят от эпюры скоростей / М.Я. Гаммерман, В.И. Межбурд, И.Г. Фикс // Приборы и системы управления. – 1972. – № 9. – С. 42–49.

3. Гордеев, В.Д. Влияние местного возмущения потока на показания электромагнитных расходомеров / В.Д. Гордеев, Ю.С. Лепанов // Измерительная техника. – 1972. – № 12. – С. 45–46.

4. Вельт, И.Д. Электромагнитное измерение скорости и расхода больших водных потоков / И.Д. Вельт, И.Н. Гудкова. – М.: ЦНИИТЭИприборостроения, 1985. – 43 с.

5. Флетчер, К. Вычислительные методы в динамике жидкостей: в 2 т. Т. 1 / К. Флетчер; пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 504 с.

6. Разработка правил построения схем измерительных систем в узлах коммерческого учета применительно к системам тепловодоснабжения / Отчет о НИР по договору №10/14 от 5.10.2014. – филиал ЮУрГУ в г. Миассе. – 2014. – 173 с.

[К содержанию](#)