

# ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА НА ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ СОРБЦИОННО-ЕМКОСТНЫМИ ДАТЧИКАМИ

УДК 621.317.39.084.2

С.В. Прокопов, к.х.н., ООО НТФ «БАКС» (Самара, РФ),  
proserg87@gmail.com

Л.А. Бабушкин, ООО НТФ «БАКС», babushkin@bacs.ru

Для обеспечения эффективной транспортировки природного газа по магистральным газопроводам при рабочем давлении необходимо иметь надежные данные по температуре точки росы. Применение анализаторов влажности на основе сорбционно-емкостных датчиков представляется перспективным и экономически эффективным решением данной задачи. Однако показания датчиков этого типа существенно зависят от давления анализируемого газа, что затрудняет интерпретацию полученных результатов.

В работе изучено влияние давления газа на результаты измерения температуры точки росы для двух различных моделей сорбционно-емкостных датчиков. Показано, что знак отклонения экспериментальной величины от истинного значения зависит от материала влагочувствительного слоя, а абсолютная величина погрешности растет с повышением давления. Разработан программно-аппаратный способ компенсации погрешности измерений. Предложен метод учета влияния давления газа при использовании сорбционно-емкостных датчиков в составе промышленных газоанализаторов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ТЕМПЕРАТУРА ТОЧКИ РОСЫ, ИЗМЕРЕНИЕ, ДАТЧИК ВЛАЖНОСТИ, ДАВЛЕНИЕ, СОРБЦИОННО-ЕМКОСТНЫЙ МЕТОД.

Контроль температуры точки росы (ТТРв) – залог безаварийной транспортировки природного газа по магистральным газопроводам, которая осуществляется при высоком давлении и зачастую – низких температурах. Такие условия способствуют образованию в трубопроводе жидких (вода, углеводородный конденсат) и твердых (лед, газовые гидраты) отложений. Особую опасность представляет процесс гидратообразования. В присутствии гидратов ускоряется коррозия газопроводов, они могут служить причиной закупорки запорно-регулирующей арматуры и сужения эффективного диаметра трубопроводов, что приводит к необходимости повышения мощности газоперекачивающих агрегатов, возникновению аварийных ситуаций и общему снижению технико-экономической эффективности транспортировки [1, 2].

Гидраты углеводородов представляют собой неустойчивые соединения, в кристаллической форме внешне похожи на снег или лед. Они состоят из одной или нескольких молекул углеводородных производных (метана, пропана, углекислого газа и др.) и воды. Среди факторов, определяющих условия образования гидратов, можно выделить состав газовой фазы, давление, температуру и степень насыщения газа парами  $H_2O$ . Один из основных способов предотвращения гидратообразования в процессе транспортировки – понижение влагосодержания или ТТРв природного газа [3]. Из вышесказанного следует, что ТТРв – один из критических параметров, от которого зависит стабильность и безаварийность транспортировки природного газа, и важно обеспечить ее непрерывный автоматический контроль. Согласно

[4] величина ТТРв не должна превышать  $-10\text{ }^\circ\text{C}$  для районов с умеренным микроклиматом.

Следует подчеркнуть, что ТТРв нужно измерять при рабочем давлении перекачиваемого газа, поскольку при дросселировании газа происходит его охлаждение, что может привести к конденсации жидкой фазы и, как следствие, искажению результатов анализа [1]. Кроме того, если данные получены при отличном от рабочего давления, их необходимо экстраполировать, что неизбежно повышает погрешность расчета итоговых величин [5, 6].

## ОСОБЕННОСТИ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ ТТРв

Среди методов измерения ТТРв природного газа при рабочем давлении наибольшее распространение получили конденсационный и сорбционно-емкостный.

S.V. Prokopov, PhD in chemistry, STF «BACS» LLC (Samara, the Russian Federation), proserg87@gmail.com

L.A. Babushkin, STF «BACS» LLC, babushkin@bacs.ru

### Gas pressure impact on the dew point measurement via sorption capacitive sensors

To ensure efficient transportation of natural gas through main gas pipelines at their working pressure, it is essential to have reliable data on the dew point temperature. Using moisture content analyzers based on sorption capacitive sensors appears to be promising and economically efficient solution for this issue. However, such sensors' readings depend significantly on analyzed gas pressure, which makes it difficult to interpret the data obtained.

The study examines gas pressure impact on dew point measurement results for two different sorption capacitive sensor models. It is shown that deviation sign of the measured value from the true value depends on material used in moisture-sensitive layer, and the absolute error grows with the pressure increase. A hardware-software method is developed to compensate measurement errors. A method is proposed for consideration of gas pressure impact when using sorption capacitive sensors in commercial gas analyzers.

**KEYWORDS:** DEW POINT TEMPERATURE, MEASUREMENT, MOISTURE SENSOR, PRESSURE, SORPTION CAPACITIVE METHOD.



Конденсационный (или метод охлаждаемого зеркала) – это фундаментальный прямой метод измерения, позволяющий получать точные и воспроизводимые результаты; он признан арбитражным [4]. Однако применение конденсационного метода на практике имеет ряд ограничений и недостатков [7], среди которых высокая стоимость, сложность конструкции конденсационных гигрометров и ограниченный диапазон измерения в области низких температур. Эти приборы неселективны к воде, поскольку на охлаждающей поверхности чувствительного элемента анализатора подобного типа в условиях эксплуатации могут формироваться пленки тяжелых углеводородов, газовые гидраты, конденсироваться водно-метанольная смесь, что искажает полученные результаты. Ввиду того, что динамические ха-

рактеристики процесса формирования конденсата на поверхности охлаждаемого зеркала меняются при изменении давления, конденсационные гигрометры весьма чувствительны к давлению пробы. Это может внести неточность в данные по времени фиксации момента образования конденсата и скажется на результате измерения ТТРв.

В свою очередь, анализаторы влажности на базе сорбционно-емкостных датчиков обладают рядом таких эксплуатационных преимуществ [7], как простота конструкции и более низкая цена, широкий диапазон измерения (до  $-120\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 25 МПа), возможность реализации непрерывного режима анализа и малое время отклика, особенно при высокой влажности среды. Полученные с их помощью результаты не искажаются

в присутствии углеводородов, содержащихся в природном газе.

Конденсатор датчиков такого типа образован двумя электродами (один из них газопроницаем), между которыми заключен влагочувствительный диэлектрический слой. Принцип их действия основан на изменении емкости (или импеданса) конденсатора в результате смещения равновесия «водяной пар – адсорбированная вода» при изменении парциального давления  $\text{H}_2\text{O}$ , что позволяет построить градуировочную зависимость в различных единицах влажности газа (ТТРв, концентрация влаги, относительная влажность и т.д.) [8].

Таким образом, применение сравнительно простых и распространенных датчиков сорбционно-емкостного типа для контроля ТТРв газовых сред, в частности –

Таблица 1. Результаты исследований для датчиков отечественного производства  
Table 1. Research results for domestic-made sensors: DPTw – dew point temperature

$\Delta T_{dp}, ^\circ\text{C}$		Датчик № 1 Sensor No. 1				Датчик № 2 Sensor No. 2			
		Давление анализируемого газа, МПа Analyzed gas pressure, MPa							
		0,1	2,0	4,0	10,0	0,1	2,0	4,0	10,0
$T_{dp}, ^\circ\text{C}$	-30	0,00	0,88	2,21	3,38	0,00	1,33	2,35	3,68
	-20	0,00	0,60	1,50	2,98	0,00	1,20	1,80	2,88
	-10	0,00	0,33	2,18	3,09	0,00	0,72	1,48	2,59
	0	0,00	0,31	2,00	3,40	0,00	0,61	1,27	2,70
	10	0,00	0,31	1,22	3,32	0,00	0,81	1,46	3,02

Таблица 2. Результаты исследований для датчиков зарубежного производства  
Table 2. Research results for foreign-made sensors

$\Delta T_{dp}, ^\circ\text{C}$		Датчик № 1 Sensor No. 1				Датчик № 2 Sensor No. 2			
		Давление анализируемого газа, МПа Analyzed gas pressure, MPa							
		0,1	2,0	4,0	10,0	0,1	2,0	4,0	10,0
$T_{dp}, ^\circ\text{C}$	-30	0,00	-0,63	-1,40	-3,05	0,00	-0,99	-2,20	-3,80
	-20	0,00	-0,54	-1,20	-2,60	0,00	-0,66	-1,47	-2,97
	-10	0,00	-0,61	-1,35	-2,30	0,00	-0,77	-1,72	-3,12
	0	0,00	-0,29	-0,65	-1,90	0,00	-0,45	-1,00	-2,30
	10	0,00	-0,18	-0,40	-0,80	0,00	0,01	0,02	-1,18

природного газа, при рабочем давлении представляется весьма перспективным и экономически оправданным методом.

#### ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПОКАЗАНИЯ СОРБЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ ДАТЧИКОВ ВЛАЖНОСТИ

Опыт работы автора статьи с оборудованием разных производителей, а также результаты исследования [9] свидетельствуют о том, что на показания сорбционно-емкостных датчиков влияет давление газа. Этот факт значительно ограничивает повсеместное применение приборов такого типа, однако в технической и эксплуатационной документации производителей он, как правило, опущен. Более того, в некоторых опубликованных изготовителями материалах прямо отрицается наличие подобного влияния [8].

В литературе встречаются единичные публикации, посвященные исследованию данной проблемы [9]. Вопрос осложняется тем, что в комплектацию большинства простых сорбционно-емкостных газоанализаторов не входят датчики давления и отсутствует техническая возможность учесть рассматриваемую зависимость.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния давления анализируемого влажного газа на метрологические характеристики датчиков влажности сорбционно-емкостного типа, а также разработка программно-аппаратного способа компенсации обнаруженного влияния. При этом интерпретация физико-химического механизма данного явления, безусловно, представляющего фундаментальный интерес, в рамках проделанной работы не проводилась.

#### МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Влияние давления анализируемого влажного газа на метрологические характеристики анализаторов изучали в Восточно-Сибирском филиале ФГУП «ВНИИФТРИ» с использованием Государственного первичного эталона единиц относительной влажности газов, молярной (объемной) доли влаги, температуры точки росы/инея «ГЭТ 151-2014» и двух анализаторов в качестве компараторов. В тестах при атмосферном давлении в качестве компаратора применяли прецизионный лабораторный анализатор влажности S8000RS производства Michell Instruments Ltd, при высоком давлении – анализатор точки росы Hygrovision VL производства ООО НПО «Вымпел».

Источником влажного газа служил генератор высокого давления «МСВД-1», работающий на методе смешения потоков сухого и влаж-

ного газа. Генератор был оснащен дополнительным внешним осушителем и второй ступенью смешивания для удобства и точности регулировки влажности. Газовая схема состояла из двух параллельных ветвей. В первую включили компаратор, во вторую – соединенные последовательно тестируемые датчики. Необходимое давление и расход газа в ветвях газовой схемы обеспечили установленными редукторами и ротаметрами. В опытах при атмосферном давлении в газовую схему включали оба компаратора. В качестве газа-разбавителя использовали азот ос. ч. 1-го сорта [10].

Измерения проводили на сорбционно-емкостных датчиках двух изготовителей – отечественного и зарубежного (от каждого по два экземпляра). Все датчики прошли испытания в составе газоанализаторов серии «ГироСкан» производства ООО НТФ «БАКС».

В ходе исследования оценивали обусловленную влиянием давления величину дополнительной погрешности измерения для различных значений ТТРв и давления анализируемого газа по формуле:

$$\Delta T_{dp} = (T_{dp, Pa}^{изм} - T_{dp, Pa}^{ист}) - (T_{dp, Pизб}^{изм} - T_{dp, Pизб}^{ист}),$$

где  $\Delta T_{dp}$  – погрешность измеренной величины ТТРв;  $T_{dp, Pa}^{изм}$ ,  $T_{dp, Pa}^{ист}$  – измеренное и истинное значение ТТРв при давлении анализируемого газа, близком к атмосферному;  $T_{dp, Pизб}^{изм}$ ,  $T_{dp, Pизб}^{ист}$  – измеренное и истинное значение ТТРв при избыточном давлении анализируемого газа. Такая методика расчета позволяет исключить вклад систематической ошибки и определить непосредственное влияние давления анализируемого газа на результаты. За истинное значение ТТРв приняли величину, полученную с помощью контрольного гигрометра – компаратора. Тесты проводили в диапазоне значений ТТРв от  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давления анализируемого газа от 0,1 МПа до 10 МПа.

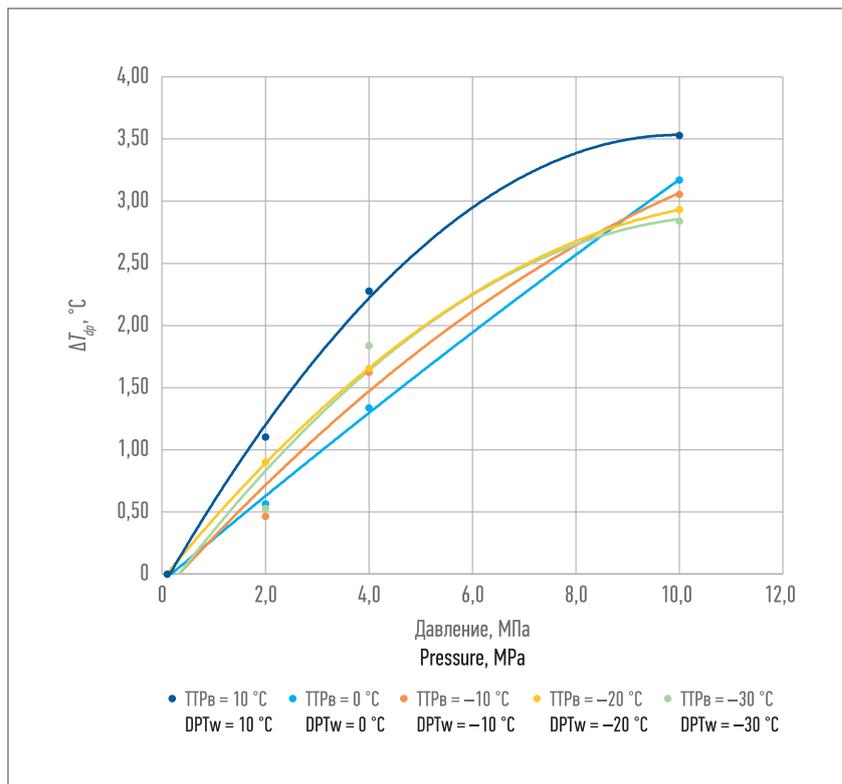


Рис. 1. Зависимость погрешности измерения ТТРв от давления для датчиков отечественного производства  
Fig. 1. Dependence of DPTw measurement error on pressure for domestic-made sensors

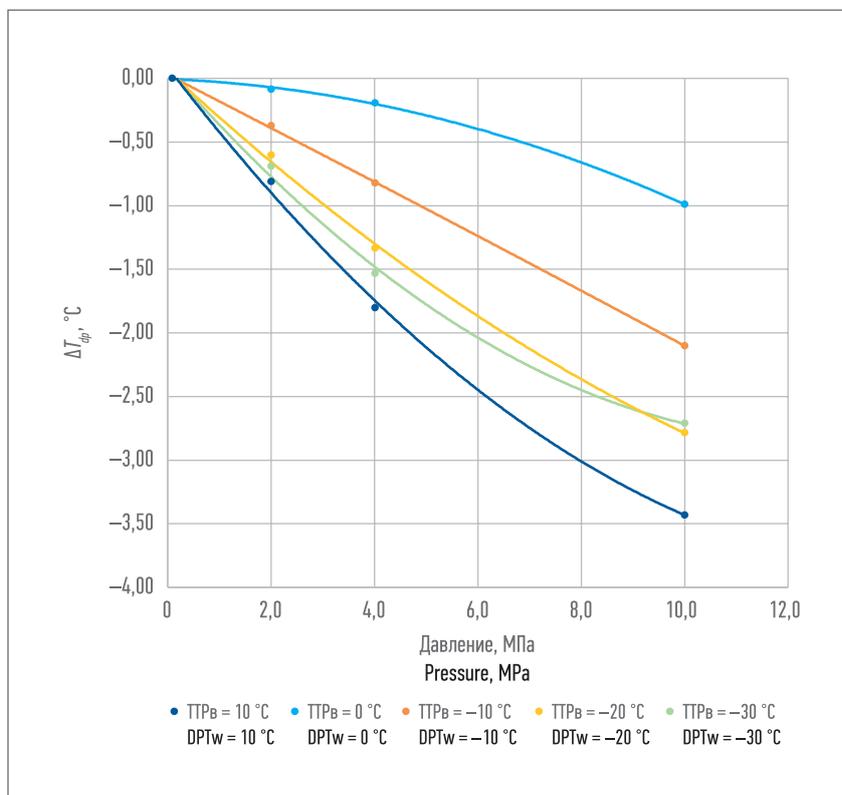


Рис. 2. Зависимость погрешности измерения ТТРв от давления для датчиков зарубежного производства  
Fig. 2. Dependence of DPTw measurement error on pressure for foreign-made sensors

Таблица 3. Оценка достоверности аппроксимации зависимостей  $T_{dp}$ , °C, от давления  
Table 3. Assessment of the approximation credibility of  $T_{dp}$ , °C, dependence on pressure

$T_{dp}$ , °C	Датчики отечественного производства Domestic-made sensors		Датчики импортного производства Foreign-made sensors	
	$f(x)$	$R^2$	$f(x)$	$R^2$
-30	$-0,0364x^2 + 0,728x - 0,1111$	0,998	$0,0177x^2 - 0,5288x + 0,089$	0,9981
-20	$-0,0214x^2 + 0,5117x - 0,0471$	1,000	$0,0091x^2 - 0,3762x + 0,0604$	0,9989
-10	$-0,0252x^2 + 0,5555x - 0,1806$	0,9704	$0,0184x^2 - 0,4634x + 0,0806$	0,9973
0	$-0,0139x^2 + 0,4611x - 0,1509$	0,9816	$-0,0004x^2 - 0,2086x + 0,0287$	0,9998
10	$-0,0027x^2 + 0,3505x - 0,0629$	0,9987	$-0,0083x^2 - 0,0158x - 0,0049$	0,9994

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные экспериментальные данные (табл. 1, 2, рис. 1, 2) доказывают существующую зависимость показаний приборов от давления, причем с ростом давления абсолютное значение погрешности увеличивается (графики построены по усредненным значениям, полученным с двух датчиков от каждого производителя).

Для датчиков разных производителей характерно различное поведение при изменении давления. Датчики отечественного производства имеют ярко выраженную тенденцию к занижению результатов измерения при увеличении давления (датчики показывают более отрицательные значения ТТРв, чем ее истинное значение при положительной величине  $\Delta T_{dp}$ ). В то же время датчики зарубежного производства завышают показания ТТРв по мере роста давления анализируемого газа. При этом различие между погрешностью измерения ТТРв для датчиков от одного производителя не превышает 1 °C в одних и тех же точках. Следовательно, наблюдаемые различия носят систематический характер и могут рассматриваться как условно-постоянные для датчиков одного производителя, по крайней мере, в рамках одной партии. Подобная закономерность была выявлена и авторами работы [9]. Вероятная причина установленного эмпирического факта – различие материалов влажочувствительного слоя, применяемых разными про-

изводителями. От них в том числе зависят параметры сорбционного равновесия для молекул воды в условиях повышенного давления.

Как видно из приведенных графиков, зависимость дополнительной погрешности от величины давления анализируемого газа для исследованных датчиков можно аппроксимировать параболической функцией. Уравнения соответствующих функций  $f(x)$  вида  $y = ax^2 + bx + c$  и значения коэффициентов корреляции  $R^2$ , отражающих степень достоверности аппроксимации, приведены в табл. 3. Статистическая обработка проводилась средствами MS Excel. Закономерности между величиной дополнительной погрешности и измеренным значением ТТРв при постоянном давлении не обнаружено. В ряде случаев с ростом ТТРв величина погрешности при одном и том же давлении уменьшается (что в большей мере характерно для датчиков зарубежного производства), но иногда она возрастает или меняется немонотонно. В связи с этим для получения полной картины зависимости результатов измерения конкретных датчиков влажности от давления требуется набор экспериментальных данных во всем диапазоне измерения ТТРв.

## УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ДАВЛЕНИЯ НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТТРв

Как было показано выше, давление анализируемого газа может вносить существенную погрешность в результаты измерения ТТРв дат-

чиками влажности сорбционно-емкостного типа. Для исследованных датчиков абсолютное значение этой погрешности достигает величины 1,5–2 °C уже при давлении 4 МПа и доходит почти до 4 °C при давлении 10 МПа. Этот факт необходимо учитывать для обеспечения заявленных метрологических характеристик датчиков при измерении ТТРв газа, транспортируемого по магистральным трубопроводам при его рабочем давлении 5–9 МПа. Проблема усугубляется при необходимости измерения ТТРв газа, находящегося под более высоким давлением, например – компримированного природного газа на автомобильных газонаполнительных компрессорных станциях (20–25 МПа) или газа, транспортируемого по подводным трубопроводам (до 22 МПа), поскольку, в соответствии с результатами настоящей работы, с увеличением давления дополнительная погрешность измерения возрастает. Для учета указанного влияния необходимо массив экспериментальных данных в широком диапазоне значений ТТРв и давлений и техническая возможность измерения актуального давления газа в процессе тестов. Используемые в работе анализаторы оснащены встроенными датчиками давления, позволяющими осуществлять такой учет.

По полученным экспериментальным точкам построена и введена в память анализатора градуировочная шкала, позволяющая приводить измеренные значе-

ния ТТРв к истинным в изученном диапазоне давлений. Разработан алгоритм определения поправочных коэффициентов на основе кусочно-линейной интерполяции, позволяющий вычислить значение поправочного коэффициента на основании измеренных значений ТТРв и давления анализируемого газа.

Таким образом, полученные в ходе исследования экспериментальные данные и разработанные на их основе алгоритмы позволяют осуществлять корректировку показаний по ТТРв в зависимости от давления в процессе измерения в автоматическом режиме, благодаря чему обеспечивается стабильность их метрологических характеристик во всем диапазоне измерения ТТРв и давлений анализируемого газа.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проделанной работы была исследована зависимость показаний датчиков влажности сорбционно-емкостного типа двух производителей от давления анализируемого газа. Обнаружено су-



щественное влияние давления на результаты измерения ТТРв. Выявленный тренд отличается для датчиков разных изготовителей, но воспроизводится для разных экземпляров однотипных датчиков.

Установлено, что значение дополнительной погрешности измерения ТТРв возрастает при увеличении давления анализируемого газа, и эту зависимость можно аппроксимировать параболической функцией. Величина дополнительной погрешности достигает

2 °С при давлении 4 МПа и почти 4 °С при давлении 10 МПа.

Из полученных данных следует, что учет влияния давления анализируемого газа на результаты измерения необходим для осуществления контроля ТТРв сорбционно-емкостными датчиками при рабочем давлении газа с приемлемым уровнем точности.

В ходе проделанной работы были разработаны алгоритмы коррекции показаний исследованных анализаторов, оснащенных встроенными датчиками давления, основанные на методе кусочно-линейной интерполяции экспериментально определенных поправочных коэффициентов с учетом измеренных значений ТТРв и давления. Такой подход позволяет нивелировать влияние давления анализируемого газа на результаты измерения в исследованном диапазоне и проводить непрерывный автоматический контроль ТТРв газовых сред при рабочем давлении с сохранением заявленных метрологических характеристик анализаторов. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Мурин В.И., Клишин Г.С. Метрологическое обеспечение измерения влажности природного газа. М.: 000 «ИРЦ Газпром», 1998. 23 с.
2. Москалев И.Н., Битюков В.С., Филоненко А.С. и др. Влажность природного газа: состояние и проблемы. М.: 000 «ИРЦ Газпром», 1999. 36 с.
3. Катаев К.А. Гидратообразование в трубопроводах природного газа // Материалы всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии – нефтегазовому региону». Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2011. С. 69–71.
4. СТО Газпром 089–2010. Газ горючий природный, поставляемый и транспортируемый по магистральным газопроводам [Электронный ресурс]. Режим доступа: ограниченный.
5. ГОСТ Р 53763–2009. Газы горючие природные. Определение температуры точки росы по воде [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53763-2009> (дата обращения: 09.09.2019).
6. ISO 18453:2004. Natural Gas – Correlation between Water Content and Water Dew Point [Электронный ресурс]. Режим доступа: ограниченный.
7. McKeogh G. Moisture Measurement Technologies for Natural Gas. Whitepaper / Billerica, MA: GE Measurement & Control, 2000. 12 p.
8. Коласс Р., Паркер К. Измерение влажности природного газа [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://gazanaliz.ru/articles/Michell\\_Instruments\\_2003/Michell\\_Instruments.html](http://gazanaliz.ru/articles/Michell_Instruments_2003/Michell_Instruments.html) (дата обращения: 09.09.2019).
9. Крюков А.В., Куриленок К.В. Измерение влажности при высоких давлениях // Измерительная техника. 2008. № 2. С. 61–63.
10. ГОСТ 9293–74. Азот газообразный и жидкий [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/gost-9293-74> (дата обращения: 09.09.2019).

#### REFERENCES

- (1) Murin VI, Klishin GS. *Metrological Support of Natural Gas Moisture Measurement*. Moscow: IRTs Gazprom LLC; 1998. (In Russian)
- (2) Moskaev IN, Bitjukov VS, Filonenko AS, et al. *Watercut Log of Natural Gas. State and Problems*. Moscow: IRTs Gazprom LLC; 1999. (In Russian)
- (3) Katayev KA. Hydrate formation in natural gas pipelines. In: *Proceedings of all-Russian scientific and practical conference «New Technologies for Oil and Gas Region»*. Tyumen: Tyumen Industrial University; 2011. p. 69–71. (In Russian)
- (4) Gazprom PJSC. *Company Standard STO 089–2010. Natural fuel gas fed to main pipes and transmitted through them*. [Access restricted]. (In Russian)
- (5) Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (Rosstandart). *State Standard GOST R 53763–2009. Combustible natural gas. Determination of water dew point temperature*. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/gost-r-53763-2009> [Accessed: 9th September 2019]. (In Russian)
- (6) International Organization for Standardization. ISO 18453:2004. *Natural Gas – Correlation between Water Content and Water Dew Point*. [Access restricted].
- (7) McKeogh G. *Moisture Measurement Technologies for Natural Gas. Whitepaper*. Billerica, MA, USA: GE Measurement & Control; 2000.
- (8) Kolass R, Parker K. *Moisture measurement in natural gas*. Available from: [http://gazanaliz.ru/articles/Michell\\_Instruments\\_2003/Michell\\_Instruments.html](http://gazanaliz.ru/articles/Michell_Instruments_2003/Michell_Instruments.html) [Accessed: 9th September 2019]. (In Russian)
- (9) Kryukov AV, Kurilenok KV. The measurement of humidity at high pressures. *Measurement Techniques = Izmeritel'naya Tekhnika*. 2008; 2: 61–63. (In Russian)
- (10) Federal Agency on Technical Regulating and Metrology (Rosstandart). *State standard GOST 9293–74. Gaseous and liquid nitrogen. Specifications*. Available from: <http://docs.cntd.ru/document/gost-9293-74> [Accessed: 9th September 2019]. (In Russian)