

эффективно и выгодно отличается от существующих дренажных методов измерений пульсации давления. Влияние температуры на датчик рассмотрено в [5]. Изменение относительной емкости и сопротивления датчика в зависимости от времени погружения во влажную среду для различных видов защиты при температуре 20 °С приводится в [4].

В заключение отметим, что на результаты измерений пульсаций давления сильнее влияет изменение пульсаций влагосодержания газа, чем температуры. Проникновение влаги в датчик заметно меняет его характеристики. Следовательно, необходимо создать достаточно эффективную защиту от этого явления. При изменении температуры в датчике происходит самокомпенсация, которая проявляется в уменьшении модуля упругости пленки из полиимиды и увеличении электрической емкости датчика; их суммарное воздействие частично стабилизирует режим работы датчика.

Универсальность, гибкость и небольшая стоимость этих датчиков открывают новые возможности для изучения объектов в условиях с повышенными радиацией, температурой, влажностью, где датчики обычной конструкции не применимы.

Литература

1. **Блокин-Мечталин Ю. К.** Многофункциональный измерительно-вычислительный и управляющий комплекс для экспериментальной электродинамики // Датчики и системы. 2010. № 5. С. 10—17.
2. **Беклемищев А. И. и др.** Стенд СГД4 для метрологических исследований многоканальных модулей давления // Там же. С. 43—46.
3. **Мошаров В. Е., Радченко В. Н.** Новый метод визуализации течений на поверхности аэродинамических моделей // Там же. С. 48—53.
4. **Порта М. и др.** Пленочные датчики давления и их применение / Пер. с фр. М.: Всесоюз. центр переводов, 1983. № Е-32663.
5. **Казарян А. А.** Пленочные датчики давления. М.: Бумажная галерея, 2006.
6. **Пат. 2419076 РФ.** Способ измерения пульсаций давления / А. А. Казарян // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 14.

Дата принятия 08.04.2013 г.

681.12:81.318.3(018)

Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в безнапорных трубопроводах

И. Д. ВЕЛЬТ, Ю. В. МИХАЙЛОВА

НИИТеплоприбор, Москва, Россия, e-mail: agydel@gmail.com

Приведены результаты теоретического исследования магнетогидродинамического взаимодействия потоков слабо проводящей жидкости в открытых руслах и безнапорных трубопроводах. Вычислены объемные весовые функции для электромагнитного расходомера в зависимости от места расположения электродов и уровня. Показана возможность одновременных измерений расхода и уровня в незаполненных трубопроводах при помощи специальной обработки сигналов с нескольких пар электродов.

Ключевые слова: магнетогидродинамическое взаимодействие, электромагнитные расходомер и уровень, индуктор.

The theoretical study results of magnetohydrodynamic interaction of poorly conducting liquid flows in the open canal beds and free-flow pipelines are presented. The volume weight functions for electromagnetic flowmeter depending on the location of electrodes and liquid level are calculated. The possibility of simultaneous measurements of flow rate and level in unfilled pipelines by means of special processing of signals from several pairs of electrodes is shown.

Key words: magnetohydrodynamic interaction, electromagnetic flowmeter and level meter, inductor.

Безнапорные трубопроводы и открытые каналы (лотки) широко используют в различных отраслях народного хозяйства для слива и транспортирования самых разнообразных жидкостей и смесей. Их применяют при гидротранспортировании угля, руды, отделенной породы, золы на теплостанциях, песка при строительстве гидросооружений, сточных жидкостей на предприятиях пищевой, химической и целлюлозно-бумажной промышленности, для перекачки сбросных и сточных вод предприятий и коммунальных систем. Безнапорные трубопроводы, открытые каналы — неотъемлемые

элементы систем водоотведения, во многом определяющих экологическую безопасность территорий, на которых они расположены.

Эффективное функционирование систем водоотведения невозможно без контроля расхода и объема сточных вод, сбрасываемых в водоемы и канализацию, подаваемых на очистные сооружения и распределяемых по отдельным блокам сооружений очистки. Увеличение стоимости очистки воды, усиление мер по охране окружающей среды, повышение эффективности функционирования систем водоотведе-

ния и канализации привело к потребности измерений объема и расхода сточных вод.

Безнапорные потоки в канализационных системах имеют твердые примеси, которые существенно искажают эпюру скоростей. В канализационных системах в составе сточных жидкостей и загрязненных вод содержится значительный процент фекалий, щелочей, кислот и солей, причем некоторые из примесей могут выпадать в осадок особенно при малых скоростях потока.

Основной трудностью при определении расхода жидкостей в безнапорных трубопроводах является необходимость проводить измерения при постоянно меняющемся уровне заполнения канала и распределении скорости течения по сечению канала. Ни один из существующих расходомеров для этих измерений не применим, так как в таких условиях неизвестна площадь сечения потока — она меняется в зависимости от режима течения.

Широко распространенный и хорошо зарекомендовавший себя электромагнитный метод измерений объемного расхода электропроводных жидкостей, текущих по напорным трубопроводам, можно применять и для безнапорных потоков. В каналах электромагнитных расходомеров отсутствуют какие-либо препятствия потоку, т. е. не создаются условия для выпадения в осадок многофазных жидкостей, суспензий и замутненных потоков. Это преимущество особенно ценно при измерениях безнапорных потоков, протекающих при скоростях, близких к критическим, когда есть вероятность выпадения осадка.

Сигнал на электродах первичного преобразователя электромагнитного расходомера можно записать в виде

$$U = \int_{\tau} \mathbf{v}[\mathbf{B} \times \mathbf{W}] d\tau, \quad (1)$$

где U — напряжение между электродами; $\mathbf{B}$ — вектор индукции магнитного поля; $\mathbf{W}$ — объемная весовая функция; $\mathbf{v}$ — вектор скорости потока; τ — объем рабочей зоны канала.

Весовая функция $\mathbf{W}$ показывает вклад различных точек рабочей зоны канала в выходной сигнал первичного преобразователя. Она определяется уровнем заполнения канала электропроводной жидкостью, диаметром канала, протяженностью изолированного участка, местоположением и размерами электродов, при этом весовая функция не зависит ни от скорости, ни от внешнего магнитного поля. Манипулируя различными распределениями магнитного поля в канале расходомера, можно получить различные зависимости сигнала между электродами от скорости потока и распределения электрической проводимости по поперечному сечению канала.

Представим теперь, что канал прибора не полностью заполнен потоком жидкости. В этом случае в качестве измеряемого параметра рассматривается не только скорость потока, но и фактор, вызвавший изменение объемной весовой функции.

Для анализа этого случая сигнал U запишем аналогично (1) в виде

$$U = \int_{\tau} \mathbf{W}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}] d\tau.$$

Если магнитное поле подобрано таким образом, что в некоторой области $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]_i = \text{const}$, а вне этой области близко

к нулю, потенциал U_i характеризует среднее значение объемной весовой функции в данной локальной области.

Можно представить магнитное поле также и таким, что среднее значение $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]_i$ в локальной области, где $\mathbf{B} \neq 0$, обращается в нуль. В этом случае потенциал электрода характеризует неоднородность распределения весовой функции. При дополнительном предположении о том, что $[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]_i$ обладает асимметрией относительно какого-либо направления, потенциал на электроде характеризует ту часть неоднородности распределения весовой функции, которая имеет ту же асимметрию. Использование получаемой такими методами информации о кинематической структуре потока и распределении фазового состава среды по электропроводности позволяет решить задачу измерений безнапорного потока жидкости.

Измерения безнапорного потока электромагнитным методом. Для измерений двух существенно разных параметров — скорости и уровня или «живого» сечения потока — необходимо предусмотреть, по крайней мере, два режима работы электромагнитного расходомера, отличающихся, например, использованием различных распределений магнитного поля в канале. Следует создать такие условия распределений магнитных полей в канале, при которых обеспечивалась бы максимальная избирательность измеряемых параметров. Как уже указывалось выше, функция $\mathbf{W}$ в (1), имеющая смысл весового множителя для элемента $d\tau$, определяется исключительно граничными условиями: геометрическими размерами канала трубы, положением уровня раздела сред между воздухом и жидкостью, т. е. в первую очередь «живым» сечением потока.

Магнитное поле можно описать вектором магнитной индукции во всех точках внутри первичного преобразователя электромагнитного расходомера в виде суммы членов бесконечного ряда гармоник:

$$B_p = B_0 \sum_{k=1}^{\infty} P_k \rho^k \sin k\theta; \quad B_\theta = B_0 \sum_{k=0}^{\infty} P_k \rho^k \cos k\theta,$$

где B_p , B_θ — проекции вектора на координатные оси; P_k — коэффициент, зависящий от геометрических размеров индукторной катушки; B_0 — нулевая составляющая вектора магнитной индукции,

$$B_0 = [2\mu_0 i\omega / (\pi S)] \sin[(\phi_2 - \phi_1)(r_2 - r_1)].$$

Здесь i — сила тока; ω — число витков; S — площадь поперечного сечения прямолинейного участка; ϕ_1 , ϕ_2 , r_1 , r_2 — угловые и радиальные размеры индукторной катушки, соответственно.

Магнитное поле, создаваемое индуктором традиционной конструкции, имеет только нечетные пространственные быстро затухающие гармоники, асимметричные относительно линии, соединяющей электроды. Как будет показано ниже, при таком магнитном поле и однородном распределении скорости потока по сечению канала сигнал, индуцированный между электродами, слабо зависит от изменения объемной весовой функции. Если же катушки индуктора включены навстречу (по создаваемым ими магнитным потокам), то результирующее магнитное поле в канале имеет только четные пространственные гармоники, симметричные отно-

сительно линии, соединяющей электроды. При этом зависимость сигнала между электродами от изменения объемной весовой функции проявляется сильнее.

Таким образом, предлагаем поочередно переключать катушки индуктора согласно и встречно и путем обработки измеренных сигналов при разных режимах магнитного поля вычислять два интересующих параметра — скорость потока и уровень заполнения канала. Естественно, электроды должны всегда замыкаться измеряемой средой, т. е. уровень заполнения канала должен находиться выше линии, соединяющей электроды. Если же необходимо расширить диапазон изменения уровня, то следует вводить другую пару электродов, расположенную ниже первой.

Режим измерений скорости потока. Оптимальным режимом измерений скорости потока будем считать режим, при котором сигнал на электродах определяется только скоростью потока и не зависит от изменения граничных условий, определяемых горизонтальной поверхностью раздела сред между измеряемой жидкостью и воздухом. Такой режим осуществляется, если в рабочей части канала магнитное поле двумерно и не имеет составляющей, направленной вдоль оси канала. Очевидно, что указанное поле конструктивно осуществить сравнительно просто.

Ниже приведем доказательство оптимальности условий для режима измерений скорости потока. На рис. 1 представлено сечение ненапорного трубопровода. Если магнитное поле двумерно, т. е. $H_z = 0$, $H_x = u(x, y)$, $H_y = w(x, y)$, то при постоянной скорости распределение индуцированного электрического поля не зависит от уровня жидкости, т. е. от формы границ раздела жидкость—стенка трубопровода и жидкость—воздух.

Закрашенная область соответствует жидкой фазе, поверхность жидкости предполагается плоской (линия AB). Предполагаем также, что внутренняя поверхность канала покрыта слоем изолятора. Радиус канала равен r . Потенциал электрического поля ϕ удовлетворяет уравнению Пуассона, которое в комплексных переменных $z_1 = x + iy$ и $z_2 = x - iy$ принимает вид $4\partial^2\phi/\partial z_1\partial z_2 = \text{Brot } \mathbf{v}/c$, где c — скорость света, с граничным условием $\partial\phi/\partial r = 0$ на дуге ACB и условием $\partial\phi/\partial y = 0$ на отрезке AB .

В канале ферромагнитных включений нет, следовательно, $\mathbf{B} = \mathbf{H}$ и согласно уравнениям Максвелла $\text{div } \mathbf{H} = 0$. Поскольку магнитное поле двумерное и $\partial H_x/\partial x + \partial H_y/\partial y = 0$, можно ввести магнитный потенциал Ψ так, что $H_x = \partial\Psi/\partial y$, $H_y = -\partial\Psi/\partial x$.

Электрический потенциал ϕ в рассматриваемом случае ($\mathbf{v} = \text{const}$) удовлетворяет уравнению Лапласа $\nabla^2\phi = 0$ с условием равенства нулю нормального тока на границах раздела

$$(\mathbf{n}\partial/\partial r)[\phi + e\mathbf{v}\Psi/c] = 0,$$

где e — заряд электрона.

Поскольку магнитный потенциал Ψ удовлетворяет уравнению Лапласа, функция

$$\phi = -e\mathbf{v}\Psi/c \quad (2)$$

также удовлетворяет этому уравнению Лапласа и граничному условию равенства нормального тока.

Так как уравнение Лапласа с заданным значением нормальной производной на границе (задача Неймана) имеет

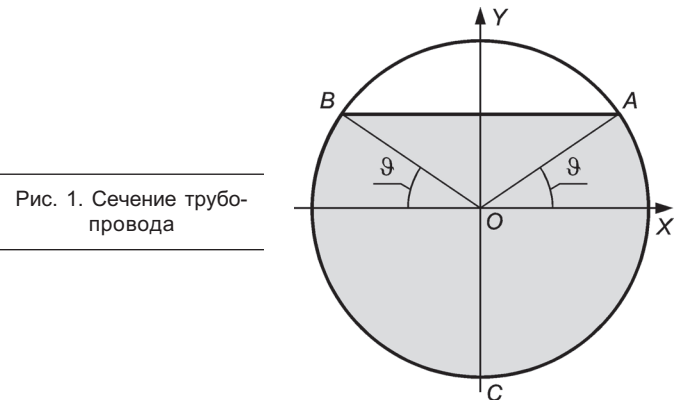


Рис. 1. Сечение трубопровода

единственное решение, распределение потенциала индуцированного электрического поля выразим уравнением (2).

При этом функция Ψ имеет вид

$$\Psi = \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n (a_n \cos n\vartheta + b_n \sin n\vartheta).$$

Разность потенциалов $U = \phi(\rho=r, \vartheta=\theta) - \phi(\rho=r, \vartheta=\pi - \theta)$ на электродах электромагнитного расходомера найдем из выражения

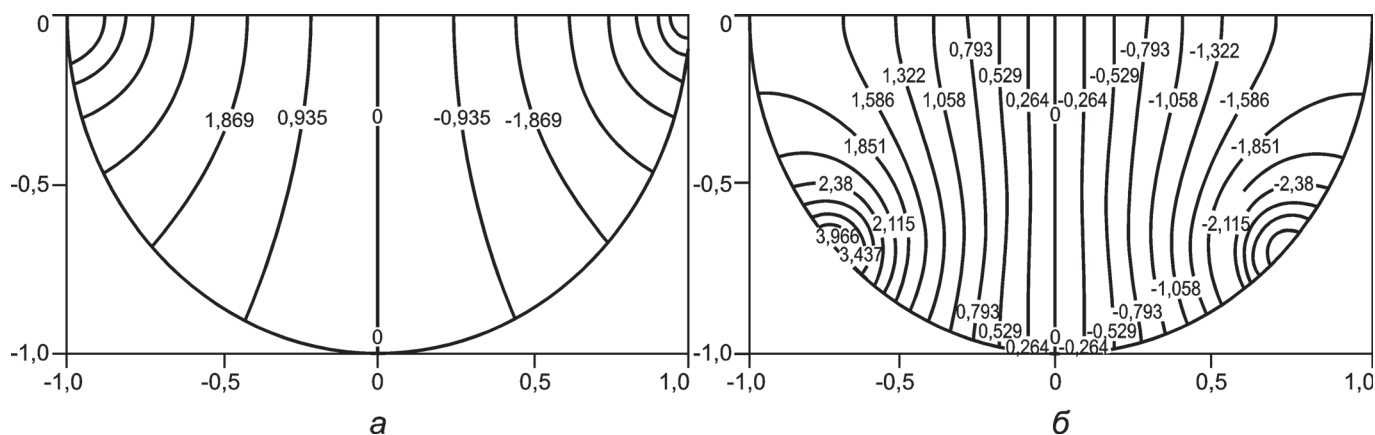
$$U = -\frac{2e}{c} \sum_{\substack{m=0 \\ n=2m+1}}^{\infty} a_n r^n \cos n\theta - \frac{2e}{c} \sum_{\substack{m=0 \\ n=2m}}^{\infty} b_n r^n \sin n\theta.$$

Следовательно, рассмотренный режим является оптимальным для измерения скорости потока. При указанных условиях индуцированное электрическое поле пропорционально скорости потока и не несет информацию об уровне жидкости в канале (естественно, только в том случае, когда уровень не опустился ниже контактных поверхностей электродов).

Режим измерений уровня заполнения канала. Рассмотрим условия, при которых проявляется зависимость сигнала на электродах от изменения уровня заполнения канала измеряемым потоком электропроводной жидкости. Для качественной оценки зависимости $\mathbf{W}$ от уровня в [1] были выполнены исследования весовой функции в двумерном случае.

Весовая функция имеет максимум у электродов. Если электроды расположены в точках с угловыми координатами $\vartheta_{31}, \vartheta_{32}$ то линии уровня при полном заполнении канала расположены так, как показано на рис. 2. Деформация линий уровня при половинном заполнении канала показана на рис. 3.

Отметим, что при $\vartheta_{31}=0, \vartheta_{32}=\pi$ (электроды вблизи поверхности раздела) весовая функция в жидкости точно равна удвоенному значению весовой функции для полностью заполненного канала. Однако при $\vartheta_{31} \neq 0, \pi$ топология весовой функции при половинном заполнении резко отличается.

$$a - \vartheta_{\alpha_1} = 0, \vartheta_{\alpha_2} = \pi; \text{ б) } -\vartheta_{\alpha_1} = -\pi/4, \vartheta_{\alpha_2} = -3\pi/4$$

$$a - \vartheta_{\alpha_1} = 0, \vartheta_{\alpha_2} = \pi; \quad b - \vartheta_{\alpha_1} = -\pi/4, \vartheta_{\alpha_2} = -3\pi/4$$

рично, то сигнал между электродами будет равен нулю при практически любом значении расхода измеряемой среды. Если же канал заполнен потоком жидкости только наполовину, то сигнал между электродами будет максимально зависеть от объемного расхода этой среды. Иными словами этот режим чрезвычайно чувствителен к изменению симметрии распределения скорости потока и объемной весовой функции относительно линии, соединяющей электроды. Так как единственным параметром, нарушающим симметрию электрического поля в канале, является изменение объемной весовой функции вследствие изменения распределения электрической проводимости по рабочему объему канала, полагаем, что при таком магнитном поле режим измерения уровня будет близок к оптимальному.

Очевидно, что аналогичные результаты определения скорости и уровня потока измеряемой среды можно получить при последовательном пропускании тока питания только через верхнюю или только через нижнюю катушки, а затем суммируя и вычитая измеренные сигналы между электродами.

Конструкция электромагнитного расходомера-уровнемера. На рис. 4 изображен макет преобразователя расхода для трубопроводов с условным проходным диаметром Ду 100 мм. В рабочем положении прибора линии, соединяющие соответствующие пары электродов, должны быть в горизонтальном положении. Его конструкция отличается от традиционной только дополнительными парами электродов, расположенными по хордам, параллельным горизонтальной поверхности. Преобразователь расхода имеет трубопровод 1 с фланцами, индуктор прибора состоит из магнитопровода 4, являющегося к тому же корпусом прибора, и двух катушек возбуждения 2, одна из которых расположена на верхней наружной поверхности трубы, а другая соответственно на нижней. Трубопровод выполнен из немагнитного материала (нержавеющей стали X18H10T), внутренняя поверхность его футерована фторопластом. По центральному периметру канала расположены три пары электродов 3. Предусмотрены два режима работы — при согласном и встречном включении катушек возбуждения к источнику тока питания индуктора.

Измерения сигналов с электродов осуществляются циклично с поочередным опросом каждой пары. Результаты измерений анализируются в измерительной системе.

Прибор работает следующим образом. Сигнал α , возникающий между электродами при традиционном поперечном магнитном поле, пропорционален скорости потока v :

$$\alpha \sim v = Q / S_g,$$

где Q — объемный расход; S_g — «живое» сечение потока.

Сигнал β , возникающий между электродами в магнитном поле при встречном включении катушек, пропорционален скорости и отношению свободного от потока сечения S_h канала к «живому» сечению S_g , т. е.

$$\beta \equiv v S_h / S_g = v (S / S_g - 1),$$

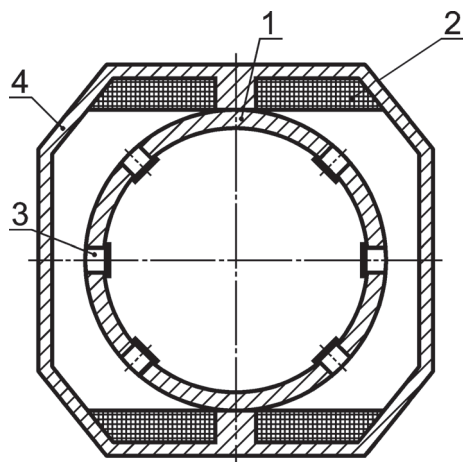


Рис. 4. Электромагнитный расходомер для безнапорного потока с Ду 100 мм:

1 — трубопровод; 2 — катушка возбуждения; 3 — электрод;
4 — магнитопровод

где S — полная площадь поперечного сечения канала.

Путем обработки двух сигналов α и β вычисляем объемный расход Q и относительную площадь поперечного потока S_g / S по формулам

$$Q = S \alpha^2 / (\alpha + \beta); S_g / S = \alpha / (\alpha + \beta).$$

Если уровень жидкости в канале находится между полным заполнением и половиной поперечного сечения канала, то измерение расхода осуществляется путем обработки сигналов, снимаемых с пары электродов, которые расположены по диаметру канала. Если уровень заполнения находится ниже диаметрально расположенных электродов, то измерение расхода проводится путем обработки сигналов, снимаемых только с пар электродов, расположенных ниже по хорде.

Имеющееся трехканальное измерительное устройство по специальному алгоритму проводит анализ сигналов, снимаемых с электродов, вычисляет площадь поперечного сечения потока жидкости, среднюю скорость и объемный расход. На дисплее прибора приводится топографическое изображение структуры потока в канале расходомера.

Экспериментальные результаты. Целью этих исследований являлась оценка чувствительности прибора к изменению уровня заполнения канала потоком. Из-за отсутствия возможности провести исследования в натурных условиях испытания проведены на воде с использованием расходомерной установки. На структуру потока влияли, изменяя площадь его «живого» сечения введением в канал электроизоляционных вставок различного размера, перекрывающих верхнюю часть поперечного сечения канала.

Хотя картина имитации не совсем точная (распределение скорости потока отличается от безнапорного потока) таким способом можно оценить чувствительность прибора к эффектам, вызывающим изменение «живого» сечения потока.

Под чувствительностью прибора f к «живому» сечению будем понимать величину, выражаемую формулой

$$f = \Delta \beta / \Delta \alpha,$$

где при скорости потока, соответствующей номинальной $v = v_n$, величина $\Delta \beta$ — приращение сигнала на электродах при встречном включении катушек и изменении структуры потока от симметричного относительно оси канала ($f = 0$) до предельно асимметричного ($f = \max$); $\Delta \alpha$ — приращение сигнала при согласном включении катушек и симметричной относительно оси канала структуре потока ($f = 0$).

Экспериментальные исследования проводились в двух режимах, соответствующих различным схемам включения катушек. Сигнал α , возникающий между электродами при традиционном магнитном поле, пропорционален скорости потока v . Реальное магнитное поле, образованное согласным включением катушек, отличается от оптимального наличием малой составляющей магнитного поля вдоль оси канала.

Зависимость сигнала α от изменения структуры потока можно представить выражением вида

$$\alpha = K_v (1 + a_1 P + a_2 P^2) Q / S_g,$$

где K_v , a_1 , a_2 — эмпирические коэффициенты, определяемые при градуировке прибора; P — критерий подбора структуры потока, $P = S_h / S_g$.

Таблица 1

Результаты измерений сигнала α

Расход по расходомер- ной установ- ке, м ³ /ч	$P = 0,000$; $S_g = 0,00785 \text{ м}^2$	$P = 0,127$ $S_g = 0,006965 \text{ м}^2$	$P = 0,243$ $S_g = 0,006315 \text{ м}^2$	$P = 0,783$ $S_g = 0,004402 \text{ м}^2$
97,945	15,344	17,107	17,998	25,080
49,007	7,723	8,580	9,035	12,495
24,848	0,8845	4,322	4,568	6,338

Таблица 2

Результаты измерений сигнала β

Расход по расходомер- ной установ- ке, м ³ /ч	$P = 0,000$ $S_g = 0,00785 \text{ м}^2$	$P = 0,127$ $S_g = 0,006965 \text{ м}^2$	$P = 0,243$ $S_g = 0,006315 \text{ м}^2$	$P = 0,783$ $S_g = 0,004402 \text{ м}^2$
97,945	0,000	1,524	2,679	9,929
49,007	0,000	0,775	1,424	5,107
24,848	0,000	0,427	0,740	2,585

Сигнал β , возникающий между электродами при встречном включении катушек, пропорционален скорости и отношению свободного от потока сечения S_h канала к «живому» сечению S_g , т. е.

$$\beta = K_S(1 + b_1P + b_2P^2)v(S/S_g - 1),$$

причем S — сечение канала; K_S , b_1 , b_2 — эмпирические

коэффициенты, определяемые при градуировке прибора.

Путем обработки двух сигналов α и β вычисляют объемный расход Q и относительную площадь живого сечения потока S_g/S по формулам

$$Q = (S\alpha^2\bar{K}_S / \bar{K}_v) / (\bar{K}_S\alpha + \bar{K}_v\beta);$$

$$S_g/S = \bar{K}_S\alpha / (\bar{K}_S\alpha + \bar{K}_v\beta),$$

где $\bar{K}_v = K_v(1 + a_1P + a_2P^2)$, $\bar{K}_S = K_S(1 + b_1P + b_2P^2)$.

Результаты испытаний приведены в табл. 1, 2.

По результатам измерений чувствительность прибора к структуре потока $f \approx 0,64$, что вполне удовлетворительно.

Литература

1. Вельт И. Д., Михайлова Ю. В. Электромагнитный метод измерения расхода и уровня жидкости в незаполненных трубопроводах // Датчики и системы. 1999. № 7—8. С. 22.

Дата принятия 16.04.2013 г.

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

006:621.783.2

Низкотемпературный излучатель для поверки и калибровки радиационных термометров

А. В. ЗУЕВ, В. А. РОЖКОВ

НПЛ «Метропир», С.-Петербург, Россия, e-mail: av.zuev@mail.ru

Рассмотрена конструкция и особенности эксплуатации излучателя для поверки и калибровки радиационных термометров в диапазоне температуры от -30 до $+120$ °С. Исследовано распределение температуры по дну и стенкам излучающей полости в стационарном режиме на нижнем и верхнем пределах диапазона.

Ключевые слова: образцовый излучатель, модель абсолютно черного тела, распределение температуры, радиационный термометр.

The design and operation features of radiation thermometers in the temperature range from -30 to $+120$ °C are considered. The temperature distribution on the bottom and the walls of radiating cavity in stationary mode on the lower and upper range limits is studied.

Key words: standard radiator, blackbody model, temperature distribution, radiation thermometer.

Широкое распространение радиационных термометров в энергетике, жилищно-коммунальном хозяйстве, транспорте, строительстве и медицине обусловлено не-

обходимостью решения разнообразных задач по диагностике, мониторингу, энергосбережению и предотвращению аварийных ситуаций [1—4]. Организации, осуществляющие деятельность в