Обоснование выбора физических параметров влажности газа для дополнения стандартных условий измерения расхода

И. С. КРУК

«Укртрансгаз», Киев, Украина, e-mail: kruk-is@utg.ua

Проведен анализ и дано обоснование выбора параметров влажности газа для дополнения стандартных условий измерений расхода сухого газа.

Ключевые слова: газ, влажность, расход.

The analysis and justification of selection of physical parameters of gas humidity as its quality factors supplementing the standard conditions of the dry gas flow rate measurements are carried out.

Key words: gas, humidity, flow rate.

При измерениях расхода и объема природного газа методом переменного перепада давления со стандартными диафрагмами и счетчиками их значения необходимо приводить к стандартным условиям измерений. Стандартными условиями измерений считаются следующие численные значения физических величин: абсолютного давления $p_c = 0,101325$ МПа и абсолютной температуры $T_c = 293,15$ К, а относительная влажность газа равна нулю или при данном конкретном применении содержание влаги пренебрежимо мало [1, 2]. Анализируя результаты последних исследований в области определения и оценки качественных показателей природного газа, находим убедительное подтверждение, что стандартные условия измерений необходимо дополнить еще и таким значением физической величины, как температура точки росы по влаге t_p . Можно выбрать и другие показатели качества газа, а именно, относительную влажность природного газа φ , %, или объемную долю водяного пара (отношение объема водяного пара, содержащегося в газе, к общему объему этого влажного газа) f , млн⁻¹.

Решением проблемы в техническом аспекте является применение систем автоматизированного проектирования и расчета расходомеров переменного перепада давления, а в правовом поле — межгосударственных стандартов, регламентов, технических соглашений.

Природный газ при измерении расхода должен быть сухим. В новых межгосударственных стандартах [3] отсутствуют технические требования к определению природного газа, принятого в качестве сухого. В контракте между ОАО «Газпром» и НАК «Нафтогаз Украины» о купле-продаже природного газа записано, что «точка росы природного газа по влаге, измеренная при рабочем давлении и пересчитанная к давлению 3,92 МПа (40 кг/см²) для концентрации водяных паров при стандартных условиях не может быть выше минус 8 °С». Однако до сих пор нет нормативного документа, который регламентировал бы обоснованные нормы выбора параметров влажности газа для дополнения стандартных условий при определении расхода сухого природного газа, выполнение которых необходимо для обеспечения надежности и эффективности работы газотранспортных систем. С 1 января 2006 г. единственным нормативным документом

государственного уровня, по которому определяются нормы показателей газа для транспортирования и дальнейшего использования, является межгосударственный стандарт [4]. Необходимо отметить, что технические требования, которые регламентированы этим стандартом, не обеспечивают транспортирование качественного (кондиционного) газа и защиту от коррозии магистральных газопроводов и газотранспортного оборудования.

Согласно международному стандарту [5] природный газ является сухим, если молярная доля водяного пара в газе не превышает 0,00005 млн⁻¹ (0,005 % или 50 ppm). Однако выполнить такое условие при его внедрении экономически нецелесообразно, а поэтому необходимо найти компромисс, при котором соблюдались бы обоснованные технические требования с точки зрения как обеспечения качества газа, так и реально возможных капиталовложений.

Основная задача настоящей работы — проанализировать показатели качества газа и обосновать выбор их значений для дополнения стандартных условий измерений при расчете расхода сухой части влажного природного газа.

Выбор критерия для определения значения показателя качества газа. При проведении оценки достоверности одного из показателей для измерений расхода выбираем значение плотности природного газа ρ_c при стандартных условиях. Ее определяют хроматографическим методом, анализируя взятую из газопровода пробу газа. При подаче пробы газа из баллона на вход хроматографа его пропускают через фильтр, который сорбирует некоторую долю водяных паров, содержащихся в нем. Количественно эту долю не оценивают и не определяют известным лабораторным методом взвешивания. Учитывая, что плотность ρ_c рассчитана с допустимым содержанием водяных паров, ее значение можно принять за действительное, которое будет служить базовым при выборе и обосновании показателя качества газа, а численным значением этого показателя можно дополнить стандартные условия измерений.

Критериями для определения значения показателя качества газа и введения его как параметра в стандартные условия измерений могут служить равновесное состояние газового потока с плотностями соответственно влажного газа

$\rho_{в,г}$ и сухой части газа $\rho_{с,г}$ для получения значений температуры точки росы по влаге при расчете соответственно расходов $Q_{в,г}$ и $Q_{с,г}$; для произвольных значений абсолютного давления газа p и температуры T $\rho_{в,г} = \rho_{с,г}$; для значений абсолютного давления газа $p = p_c = 0,101325$ МПа и абсолютной температуре газа, которая равна соответственно значениям температуры $T = T_c = 293,15$ К (или другим, принятым за T_c значениям температуры, например, 273,15; 288,15 и 285,65 К), $\rho_{в,г} = \rho_{с,г} = \rho_c$.

Проведем расчеты расходов $Q_{с,г}$ и $Q_{в,г}$ при стандартных условиях измерений, а также и значений плотностей соответственно $\rho_{в,г}$ и $\rho_{с,г}$ газа, используя методику обратного перерасчета стандартных диафрагм согласно условиям [3] и системы автоматизированного проектирования расходомеров переменного перепада давлений САПР «Расход—РУ». В качестве исходных данных для расчетов взяты параметры пункта измерений расхода газа на газоизмерительной станции, в частности, диаметр $d_{20} = 240,04$ мм отверстия диафрагмы при температуре 20 °С; внутренний диаметр $D_{20} = 404,50$ мм измерительного трубопровода при температуре 20 °С; перепад $\Delta p = 25$ кПа давлений на диафрагме; плотность $\rho_c = 0,6860$ кг/м³ газа при стандартных условиях изме-

рений; молярные доли компонентов газа — азота $x_{N_2} = 1$ %,

углекислого газа $x_{CO_2} = 0,2$ %.

Относительную влажность природного газа φ определим как отношение плотностей водяных паров в газе $\rho_{п,в}$ и насыщенных водяных паров $\rho_{н,п,в}$ при температуре $T = T_c = 293,15$ К, т. е.

$$\varphi = (\rho_{п,в} / \rho_{н,п,в}) 100. \quad (1)$$

Плотность водяного пара $\rho_{п,в}$ в (1) рассчитаем как разницу соответствующих плотностей

$$\rho_{п,в} = \rho_{в,г} - \rho_{с,г}.$$

Погрешность δ , которая физически характеризует объемную долю водяного пара f , найдем по формуле

$$\delta = ((Q_{в,г} - Q_{с,г}) / Q_{в,г}) 100.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 1—4 (величины $\rho_{в,г}$ и $\rho_{с,г}$ выражены в кг/м³; жирным шрифтом выделены значения параметров при температуре точки росы, равной –8 и –14,5 °С).

Таблица 1

Результаты расчетов расходов газа при $T = T_c = 293,15$ К ($t = 20$ °С) и $p = p_c = 0,101325$ МПа

$Q_{в,г}$ м ³ /ч	$Q_{с,г}$ м ³ /ч	t_p °С	$\rho_{в,г} / \rho_{с,г}$	δ , %	$\rho_{п,в}$ кг/м ³	φ , %	f , млн ⁻¹
26426	26252	0	0,68636 / 0,68183	0,65844	0,00453	26,2	6584
26424	26298	–5	0,68625 / 0,68298	0,47684	0,00327	19,0	4768
26423	26320	–8	0,68620 / 0,68352	0,38981	0,00268	15,5	3898
26423	26332	–10	0,68618 / 0,68383	0,34440	0,00235	13,6	3444
26422	26353	–14	0,68613 / 0,68435	0,26115	0,00178	10,3	2611
26422	26355	–14,5	0,68612 / 0,68441	0,25358	0,00171	9,89	2536
26422	26358	–15	0,68612 / 0,68446	0,24222	0,00166	9,60	2422
26421	26376	–20	0,68608 / 0,68492	0,17032	0,00116	6,71	1703
26420	26399	–30	0,68602 / 0,68549	0,07948	0,00053	3,06	795
26419	26410	–40	0,68600 / 0,68577	0,03407	0,00023	1,33	341
26419	26415	–50	0,68599 / 0,68589	0,01514	0,00010	0,58	151
26419	26418	–60	0,68598 / 0,68595	0,00378	0,00003	0,17	38
26419	26418	–70	0,68598 / 0,68597	0,00757	0,00001	0,058	76
26419	26418	–71	0,68598 / 0,68597	0,00757	0,00001	0,058	76
26419	26419	–72	0,68599 / 0,68598	0	0,00001	0,058	76

Таблица 2

Результаты расчетов расходов газа при $T = 288,15$ К ($t = 15$ °С) и $p_c = 0,101325$ МПа

$Q_{в,г}$ м ³ /ч	$Q_{с,г}$ м ³ /ч	t_p °С	$\rho_{в,г} / \rho_{с,г}$	δ , %	$\rho_{п,в}$ кг/м ³	φ , %	f , млн ⁻¹
26671	26101	20	0,69921 / 0,68426	2,13710	0,01495	86,5	21371
26665	26234	15	0,69891 / 0,68760	1,61635	0,01131	65,4	16163
26660	26337	10	0,69867 / 0,69021	1,21155	0,00846	48,9	12115
26657	26417	5	0,69849 / 0,69221	0,90033	0,00628	36,3	9003

Механические измерения

Окончание таблицы 2

$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	$t_{p'}$ °C	$\rho_{в.г'}/\rho_{с.г}$	δ_i %	$\rho_{п.в'}$ кг/м ³	φ , %	f_i млн ⁻¹
26654	26479	0	0,69835 / 0,69375	0,65656	0,00460	26,6	6566
26652	26525	-5	0,69824 / 0,69491	0,47665	0,00333	19,3	4766
26651	26547	-8	0,69819 / 0,69546	0,39023	0,00273	15,8	3902
26651	26560	-10	0,69817 / 0,69578	0,34145	0,00239	13,8	3414
26650	26581	-14	0,69812 / 0,69631	0,25891	0,00181	10,5	2589
26650	26583	-14,5	0,69811 / 0,69637	0,25358	0,00174	10,1	2536
26650	26585	-15	0,69811 / 0,69642	0,25141	0,00169	9,8	2514
26649	26604	-20	0,69807 / 0,69689	0,16886	0,00118	6,8	1689
26648	26627	-30	0,69801 / 0,69747	0,07880	0,00054	3,1	788
26647	26638	-40	0,69799 / 0,69775	0,03377	0,00024	1,4	338
26647	26643	-50	0,69798 / 0,69788	0,01501	0,00010	0,6	150
26647	26646	-60	0,69797 / 0,69794	0,00375	0,00003	0,2	37
26647	26646	-65	0,69797 / 0,69795	0,00375	0,00002	0,1	37
26647	26647	-70	0,69797 / 0,69796	0	0,00001	0,06	0

Таблица 3

Результаты расчетов расходов газа при $T = 273,15$ К ($t = 0$ °C) и $p_c = 0,101325$ МПа

$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	$t_{p'}$ °C	$\rho_{в.г'}/\rho_{с.г}$	δ_i %	$\rho_{п.в'}$ кг/м ³	φ , %	f_i млн ⁻¹
27382	27050	10	0,73733 / 0,72840	1,21247	0,00893	51,6	12125
27378	27133	5	0,73714 / 0,73053	0,89488	0,00661	38,2	8949
27376	27196	0	0,73700 / 0,73215	0,65751	0,00485	28,0	6575
27374	27243	-5	0,73689 / 0,73337	0,47856	0,00352	20,4	4785
27373	27266	-8	0,73684 / 0,73396	0,39090	0,00288	16,7	3909
27372	27279	-10	0,73681 / 0,73429	0,33976	0,00252	14,6	3398
27371	27300	-14	0,73676 / 0,73485	0,25940	0,00191	11,0	2594
27371	27303	-14,5	0,73675 / 0,73491	0,24844	0,00184	10,6	2484
27371	27305	-15	0,73675 / 0,73497	0,24113	0,00178	10,3	2411
27370	27324	-20	0,73670 / 0,73546	0,16807	0,00124	7,2	1681
27369	27348	-30	0,73665 / 0,73607	0,07673	0,00058	3,3	767
27369	27359	-40	0,73662 / 0,73637	0,03654	0,00025	1,4	365
27369	27365	-50	0,73661 / 0,73651	0,01461	0,00010	0,6	146
27368	27367	-60	0,73660 / 0,73657	0,00365	0,00003	0,2	36
27368	27368	-65	0,73660 / 0,73658	0	0,00002	0,1	0

Таблица 4

Результаты расчетов расходов газа при $T = 285,65$ К ($t = 12,5$ °C) и $p_c = 0,101325$ МПа

$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	$t_{p'}$ °C	$\rho_{в.г'}/\rho_{с.г}$	δ_i %	$\rho_{п.в'}$ кг/м ³	φ , %	f_i млн ⁻¹
26781	26348	15	0,70507 / 0,69366	1,61682	0,01141	66,0	16168
26778	26403	12,5	0,70494 / 0,69506	1,40040	0,00988	57,1	14004
26778	26413	12	0,70492 / 0,69532	1,36306	0,00960	55,5	13631

$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	$t_{р'}$ °С	$\rho_{в.г'}/\rho_{с.г'}$	δ , %	$\rho_{п.в'}$ кг/м ³	φ , %	f , млн ⁻¹
26776	26452	10	0,70483 / 0,69629	1,21004	0,00854	49,4	12100
26773	26532	5	0,70465 / 0,69832	0,90016	0,00633	36,6	9002
26770	26594	0	0,70451 / 0,69987	0,65745	0,00464	26,8	6574
26768	26640	-5	0,70440 / 0,70104	0,47818	0,00336	19,4	4782
26767	26663	-8	0,70435 / 0,70159	0,38854	0,00276	16,0	3885
26767	26675	-10	0,70432 / 0,70191	0,34371	0,00241	13,9	3437
26766	26696	-14	0,70427 / 0,70245	0,26152	0,00182	10,5	2615
26766	26699	-14,5	0,70427 / 0,70250	0,25032	0,00177	10,2	2503
26766	26701	-15	0,70426 / 0,70256	0,24284	0,00170	9,8	2428
26765	26720	-20	0,70422 / 0,70303	0,16813	0,00119	6,9	1681
26764	26743	-30	0,70417 / 0,70362	0,07846	0,00055	3,2	785
26763	26754	-40	0,70414 / 0,70390	0,03363	0,00024	1,4	336
26763	26759	-50	0,70413 / 0,70403	0,01495	0,00010	0,6	149
26763	26762	-60	0,70412 / 0,70409	0,00374	0,00003	0,2	37
26763	26763	-65	0,70412 / 0,70410	0	0,00002	0,1	0

В табл. 5 и 6 приведены расчеты расходов влажного газа и его сухой части для различных значений перепада давлений на диафрагме и температуры точки росы по влаге, равных -8 и -14,5 °С. Погрешности расчета расхода сухой части влажного газа при $t_p = -8$ °С и $T_c = 293,15$ К в среднем составляют 0,01 % (см. табл. 5), при $t_p = -14,5$ °С и той же температуре газа — 0,006 % (см. табл. 6). Значения погрешностей измерений расхода при расчете измерительного комплекса δ_Q для перепадов давлений от 1 до 400 кПа — 1,0 %;

Таблица 5

Результаты расчетов расходов газа при $d_{20} = 240,04$ мм, $D_{20} = 404,50$ мм, $T_c = 293,15$ К, температуре точки росы по влаге $t_p = -8$ °С и различных значениях Δp

Δp , кПа	$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	δ , %	f , млн ⁻¹
2	3	4	5	6
6,3	92649	92640	0,00971	971
10	116684	116673	0,00943	943
16	147522	147508	0,00949	949
20	164881	164865	0,00970	970
25	184269	184252	0,00922	922
30	201773	201754	0,00942	942
35	217852	217831	0,00964	964
40	232801	232780	0,00902	902
45	246828	246804	0,00972	972
50	260080	260055	0,00961	961
55	272660	272634	0,00953	953
63	291635	291608	0,00926	926
101,325	368747	368713	0,00922	922
630	880915	880832	0,00942	942
980	1065967	1065867	0,00939	939

Таблица 6

Результаты расчетов расходов газа при $d_{20} = 240,04$ мм, $D_{20} = 404,50$ мм, $T_c = 293,15$ К, $t_p = -14,5$ °С и различных значениях Δp

Δp , кПа	$Q_{в.г'}$ м ³ /ч	$Q_{с.г'}$ м ³ /ч	δ , %	f , млн ⁻¹
6,3	92649	92644	0,00540	540
10	116684	116677	0,00600	600
16	147522	147514	0,00542	542
20	164881	164871	0,00606	606
25	184269	184258	0,00597	597
30	201773	201761	0,00595	595
35	217852	217839	0,00597	597
40	232802	232788	0,00601	601
45	246828	246813	0,00608	608
50	260080	260064	0,00615	615
55	272660	272644	0,00589	589
63	291636	291618	0,00617	617
101,325	368166	368144	0,00597	597
630	880916	880863	0,00602	602
980	1065969	1065905	0,00600	600

630 кПа — 1,03 % и 980 кПа — 1,16 % в табл. 5 и соответственно 1,06; 1,15; 1,26 % в табл. 6.

Перспективой дальнейших исследований является разработка методики и алгоритмов расчета количества (объема) сухой части влажного природного газа и программного обеспечения для вычислителей и корректоров расхода в составе измерительных комплексов, а также дополнение межгосударственного стандарта [3] разработанной методикой.

Выводы. Стандартные условия измерений необходимо дополнить физической величиной, значение которой характеризует качество (кондиционность) природного газа. Предлагаем при определении расхода к общепринятым абсолютным значениям температуры $T_c = 293,15$ К и давления $p_c = 0,101325$ МПа как дополнение ввести стандартное обозначение температуры точки росы по влаге t_p , ее численное значение $-14,5$ °С приведено и пересчитано к давлению $3,92$ МПа (40 кгс/см²).

Предлагается внести изменения во все действующие стандарты по измерению объема, расхода и количества газа (международные, межгосударственные, национальные, технические условия, регламенты и контракты). Методику выполнения измерений [3] необходимо дополнить разработанной методикой, алгоритмами и программным обеспечением для измерений расхода и расчета количества (объема) сухой части влажного природного газа. Для вычислителей расхода в составе измерительных комплексов необходимо разработать и внедрить программное обеспечение для

расчета количества (объема) сухой части влажного природного газа.

Л и т е р а т у р а

1. **ГОСТ 2939—63.** Газы. Условия определения объема.
2. **РМГ 75—2004.** ГСИ. Измерение влажности веществ. Термины и определения.
3. **Измерение** расхода и количества жидкостей и газов с помощью стандартных сужающих устройств. Сборник национальных стандартов. М.: Стандартинформ, 2007.
4. **ГОСТ 5542—87.** Газ природный горючий для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.
5. **ISO 6976:1995.** Natural gas calculation of calorific value, density, relative density and Wobbe index from composition.

Дата принятия 02.04.2013 г.

621.396.969.14:621.373.8

Доплеровский лидарный профилометр для измерений параметров ветра

**В. Р. АХМЕТЬЯНОВ, Д. Н. ВАСИЛЬЕВ, Д. В. КЛОЧКОВ, М. А. КОНЯЕВ,
М. С. ПЕНКИН, А. Е. ОРЛОВ, Г. А. ПЕТРОВ, З. С. ЦАРЕВ, И. В. ШАТАЛОВ,
И. Ф. ШИРЯЕВ**

НПП «Лазерные системы», Россия, С.-Петербург, e-mail: shatalov@lsystems.ru

Создан доплеровский лидар, позволяющий проводить дистанционные измерения скорости (в диапазоне 0—55 м/с) и направления ветра на заданных высотах (3—300 м), обработку, отображение и передачу полученных данных на компьютер оператора. Лидар предназначен для автономной непрерывной работы в различных климатических условиях. Приведены результаты исследований его технических и метрологических характеристик.

Ключевые слова: скорость ветра, лазер, доплеровский лидар.

The created Dopler lidar allowing to measure distantly the wind speed in the range 0—55 m/s and the wind direction at given heights (3—300 m) and to carry out the data processing, displaying and transmitting of all data to operator's computer is considered. The lidar is intended for autonomous continuous work in different climate conditions. The results of its technical and metrological characteristics studies are given.

Key words: wind speed, laser, dopler lidar.

Оперативные измерения параметров ветра являются необходимым условием метеорологического обеспечения авиационного транспорта, имеют большое значение для мониторинга состояния окружающей природной среды, научных исследований в области гидрометеорологии.

В настоящее время для измерений ветра в атмосфере используют контактные приборы — анемометры, устанавливаемые на специальные метеорологические вышки или высотные строения; радиолокаторы метрового и других диапазонов длин волн; акустические локаторы — содары и радиоакустические системы; оптические локаторы — лидары. Каждое из указанных средств измерений имеет свои ограничения. Так, применение анемометров серьезно затрудняется при обледенении, сильных ветрах или при штиле, а

зона действия анемометров ограничивается высотой вышки, на которой они установлены. Использование акустических средств ветрового зондирования атмосферы обычно ограничено высотами до 700—900 м и затруднено при осадках и высоком уровне естественных шумов. Нижняя граница измерений радиолокаторов, работающих в дециметровом и метровом диапазонах длин волн, начинается от 500—900 м [1].

Для определения параметров ветра в приземном слое широко распространены доплеровские лидары. Их отличительной особенностью является применение лазеров в качестве источников зондирующего излучения. Длина волны излучения лазера доплеровского лидара находится в микрометровом диапазоне, в то время как в радиолокаторах —