

**Н.И.Ватин, А.Г.Куркин**

## **Учет влияния отложений на стенке трубы на показания традиционного ультразвукового расходомера**

Современные требования, предъявляемые к учету водопотребления, включают в себя не только измерение объема воды, поставляемой из водопроводной системы, но и учет количества воды, забираемой непосредственно из рек и водоемов на нужды потребителя, а также учет количества стоков. Для решения указанных задач применяются расходомеры и счетчики, устойчивые к воздействию твердых и абразивных частиц, загрязнений, отложений на внутренней поверхности измерительного участка и т.п. Прежде всего, это – средства измерения, использующие ультразвук для измерения расхода.

Одним из основных источников погрешности для большинства ультразвуковых методов является изменение профиля скоростей потока в зависимости от состояния стенок трубопровода и, в том числе, от наличия отложения на внутренней поверхности трубопровода, сужающего его сечение. Если изменение профиля скоростей потока вследствие изменения температуры, давления воды может вносить погрешность до единиц процентов, то влияние отложений может вызывать завышение показаний на десятки процентов.

Уменьшение дополнительной погрешности, источником которой являются отложения, затруднено вследствие отсутствия информации о реальном состоянии поверхности. На сегодняшний день отсутствуют общедоступные средства диагностики, которые позволили бы надежно оценить состояние внутренней поверхности трубопровода без его вскрытия. Чтобы рассчитать поправку на влияние отложений, необходимо измерить не только толщину стенки трубопровода (с этой задачей успешно справляются ультразвуковые толщиномеры), но и толщину отложений. Их толщина может достигать десятков миллиметров в зависимости от химического и физического состава воды и условий эксплуатации трубопровода.

Получим оценку влияния отложений при развитом турбулентном течении в трубе на показания расходомеров, применяющих ультразвук, и покажем, что для разных методов это влияние различно.

### **1. Влияние отложений на показания традиционного ультразвукового расходомера**

Ультразвуковой преобразователь расхода измеряет разность времени  $\Delta t$  прохождения ультразвука в прямом и в противоположном направлении по лучу, пересекающему поток под углом  $\alpha$  (рис. 1).

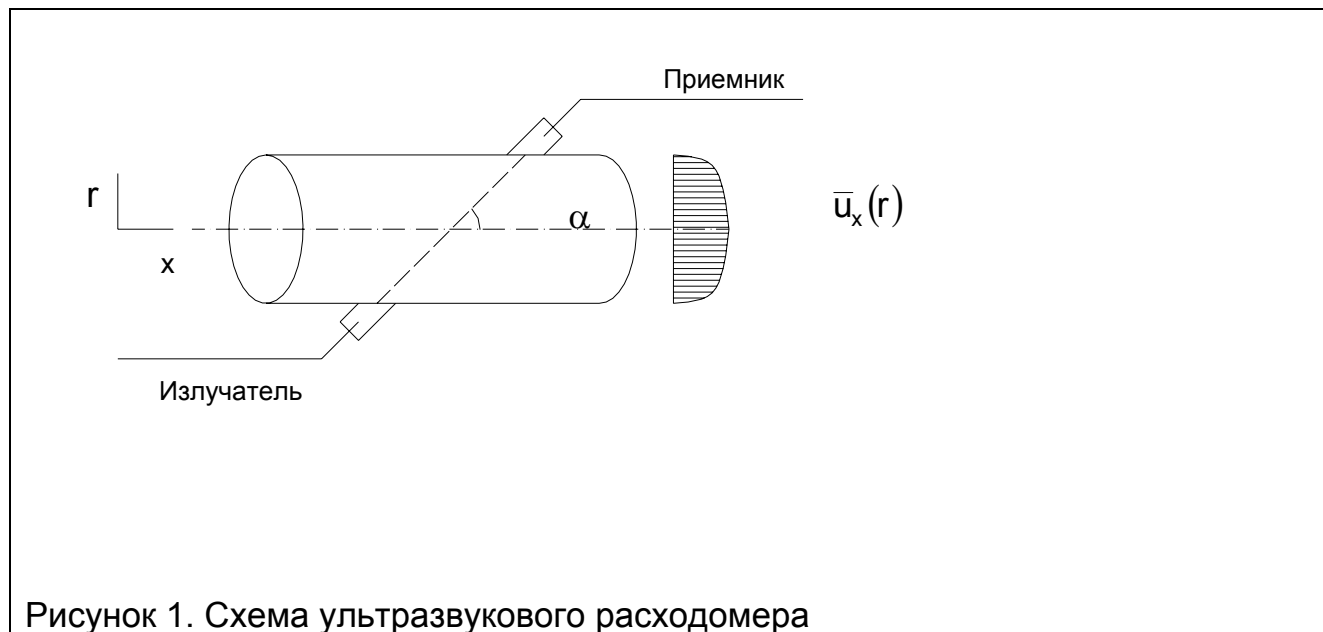


Рисунок 1. Схема ультразвукового расходомера

Осредненное (для устранения влияния турбулентных пульсаций) значение этой величины затем пересчитывается в значение расхода:  $Q \sim \Delta t$ .

При прохождении малого отрезка пути луча длиной  $dL$  (в обе стороны) временная задержка составит

$$\Delta t = \frac{2 dL}{V_{\text{звука}}^2} \frac{\bar{u}_x \cos \alpha}{1 - \left( \frac{\bar{u}_x \cos \alpha}{V_{\text{звука}}} \right)^2} \approx \frac{2 dL \bar{u}_x \cos \alpha}{V_{\text{звука}}^2},$$

где  $\alpha$  - угол между направлением луча и осью трубопровода,

$\bar{u}_x$  - осредненная составляющая продольной компоненты актуальной скорости,

$V_{\text{звука}}$  - скорость ультразвука в измеряемой жидкости.

Подставив значение  $dL = dr / \sin \alpha$ , имеем выражение

$$\Delta t = \frac{2 \operatorname{ctg} \alpha \bar{u}_x(r) dr}{V_{\text{звука}}^2}.$$

Суммарная разность хода луча  $d\tau$  составит

$$\Delta t = \frac{2 \operatorname{ctg} \alpha}{V_{\text{звука}}^2} \int_{-d/2}^{d/2} \bar{u}_x(r) dr.$$

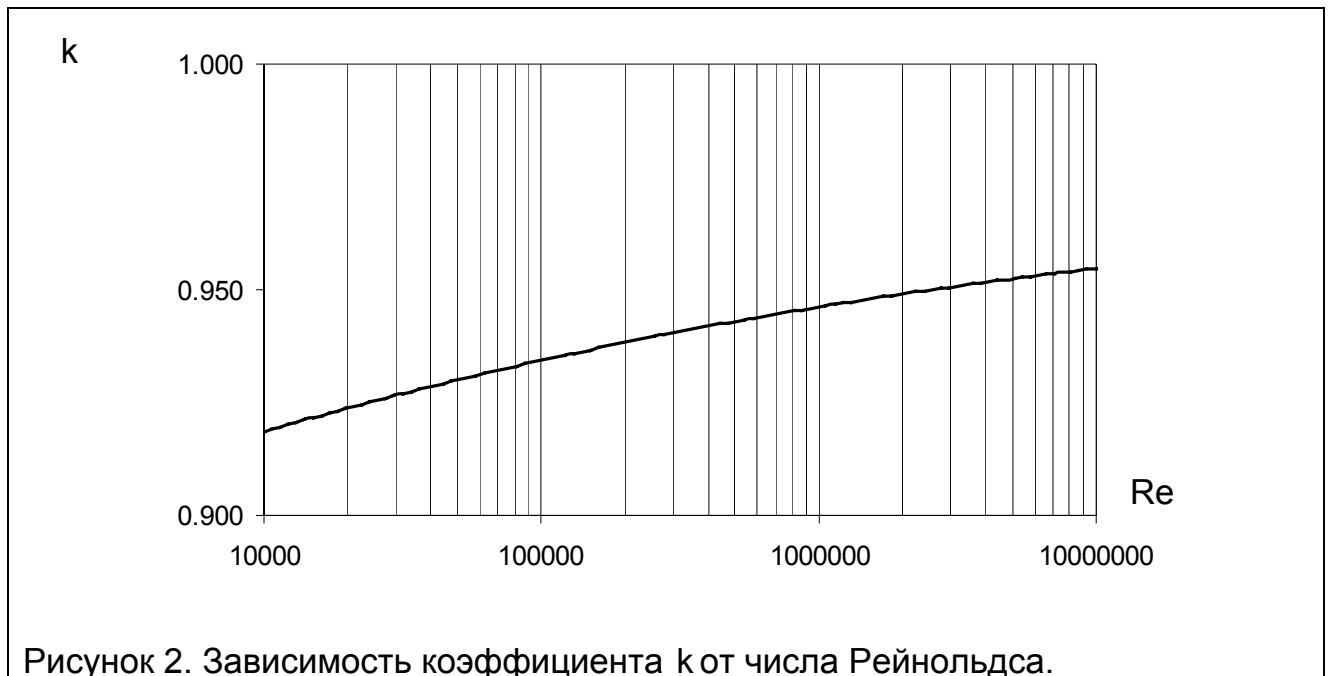
Вспомним, что среденерасходная скорость  $\bar{U}_0$  есть результат осреднения актуальной скорости жидкости  $\bar{u}_x(r)$  по площади поперечного сечения трубы:

$$\bar{U}_0 = \frac{Q}{S} = \frac{8}{d^2} \int_0^{d/2} r \bar{u}_x(r) dr.$$

Введем среднюю по диаметру скорость жидкости:

$$\bar{U}_d = \frac{1}{d} \int_{-d/2}^{d/2} \bar{u}_x(r) dr.$$

Очевидно, что отношение  $k = \bar{U}_0 / \bar{U}_d$  есть функция числа Рейнольдса  $Re = \bar{U}_0 d / \nu$ . Используя известные данные о профилях скорости легко убедиться, что коэффициент  $k(Re)$  с ростом числа Рейнольдса стремится к единице (рис. 2).



Выразим суммарную разность хода луча через среднерасходную скорость:

$$\Delta t = \frac{2 \operatorname{ctg} \alpha d}{V_{\text{звука}}^2} \frac{\bar{U}_0}{k}.$$

Сравним при одинаковом расходе  $Q$  показания расходомера в трубопроводе внутренним диаметром  $d$  без отложений и в трубопроводе, у которого на внутренней поверхности имеются равномерно распределенные отложения толщиной  $\Delta d$ . Среднерасходная скорость в трубе с отложениями будет выше:  $\bar{U}_{0, \text{отлож}} = Q / S_{\text{отлож}} = \bar{U}_0 S / S_{\text{отлож}}$ . Здесь  $S, S_{\text{отлож}}$  - площади поперечного сечения трубы.

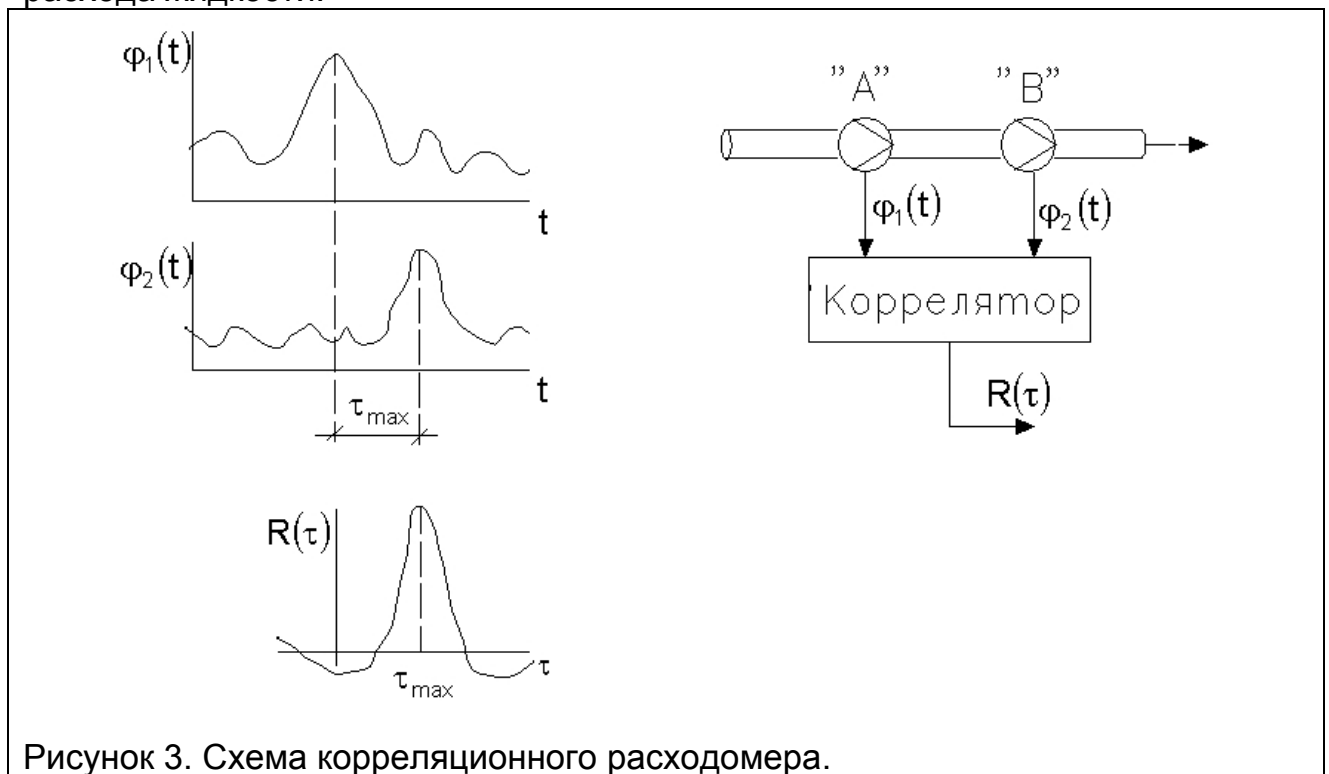
При малой толщине отложений изменение числа Рейнольдса можно считать несущественным. Тогда величина завышения показаний измерительного прибора составит:

$$\frac{\Delta t}{\Delta t_{\text{отлож}}} = \frac{d}{(d - 2\Delta d)} \frac{S_{\text{отлож}}}{S} = \frac{d - 2\Delta d}{d}.$$

## 2. Влияние отложений на показание ультразвукового корреляционного расходомера

Методы определения расхода, получившие наименование корреляционных, интенсивно развиваются в последнее время для измерения расхода различных однофазных и многофазных сред. Интерес к этим методам обуславливается, с одной стороны, появлением технических средств, позволяющих измерять статистические характеристики случайных процессов, и, с другой стороны, необходимостью создания устройств измерения расхода, обладающих высокой точностью и стабильностью характеристик [1,2,3].

Корреляционный расходомер является дальнейшим развитием меточного расходомера, принцип действия которого основан на зависимости времени перемещения на заданном участке пути метки, вводимой в поток, от расхода жидкости.



Между корреляционными и меточными расходомерами имеется много общего. В том и другом случае на концах некоторого участка длиной  $L$  устанавливаются преобразователи, служащие для определения времени  $\tau_{\text{max}}$  прохода потоком этого участка. Принцип действия этих расходомеров

заключается в определении скорости потока как отношения длины участка  $L$  ко времени его прохода меткой  $\tau_{\max}$ . Отличие в следующем:

- в корреляционном расходомере, в отличие от меточного, метка не создается искусственно, а носит случайный характер;
- в меточном расходомере преобразователи вырабатывают дискретные сигналы при проходе меткой контрольного участка, а в корреляционном вырабатываются непрерывные сигналы, соответствующие характеру изменения случайных процессов в контролируемых сечениях.

Структурная схема корреляционного расходомера изображена на рис.3.

На трубопроводе в двух сечениях «А» и «В» вдоль по направлению потока установлены два преобразователя расхода. Случайно распределенные физические неоднородности потока жидкости воспринимаются преобразователями и преобразуются в электрические сигналы  $\varphi_1(t)$  и  $\varphi_2(t)$ , поступающие на коррелятор. Расстояние между сечениями составляет обычно от одного до пяти диаметров трубопровода. Вырабатываемые этими преобразователями сигналы носят случайный характер, но, благодаря сравнительно небольшому расстоянию между сечениями «А» и «В», они имеют взаимосвязь. Эта взаимосвязь носит не детерминированный, а случайный характер. Упрощенно можно сказать, что форма сигнала  $\varphi_1(t)$  опережает форму сигнала  $\varphi_2(t)$  на время, необходимое для перемещения частиц потока от сечения «А» до сечения «Б». Мерой линейной статистической взаимосвязи этих сигналов служит взаимная корреляционная функция  $R(\tau)$ , являющаяся математическим ожиданием произведения двух случайных функций  $\varphi_1(t)$  и  $\varphi_2(t)$ . Оценка математического ожидания  $R(\tau) = \overline{\varphi_1(t) \varphi_2(t + \tau)}$  вычисляется в корреляторе в соответствии с алгоритмом

$$R(\tau) \cong \frac{1}{t_{\text{измер}}} \int_0^{t_{\text{измер}}} \varphi_1(t) \varphi_2(t + \tau) dt.$$

При неком значении  $\tau$  взаимная корреляционная функция  $R(\tau)$  достигает максимального значения. Координата максимума по оси временной задержки (обозначаемая далее как  $\tau_{\max}$ ) интерпретируется как время прохождения потоком расстояния  $L$  между датчиками.

Измеряя временную задержку, соответствующую максимуму, можно найти расход как  $Q \cong S \cdot L / \tau_{\max}$ .

В действительности среднее время движения элементарных объемов жидкости от одного преобразователя до другого может отличаться от  $\tau_{\max}$ . Поэтому расход определяют, вводя калибровочный (поправочный) коэффициент  $k$

$$Q = k \frac{S \cdot L}{\tau_{\max}}.$$

В ультразвуковом корреляционном расходомере расход определяется по значению временной задержки  $\tau_{\max}$ , при которой взаимная корреляционная функция  $R(\tau)$  сигналов двух преобразователей достигает максимума, и по расстоянию между двумя измерительными сечениями  $L$ , в которых эти преобразователи установлены (рис. 1.5).

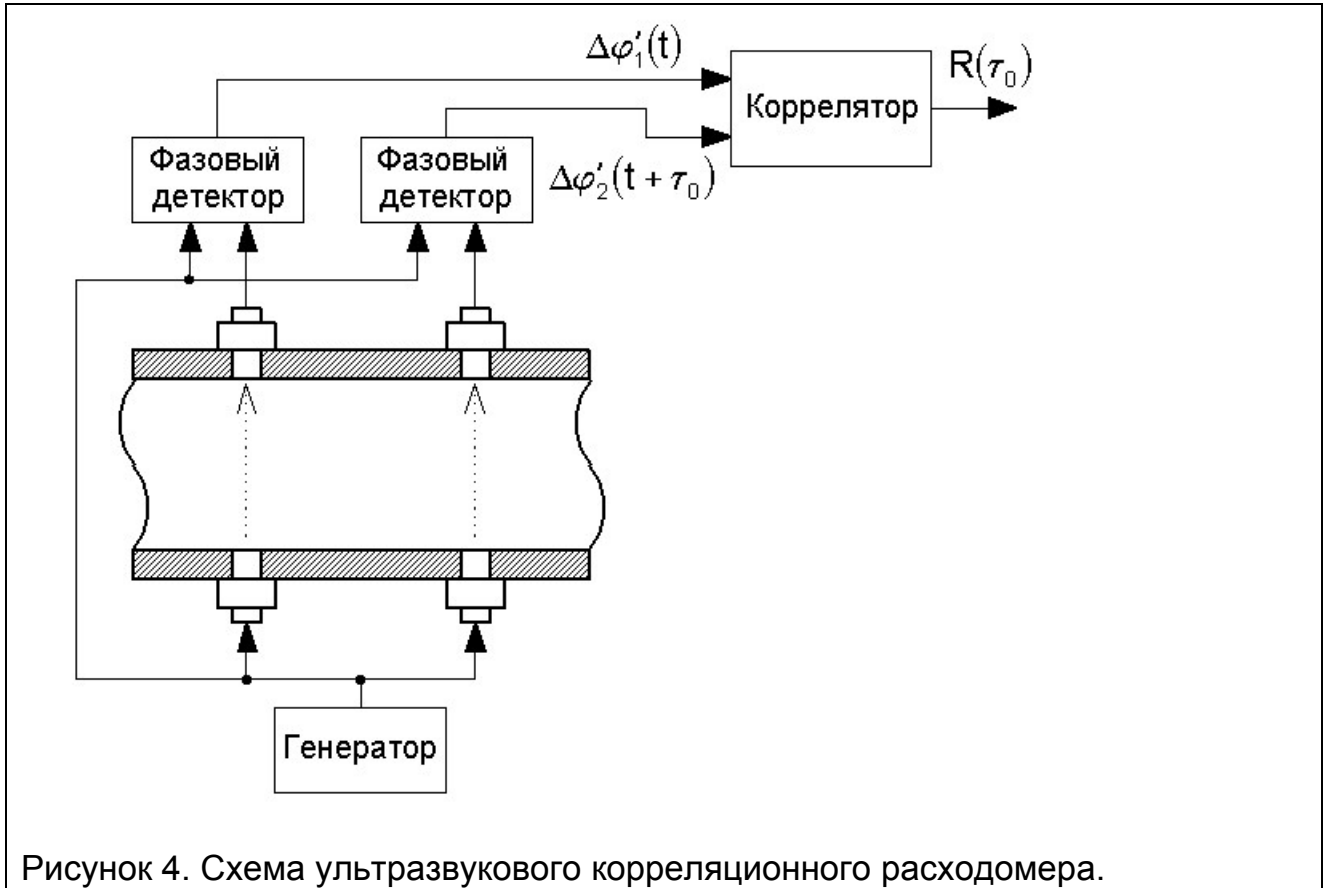


Рисунок 4. Схема ультразвукового корреляционного расходомера.

Расход определяется по формуле  $Q \sim L/\tau_{\max}$ . Взаимная корреляционная функция  $R(\tau)$  равна:

$$R(\tau) = \frac{\Delta\varphi'_1(r_1, t)\Delta\varphi'_1(r_2, t + \tau)}{\Delta\varphi'_1(r_1, t)\Delta\varphi'_1(r_2, t + \tau)} = \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} \int_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} R_{rr}(r_1, r_2, \tau) dr_1 dr_2 .$$

Здесь  $R_{rr}(r_1, r_2, \tau_0)$  пространственно-временная взаимная корреляционная функция радиальных компонент пульсаций скорости жидкости.

Используя модель для пространственно-временных взаимных корреляционных функций, полученную в [4,5], получаем

$$R_{rr}(L, \tau) = R_{rr}\left(0, \tau - L/\bar{U}_0 + L/\bar{u}_x\right),$$

где  $R_{rr}(0, \tau)$  - временная автокорреляционная функция радиальных компонент пульсаций скорости.

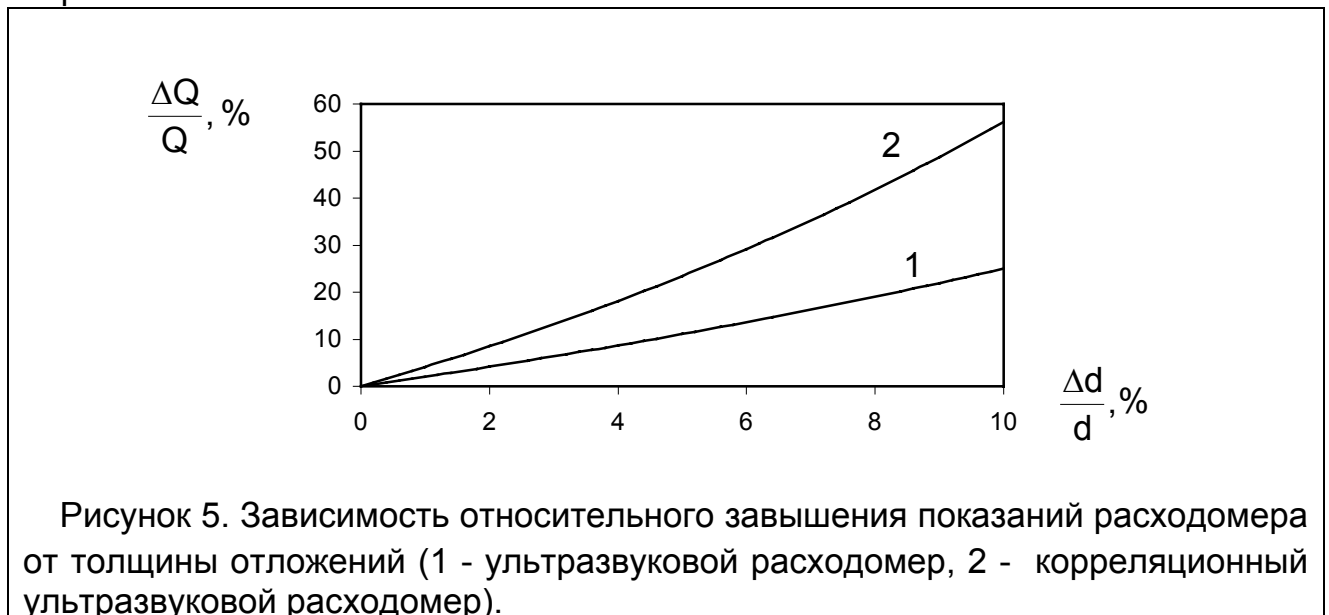
Как и в предыдущем случае сравним при одинаковом расходе  $Q$  показания расходомера в трубопроводе без отложений и в трубопроводе с отложениями в предположении малости изменения числа Рейнольдса. Тогда профили скорости и временные автокорреляционные функции радиальных компонент пульсаций скорости в двух трубопроводах будут подобны. При этом скорости в трубопроводе с отложениями больше, чем в трубопроводе без отложений. Но участвующая в расчете линейная величина  $L$ , в отличие от предыдущего случая, от толщины отложений не зависит.

В трубопроводе без отложений положение максимума  $R(\tau)$  будет примерно равно  $\tau_{\max} = L / \bar{U}_0$ , а при наличии отложений  $\tau_{\max, \text{отлож}} = L / \bar{U}_{0, \text{отлож}} = LS_{\text{отлож}} / \bar{U}_0 S$ . Тогда величина завышения показаний измерительного прибора составит:

$$\frac{L / \tau_{\max}}{L / \tau_{\max, \text{отлож}}} = \left( \frac{d - 2\Delta d}{d} \right)^2,$$

т.е. величина завышения показаний ультразвукового корреляционного расходомеров оказывается больше, чем традиционного ультразвукового.

На рис. 5 приведены зависимости относительного завышения показаний расходомеров от относительной величины отложений для ультразвукового и для ультразвукового корреляционного расходомеров. По горизонтальной оси отложена величина отложения, отнесенная к диаметру трубы в %, по вертикальной – величина завышения показаний также в %.



Если учесть увеличение числа Рейнольдса при сужении потока вследствие отложений, то завышение показаний расходомеров будет несколько меньше. Это объясняется уплощением профиля скорости, что и в ультразвуковом, и в

ультразвуковом корреляционном расходомере приводит к занижению показаний прибора.

### **3. Меры предотвращения влияния отложений на показания расходомера**

Необходимо определить допустимые материалы и покрытия для измерительного участка расходомера. Прежде всего, необходимо ограничить снизу область диаметров применяемых трубопроводов из черной стали. Например, для трубопровода диаметром 50 мм отложения на внутренней стенке толщиной 2 мм вызовут сужение площади сечения на 16%, что приведет к соответствующему увеличению скорости потока при неизменном расходе. Это будет воспринято расходомером как увеличение расхода. Поэтому для малых и средних диаметров (до 200 мм) следует применять измерительные участки из нержавеющей стали или со специальным внутренним покрытием, исключающим появление отложений.

Необходимо предусматривать для измерительных участков малых и средних диаметров возможность контроля состояния, а также чистки внутренней поверхности. Должна быть предусмотрена возможность демонтажа измерительного участка или примыкающей к нему части трубопровода.

### **Литература**

1. Beck M.S. Correlation in instruments: cross correlation flowmeters // J. Phys. E.: Sci. Instrum.- 1981.- Vol. 14, № 1.- P. 7-19.
2. Ватин Н.И., Примин А.И., Седова И.Г. Измерение расхода на основе определения скорости перемещения случайно распределенных неоднородностей потока; Ленингр. политехн. ин-т.- Л.,1984.- 48 с.- Деп. в ВИНТИ 15.06.84, № 3965-84.
3. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количеств. - Л.: Машиностроение, 1989. - 701 с.
4. Ватин Н.И. Пространственно-временная корреляция пульсаций скорости жидкости в развитом турбулентном течении в круглой трубе. – СПб.: Издательство СПбГТУ, 1999. 14 с.
5. Ватин Н.И. Первичные преобразователи корреляционных расходомеров. – СПб.: Издательство СПбГТУ, 1999. – 28 с.