

ки с применением средств измерений сопротивления термистора и, особенно, температуры тела термистора с погрешностями, трудно достижимыми в условиях серийного производства, т. е. примерно в 10—20 раз меньше, чем заданные в технических условиях [3].

В цифровом радиозонде есть возможность эти недостатки устранить [8]. Исследование и испытание макетов цифрового радиозонда с градуировкой ИТ по новым методикам и передачей данных по радиоканалу цифрового радиозонда показали, что $\Delta T_{\text{и}}$ сопоставимо с погрешностями измерений $\Delta T_{\text{г}} = \pm 0,4 \text{ K}$, если применить методики градуировки без использования градуировочных характеристик, аппроксимируемых аналитическими функциями.

Л и т е р а т у р а

1. Фридзон М. Б., Ермошенко Ю. М. Радиозондирование атмосферы // Мир измерений. 2009. № 7. С. 18.
2. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation // World Meteorological Organization (WMO). 2006. № 8. С. 1.12-20—1.12-23.

3. Зонд аэрологический малогабаритный АК2. Технические условия. МНЖИ. 416123.002 ТУ. 2007.

4. Положение о метрологическом обеспечении аэрологических наблюдений. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды. Москва. 2007.

5. Радиозонды аэрологические. [Электрон. ресурс]. http://www.fundmetrology.ru/10_tipy_si/list.aspx (дата обращения 22.11.2013 г.).

6. Термисторы фирмы Siemens and Matsushita. Библиотека электронных компонентов. Выпуск 5. 1999 г. [Электрон. ресурс]. <http://www.platan.ru/docs/bek/0,5pdf> (дата обращения 22.11.2013 г.).

7. NTC thermistors for temperature measurement. [Электрон. ресурс]. <http://fraden.brandeis.edu/courses/phys39/Thermal%20Control/hardware/Thermistor%20EPCOS%20B57861S0202F040.pdf> (дата обращения 22.11.2013 г.).

8. Пат. 103195 РФ. В. В. Чистюхин и др. Универсальный малогабаритный радиозонд // Изобретения. Полезные модели. 2011. № 9.

Дата принятия 20.02.2014 г.

681.12.001.24.008:621.1.013.018.5

Измерения массы влажного насыщенного пара и отдаваемой паром тепловой энергии с применением объемных расходомеров

Б. М. БЕЛЯЕВ, И. М. ШЕНБРОТ

Всесоюзный научно-исследовательский институт метрологической службы,
Москва, Россия, e-mail: shen11@yandex.ru

Рассмотрены особенности измерения массы и тепловой энергии насыщенного водяного пара с использованием датчика объемного расхода и учетом коэффициентов влияния температуры, давления и степени сухости. Приведен пример расчета погрешностей измерений массы и тепловой энергии при проектировании узла учета влажного насыщенного пара.

Ключевые слова: насыщенный водяной пар, тепловая энергия, расходомер.

The peculiarities of measurement of the mass thermal energy of saturated water vapor with use of volume flow transducer and with taking into account the influence of temperature, pressure and dryness factor are considered. An example of errors calculation for measurement of mass and heat energy at designing of database site for accounting of wet saturated vapor with application of volume flow transducer is given.

Key words: saturated water vapor, heat energy, flow meter.

При измерениях массы насыщенного водяного пара по объемному расходу, последний умножается на плотность, которая вычисляется по температуре или давлению пара (значение любой из этих величин определяет точку на кривой насыщения пара).

Современные тепловычислители допускают измерения массового расхода и массы только сухого насыщенного пара или предусматривают ввод степени сухости пара как условно-постоянной величины. Состояние сухого насыщенного пара неустойчиво: пар либо возвращается в перегретое состояние, либо становится влажным. Состояние влажного насыщенного пара может быть достаточно устойчивым: пе-

реход из неустойчивого состояния сухого насыщенного пара в жидкость сопровождается снижением его сухости от 1 до 0, при этом плотность пара возрастает примерно в 1600 раз при абсолютном давлении 10 кПа, в 200 раз при 1 МПа и в 15 раз при 10 МПа [1]. Степень сухости насыщенного пара можно найти по его объему и массе, но применение одновременно и массового, и объемного счетчиков (расходомеров) достаточно затратно.

Плотность и энтальпия перегретого пара и воды в жидком состоянии определяются двумя параметрами — температурой и давлением, а насыщенного пара — температурой (либо абсолютным давлением) и степенью его сухости.

Температура и абсолютное давление в состоянии насыщения пара взаимосвязаны. Плотность воды и перегретого пара монотонно возрастает с повышением давления и убывает с повышением температуры. Энтальпия, наоборот, убывает с повышением давления и растет с повышением температуры. В связи с этим в [2] отмечена взаимная компенсация погрешностей измерений температуры и давления при косвенном измерении тепловой энергии перегретого пара.

Предел относительной погрешности объемного расхода всегда указан в его документации, поэтому для определения погрешностей измерений массового расхода и массы достаточно оценить погрешность измерения плотности (ее можно считать не коррелированной с погрешностью расхода).

Плотность влажного насыщенного пара находим из уравнения [3]:

$$\rho = \rho' \rho'' / [\rho''(1 - \varphi) + \rho' \varphi], \quad (1)$$

где ρ' , ρ'' — соответственно плотность жидкой и газовой фаз на линии насыщения; φ — степень сухости пара.

Энтальпию, необходимую для расчета тепловой энергии, определяем по формуле

$$h = h''(1 - \varphi) + h' \varphi, \quad (2)$$

где h' , h'' — энтальпия жидкой и газовой фаз на линии насыщения.

Плотность каждой фазы находим по уравнениям, содержащимся в [3].

Погрешность вычисления плотности воды зависит от погрешностей измерений ее температуры (вода считается несжимаемой, поэтому давление почти не влияет на ее плотность), а также давления и температуры газа. Гораздо сложнее влияет температура или давление на плотность и энтальпию насыщенного пара. В силу их однозначной связи достаточно изучить воздействие одного из этих параметров, поэтому ограничимся анализом влияния температуры на плотность, энтальпию и тепловую энергию. Другим влияющим параметром является степень сухости пара.

С повышением температуры насыщенного пара растет и давление. На разных участках линии насыщения повышение температуры воздействует сильнее или слабее, чем повышение давления. Поэтому влияние температуры пара на плотность изменяется при повышении температуры в пределах 100—600 °С, но всегда приводит к снижению плотности. Энтальпия при повышении температуры от 100 °С сначала растет, при 234 °С достигает максимального значения, а начиная с 237 °С снижается [1]. Такую особенность необходимо исследовать для определения ее влияния на точность измерений массы и тепловой энергии пара.

Влияние относительной погрешности измерений параметров (температуры t , степени сухости φ) на относительную погрешность косвенного измерения величины (в данном случае массы M , энтальпии h , тепловой энергии Q) характеризуется относительными коэффициентами влияния, которые обозначены $\vartheta_{M|t}$, $\vartheta_{M|\varphi}$, $\vartheta_{h|t}$, $\vartheta_{h|\varphi}$, $\vartheta_{Q|t}$, $\vartheta_{Q|\varphi}$, соответственно. Эти коэффициенты называются по-разному в различных нормативных документах, например «коэффициент чувствительности» в стандарте [4], и обозначаются различными символами, например K в рекомендации [5]. Авторы отдали

предпочтение термину «коэффициент влияния» и символу ϑ в соответствии с [6]. В дальнейшем прилагательное «относительный» при коэффициенте опустим.

Учитывая, что тепловая энергия Q пропорциональна произведению плотности ρ на h , коэффициенты влияния температуры t и степени сухости φ на ρ и h находим как

$$\vartheta_{\rho|t} = (\partial \rho / \partial t) t / \rho; \quad (3)$$

$$\vartheta_{\rho|\varphi} = (\partial \rho / \partial \varphi) \varphi / \rho; \quad (4)$$

$$\vartheta_{h|t} = (\partial h / \partial t) t / h; \quad (5)$$

$$\vartheta_{h|\varphi} = (\partial h / \partial \varphi) \varphi / h. \quad (6)$$

Коэффициенты влияния температуры и сухости пара на тепловую энергию имеют вид:

$$\vartheta_{Q|t} = \vartheta_{\rho|t} + \vartheta_{h|t} \quad (7)$$

$$\vartheta_{Q|\varphi} = \vartheta_{\rho|\varphi} + \vartheta_{h|\varphi}. \quad (8)$$

Запишем коэффициенты (3)—(6) через параметры воды и перегретого пара, составляющих насыщенный пар, дифференцируя уравнения (1), (2) и произведение левых частей этих уравнений. Получим выражения, в которых коэффициент влияния зависит от температуры пара:

$$\vartheta_{\rho|\varphi}(t, \varphi) = \varphi(\rho' - \rho'') / [\rho''(1 - \varphi) + \rho' \varphi];$$

$$\vartheta_{h|\varphi}(t, \varphi) = \varphi[h''(1 - \varphi) + h' \varphi],$$

где одинарный штрих обозначает параметр воды, а двойной — параметр перегретого пара на линии насыщения.

Задача тепловычислителя при измерении массы насыщенного пара определить, находится ли пар в насыщенном состоянии. Если проверка покажет, что значения двух параметров (температуры и абсолютного давления) не соответствуют насыщенному состоянию (независимо от степени сухости), то плотность следует вычислять по алгоритму для воды либо для перегретого пара в зависимости от того, переход в какую сторону от линии насыщения показала проверка. Пониженная точность датчиков температуры и абсолютного давления, а также задание степени сухости пара может привести к тому, что реальный насыщенный пар будет тепловычислителем определен как вода в жидком состоянии, и тогда в зависимости от алгоритма либо будут резко завышены результаты расчета отданной покупателю массы и занижена тепловая энергия, либо будет зафиксирована нештатная ситуация. На погрешности измерений плотности и энтальпии пара, зависящие от погрешностей датчиков температуры и абсолютного давления, существенно влияют температура (или давление) насыщенного пара и степень его сухости.

Коэффициенты влияния температуры, давления и степени сухости пара на результаты измерений массы пара и отдаваемой им тепловой энергии оценивают при измерении объемного расхода с точностью до постоянного множителя как произведение плотности на энтальпию.

Численное дифференцирование было проведено с помощью аттестованной компьютерной программы Флоуметрика-2007. Коэффициент влияния температуры на тепловую

энергию также можно получить суммированием коэффициентов влияния температуры на плотность и на энтальпию пара по формулам (7), (8). Поскольку здесь рассматривается коммерческий учет насыщенного пара в промышленности, анализ ограничен диапазоном температур 100—300 °С.

Коэффициенты влияния абсолютного давления получают как обратные по знаку и абсолютной величине коэффициентам влияния температуры. Следовательно, достаточно исследовать только коэффициенты влияния температуры в зависимости от степени сухости насыщенного пара φ . Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Коэффициент $\vartheta_{\rho|t}(t, \varphi) = 3,29$ при температуре 100 °С и практически не изменяется при различных степенях сухости пара. С ростом температуры этот коэффициент растет, но медленнее, чем температура. Коэффициент $\vartheta_{h|t}(t, \varphi)$ ни в одной области не выходит за пределы 0,7: с понижением степени сухости пара он немного увеличивается, начиная от 0,16 при 100 °С, а с повышением температуры растет до 0,6 при 300 °С. Из-за того, что $\vartheta_{\rho|t}(t, \varphi)$ существенно больше $\vartheta_{h|t}(t, \varphi)$, он играет доминирующую роль во влиянии на погрешность измерений тепловой энергии.

Значения коэффициентов влияния степени сухости на плотность, энтальпию, тепловую энергию в зависимости от температуры пара представлены в табл. 2.

Экономическая целесообразность оценки фазового состояния пара. Как указано выше, тепловычислитель, претендующий на измерения массы и тепловой энергии, отдаваемой насыщенным водяным паром, должен по результатам измерений температуры и абсолютного давления пара проверять, действительно ли пар находится в состоянии насыщения. Качественная оценка влияния неправильного определения фазового состояния воды вследствие погрешностей измерений температуры и давления на экономические интересы продавца и покупателя представлена в табл. 3.

Таблица 3

Влияние погрешностей измерений температуры и давления на определение фазового состояния воды

Знак погрешностей измерений	Состояние воды	Влияние на измерение массы пара	Влияние на тепловую энергию
+	Перегретый пар	Практически не влияет	Несколько завышенный отсчет
—	Вода	Существенно завышенный отсчет	Существенно заниженный отсчет

Таблица 1

Значения коэффициентов влияния температуры на плотность $\vartheta_{\rho|t}(t, \varphi)$, энтальпию $\vartheta_{h|t}(t, \varphi)$ насыщенного водяного пара и отдаваемую им тепловую энергию $\vartheta_{Q|t}(t, \varphi)$

$t, ^\circ\text{C}$	Степень сухости, φ											
	1,0	0,9	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	0,3
	$\vartheta_{\rho t}(t, \varphi)$				$\vartheta_{h t}(t, \varphi)$				$\vartheta_{Q t}(t, \varphi)$			
100	3,29	3,29	3,29	3,29	0,16	0,16	0,18	0,22	3,45	3,45	3,44	3,51
200	4,02	4,02	3,99	3,93	0,32	0,32	0,29	0,25	4,34	4,34	4,28	4,18
300	4,91	4,86	4,67	4,15	0,61	0,56	0,36	0,06	5,42	5,42	5,03	4,21

Таблица 2

Значения коэффициентов влияния степени сухости насыщенного пара на его плотность $\vartheta_{\rho|\varphi}(t, \varphi)$, энтальпию $\vartheta_{h|\varphi}(t, \varphi)$ и тепловую энергию $\vartheta_{Q|\varphi}(t, \varphi)$

$t, ^\circ\text{C}$	Степень сухости, φ											
	1,0	0,9	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	0,3	1,0	0,9	0,6	0,3
	$\vartheta_{\rho \varphi}(t, \varphi)$				$\vartheta_{h \varphi}(t, \varphi)$				$\vartheta_{Q \varphi}(t, \varphi)$			
100	1,00	1,00	1,00	1,00	0,84	0,63	0,76	0,61	1,84	1,63	1,76	1,61
200	0,99	0,99	0,99	0,97	0,69	0,67	0,57	0,41	1,68	1,66	1,56	1,38
300	0,93	0,93	0,90	0,81	0,51	0,49	0,39	0,24	1,44	1,42	1,29	1,05

По результатам табл. 3 можно сделать вывод, что для расчетов по массе продавцу выгодно считать пар водой, даже если пар еще не вышел из состояния насыщенного, а для расчетов по тепловой энергии наоборот, продавцу невыгодно считать насыщенный пар водой, хотя он, возможно, еще не вышел из состояния насыщения. Конечное заключение о том, что выгодно той или иной стороне коммерческих отношений, сделаем в дальнейшем с учетом сравнительной цены массы теплоносителя и тепловой энергии.

В тепловычислителе применяют алгоритмы вычисления массы и тепловой энергии сухого насыщенного пара, например, по [7] или [1]. Когда из-за погрешностей измерений температуры и давления пар определяется как перегретый, его масса фактически всегда больше результатов измерений, в то время как фактическая тепловая энергия всегда меньше.

При настройке тепловычислителя точно на линию насыщения для определения фазового состояния насыщенного пара как перегретого, результаты измерений массы пара будут занижены, и потери понесет продавец. Относительные потери вычисляют как $\rho'(t_{\text{нс}})/\rho''(t_{\text{нс}})$, где $t_{\text{нс}}$ — температура насыщенного пара. Зависимость этого отношения от температуры показана в табл. 4, где $\xi = 5\rho'/\rho'' - h''/h'$.

Таблица 4

Зависимость отношений плотности ρ'/ρ'' и энтальпии h''/h' (вода/пар) на линии насыщения от температуры

$t_{\text{нс}}, ^\circ\text{C}$	ρ'/ρ''	h''/h'	ξ
100	1131	6,38	56500
150	352	4,34	1760
200	100	3,28	416
250	41,3	2,58	204
300	15,3	2,04	74

В случае определения насыщенного пара как перегретого, результаты измерений тепловой энергии будут завышены, и потери, правда небольшие, потерпит покупатель. Относительные потери продавца по тепловой энергии при определении насыщенного пара как воды зависят от отношения энтальпии пара h'' к энтальпии воды h' на линии насыщения (см. табл. 4).

Если учесть, что горячая вода стоит дороже холодной примерно в 5 раз, отношение потерь покупателя (выигрыша продавца) ξ при ошибочном определении состояния пара как воды в жидком состоянии в зависимости от результата измерения температуры приблизительно отражают цифры из последнего столбца табл. 4.

Таким образом, если состояние пара вычисляется по температуре и давлению, то при его ошибочном определении как воды в жидком состоянии покупатель будет всегда терпеть потери, теоретически даже при очень малых погрешностях измерений температуры и давления. Эти потери резко возрастают с понижением температуры. Поэтому покупатель должен быть заинтересован в повышении точности определения фазового состояния пара.

Тепловычислитель находит состояние насыщенного пара по функциональной зависимости $p(t)$ или обратной зависимости $t(p)$, которую задают таблицей или аналитическим выражением [7]. Ошибка определения насыщенного состояния пара по температуре произойдет при условии независимости погрешностей измерений температуры и давления пара при следующем пределе погрешности измерения температуры:

$$\delta_{t_{HC}} = \pm (\delta_t^2 + \vartheta_{t|p}^2(p, 1)^2 \delta_p^2)^{1/2},$$

где δ_t — относительная погрешность измерения температуры; $\vartheta_{t|p}(p)$ — коэффициент влияния абсолютного давления насыщения на температуру на линии насыщения пара; δ_p — относительная погрешность измерения абсолютного давления пара; аргумент «1» коэффициента влияния означает, что $\varphi = 1$, т. е. насыщенный пар сухой.

Для снижения влияния ошибочного определения состояния насыщения в некоторых тепловычислителях при измерении расхода и тепловой энергии пара, который считается насыщенным, устанавливается зона нечувствительности по температуре или давлению, так что решение о переходе из насыщенного в состояние перегретого пара или воды тепловычислитель принимает только в случае выхода результатов измерений температуры и давления за пределы этой зоны [8].

Если покупатель имеет возможность настроить тепловычислитель только в своих интересах, достаточно ввести поправку в результат измерения температуры со знаком плюс:

$$\Delta_{st} = \delta_{t_{HC}} t. \quad (9)$$

Эта поправка с той же вероятностью, с какой известны неопределенность или предел погрешности измерения величины $\delta_{t_{HC}}$, гарантирует, что возможная положительная погрешность измерения температуры пара или отрицательная погрешность измерения давления не приведет к ошибочной оценке состояния насыщенного пара как перегретого.

Если же обе стороны коммерческих отношений хорошо осведомлены о том, что настройка температуры в середине

зоны нечувствительности относительно температуры насыщения оказывает существенное влияние на интересы обеих сторон, то для такой ситуации можно предложить «справедливую» настройку тепловычислителя, при которой вероятность потерь обеих сторон будет одинакова. Для этого надо либо расширить зону нечувствительности, что естественно приведет к росту погрешностей измерений тепловой энергии и массы пара, либо сдвинуть середину зоны нечувствительности вниз по шкале температуры на некоторую величину $\Delta_{st'}$ отличную от (9). Второе решение представляется лучшим.

Пусть δ_t обозначает неисключенную систематическую составляющую относительной погрешности измерения температуры, а фазовое состояние пара тепловычислитель определяет по измеренным значениям температуры и давления. Если исходить из равной вероятности положительной и отрицательной неисключенной погрешностей измерений температуры δ_t и пренебречь, как менее значительной, стоимостью тепловой энергии за половину некоторого интервала времени τ при положительном знаке δ_t , потери продавца составят

$$S_1 = 0,5\tau QC_Q \vartheta_{Qt}''(t, 1) \delta_t,$$

где Q — тепловая энергия в гигакалориях, отданная за интервал τ ; C_Q — цена гигакалории; $\vartheta_{Qt}''(t, 1)$ — коэффициент влияния температуры на погрешность измерения тепловой энергии перегретого пара вблизи линии насыщения.

Потери покупателя по массе за тот же интервал τ составят

$$S_2 = 0,5\tau MC_M \vartheta_{\rho|t}(t, 1) \delta_t,$$

где M — масса в тоннах, отданная за интервал τ ; C_M — цена тонны воды; $\vartheta_{\rho|t}(t, \varphi)$ — коэффициент влияния степени сухости φ на погрешность измерения плотности насыщенного пара.

Справедливое решение, при котором потери обеих сторон коммерческих отношений были бы одинаковы, заключается в равенстве $S_1 = S_2$.

Если потребителю, переплачивающему за насыщенный пар при отсутствии коррекции на «справедливость», не удастся договориться с поставщиком о сдвиге измеряемой теплотсчетом температуры при определении состояния насыщения пара, то, для того чтобы буквально соблюсти требование [3] о пределе относительной погрешности измерений массы воды, равной $\pm 2\%$, и вместе с тем избежать затрат на повышенную точность измерений температуры и давления, потребителю в договоре на поставку пара следует оговорить фиксацию степени сухости и ее относительной погрешности (неопределенности).

Пример расчета погрешностей измерений массы и тепловой энергии. Приведем пример использования полученных результатов при проектировании узла учета влажного насыщенного пара.

Относительная погрешность измерения массы пара

$$\delta_M = \pm [\delta_V^2 + \vartheta_{\rho|t}^2(t, \varphi) \delta_t^2 + \vartheta_{\rho|\varphi}^2(t, \varphi) \delta_\varphi^2]^{1/2}, \quad (10)$$

где δ_V , δ_φ — относительные погрешности объемного расхода и оценки степени сухости пара.

Исходные данные для расчета следующие: $\delta_V = \pm 1\%$; $\delta_t = \pm 100 (0,3/t + 0,005) = 0,65\%$; $t = 200\text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi = 0,9$; $\delta_\varphi = \pm 2\%$.

По табл. 1 находим $\vartheta_{\rho|t}(t, \varphi) = \vartheta_{\rho|t}(200; 0,9) = 4,02$. По табл. 2 $\vartheta_{\rho|\varphi}(t, \varphi) = \vartheta_{\rho|\varphi}(200; 0,9) = 0,99$. Подставив все значения в (10), получим $\delta_M = \pm 4,5\%$. Таким образом, требование [3] о равенстве $\delta_M = \pm 3\%$ удовлетворено не будет. Относительная погрешность измерения тепловой энергии пара составит

$$\delta_Q = \pm \left[\vartheta_{Q|t}^2(t, \varphi) \delta_t^2 + \vartheta_{Q|\varphi}^2(t, \varphi) \delta_\varphi^2 \right]^{1/2}. \quad (11)$$

По табл. 1 $\vartheta_{Q|t}(t, \varphi) = \vartheta_{Q|t}(200; 0,9) = 4,34$; по табл. 2 $\vartheta_{Q|\varphi}(t, \varphi) = \vartheta_{Q|\varphi}(200; 0,9) = 1,66$. Подставив эти значения, $\delta_\varphi = \pm 3\%$ в (11), определим относительную погрешность измерений тепловой энергии $\delta_Q = \pm 5,7\%$, что несколько больше ограничения в $\pm 5\%$ на эту величину, установленного в [3].

Удовлетворить требованиям правил учета тепловой энергии и теплоносителя [3] можно, выбрав более точный датчик температуры, например с погрешностью $\pm 0,5\%$. Однако при этом сохраняется проблема оценки степени сухости пара с принятой выше погрешностью $\pm 3\%$.

Выводы. Приведенный выше анализ может найти практическое применение при определении достигаемых погрешностей измерений тепловой энергии и массы насыщенного водяного пара по объемному расходу. Повысить в достаточной степени точность измерений температуры пара не является проблемой. Что касается погрешностей измерений объемного расхода, то получить приемлемую точность здесь можно применением вихревых расходомеров и только в условиях высокой степени сухости, поскольку с ростом влажности пара он становится неоднородной средой [9]. В остальных случаях решающую роль в определении погрешностей измерений тепловой энергии и массы насыщенного

водяного пара по объемному расходу играет погрешность оценки степени сухости пара, чаще всего не измеряемая.

Л и т е р а т у р а

1. ГСССД Р—775—8. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: Изд. МЭИ, 1999.
2. Беляев Б. М., Игнатов В. Н., Шенброт И. М. Расчет погрешности измерений массы перегретого водяного пара и количества теплоты по объемному расходу // Законодательная и прикладная метрология. 2012. № 4. С. 36—40.
3. РД 34.09.102. Правила учета тепловой энергии и теплоносителя.
4. ГОСТ Р 8.740—2011. Расход и количество газа. Методика измерений с помощью турбинных, ротационных и вихревых расходомеров и счетчиков.
5. РМГ 29—99. Метрология. Основные термины и определения.
6. РМГ 43—2001. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений».
7. МИ 2451—98. Паровые системы теплоснабжения. Уравнения измерений тепловой энергии и количества теплоносителя.
8. Т10.06.116 РР. Преобразователь расчетно-измерительный ТЭКОН-19. Алгоритмы расчета. Екатеринбург, 2011.
9. Сычев Г. Измерение расхода влажного пара. [Электрон. ресурс] www.aqua-therm.ru/articles/ (дата обращения 05.05.2009 г.).

Дата принятия 19.06.2013 г.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

53.083.91

Методика и аппаратно-программный комплекс для измерений электрофизических параметров барьерного разряда

О. А. ЕМЕЛЬЯНОВ, М. В. ШЕМЕТ

С.-Петербургский государственный политехнический университет,
С.-Петербург, Россия, e-mail: oaemel2@gmail.com

Разработаны методика и программно-аппаратный комплекс для исследования основных характеристик и особенностей развития барьерного разряда в воздушных субмиллиметровых промежутках при атмосферном давлении. Программное обеспечение предусматривает обработку экспериментальных данных с использованием метода регуляризации Тихонова.

Ключевые слова: барьерный разряд, частичный разряд, поверхностный заряд, емкостный зонд.

The methodology and measuring system have been developed for the study of electrophysical properties of dielectric barrier discharge in submillimeter air gaps at atmospheric pressure. The software applies Tikhonov regularization method for experimental data processing.

Key words: dielectric barrier discharge, partial discharge, surface charge, capacitive probe.

В последнее десятилетие наблюдается увеличение числа исследований барьерного разряда, характеризующегося пробоем газового промежутка (0,1—1 мм), когда, по край-

ней мере, один из электродов покрыт диэлектриком. Барьерный разряд широко используют для получения озона, модификации поверхности материалов, накачки CO₂-лазеров