

European Commission
TEMPUS

Scientific support of the new method of determination of the natural gas combustion heat is considered. The developed method is realized in the experimental installation which passed industrial testing.

И. Я. ДАРВАЙ, М. О. КАРПАШ, И. В. РЫБИЦКИЙ, Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа

УДК 620.93

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПРИРОДНОГО ГАЗА – НОВОЕ РЕШЕНИЕ

Вопрос качества природного газа является актуальным как для коммунально-бытовых его потребителей, так и для промышленных предприятий, в которых газ используется в технологических процессах (металлургия) и как сырье (химическая промышленность).

Определение качества природного газа как приоритетного энергетического ресурса для Украины может быть отнесено к вопросу энергетической безопасности, учитывая его ограниченные запасы в Украине и динамику постоянного роста цены на природный газ. Так, начиная с 1999 г., цена на природный газ выросла в среднем в 3 раза для населения и в 10 раз для предприятий [1].

Количество теплоты, выделяющейся при сгорании природного газа (теплота сгорания природного газа ТСПГ), считается основным показателем качества природного газа, показателем его назначения.

В соответствии с требованиями ISO 15112:2011 [2] ТСПГ можно определять с помощью аппаратуры, содержащей систему отбора проб и измерительного устройства, которая может принадлежать к одной из групп:

- прямые измерения (например, с помощью калориметра);
- косвенные измерения (например, газовым хроматографом);
- корреляционные методы.

Ранее разработан новый метод определения теплоты сгорания природного газа и разработана экспериментальная установка [3].

Целью статьи является проведение экспериментальной проверки предлагаемого метода и его промышленная апробация в технологических условиях.

Для решения описанных выше проблем был разработан и теоретически обоснован новый ме-

тод определения теплоты сгорания природного газа [4, 5], который заключается в совместном измерении скорости распространения ультразвука в газе, содержания диоксида углерода и использования искусственных нейронных сетей в качестве нелинейного аппроксиматора теплоты сгорания как функции указанного комплекса параметров. Эти информативные параметры были отобраны с помощью корреляционного анализа теплоты сгорания природного газа с рядом стандартизированных физико-химических параметров природного газа: содержания углеводородов (метан, этан, пропан, бутан и высших углеводородов), плотности, молярной массы, скорости распространения ультразвука в газе, содержания диоксида углерода и содержания азота [5].

Адекватность нового экспресс-метода определения теплоты сгорания газа была проверена с помощью искусственной нейронной сети (ИНС) по справочным значениям физико-химических параметров газа [6] и реальным значениям параметров природного газа из сертификатов качества на природный газ, которые определены на одном из предприятий Ивано-Франковской области [7].

Суть экспериментальных исследований заключалась в том, что одновременно с газовой сети отбирали две одинаковые пробы газа. В дальнейшем одну из проб анализировали с помощью специально разработанной экспериментальной установки для определения теплоты сгорания предлагаемым методом. Другую пробу газа помещали в серийный хроматограф типа ЛХМ (зав. № 3875) для стандартного измерения компонентного состава и расчета теплоты сгорания природного газа [8]. После проведения указанных выше исследований их результаты сравнивали. Для уменьшения влияния температуры окружающей среды на результа-

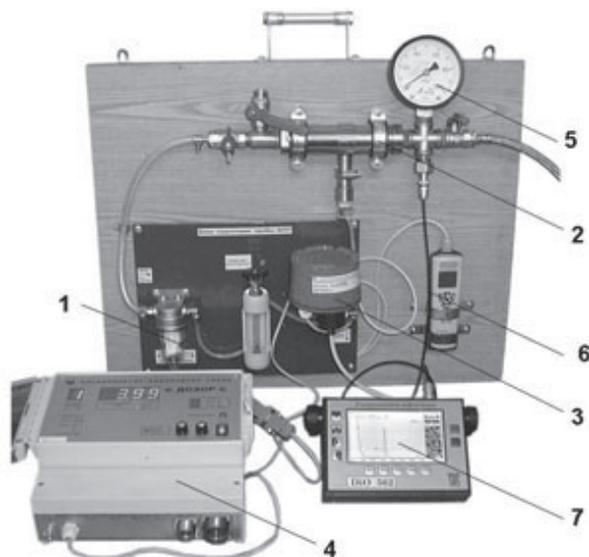


Рис. 1. Экспериментальная установка для определения теплоты сгорания природного газа: 1 – блок подготовки газа; 2 – блок определения скорости звука в газе; 3 – датчик концентрации CO₂ в природном газе; 4 – анализатор газа; 5 – манометр; 6 – термогигрометр; 7 – ультразвуковой дефектоскоп

ты измерений исследования проводили практически одновременно в одном помещении.

Экспериментальная установка для определения теплоты сгорания газа состоит из следующих основных узлов (рис. 1): блока подготовки газа 1, в состав которого входят влагоотделитель и рота-

метрическая трубка, предназначенные для очистки пробы от пыли и влаги; сенсора определения скорости распространения звука в газе 2; блока измерения концентрации CO₂ в природном газе, который состоит из серийного датчика диоксида углерода 3 типа ИП-CO₂ (зав. № 1/3002) и анализатора газа 4 «ДОЗОР-С» (зав. № 3002).

Особый интерес представляет специально спроектированный и изготовленный блок определения скорости распространения звука в газе 2 (рис. 2, 3). Блок представляет собой герметичную конструкцию из нержавеющей стали цилиндрической формы, в которую подается газ. В блоке установлен ультразвуковой первичный преобразователь собственного изготовления с частотой до 1 МГц, который работает в совмещенном режиме как излучатель-приемник. На расстоянии 57,7 мм, рассчитанном из условия получения максимального значения энергии отраженного сигнала и четко идентифицируемого, расположен отражатель, изготовленный из нержавеющей стали диаметром 22 мм и шероховатостью поверхности Rz = 20.

Также в установку входят манометр 5 типа МТ-2Н (ТУ У 33.2-33884768.001-2006), термогигрометр 6 типа OVT-7302 (сер. № 08082341), ультразвуковой дефектоскоп 7 типа DIO 562 (зав. № 138).

Технология определения теплоты сгорания природного газа на экспериментальной установке

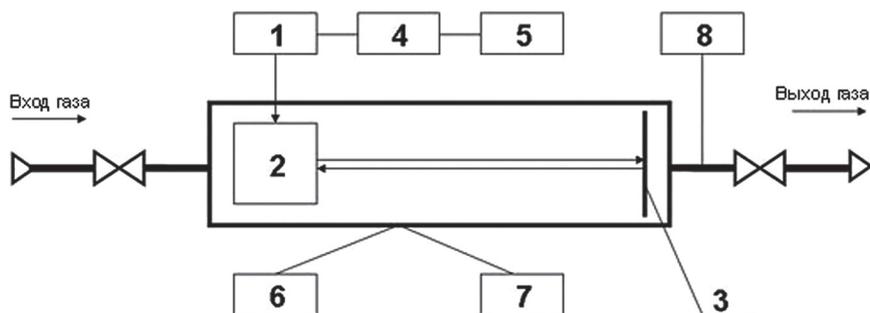


Рис. 2. Функциональная схема блока определения скорости звука в газе: 1 – генераторный приемный тракт; 2 – первичный преобразователь ультразвука; 3 – отражатель; 4 – устройство обработки результатов; 5 – устройство вывода результатов; 6 – датчик влажности; 7 – датчик температуры; 8 – датчик давления

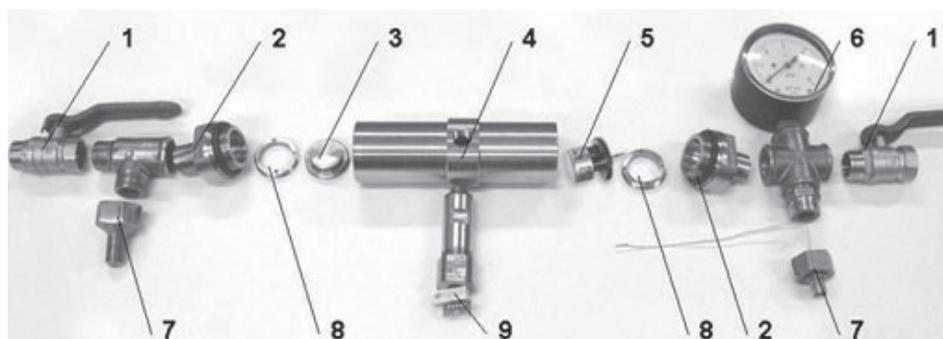


Рис. 3. Блок определения скорости распространения звука в газе: 1 – кран; 2 – фитинг; 3 – отражатель; 4 – измерительная камера; 5 – пьезоэлектрический ультразвуковой преобразователь; 6 – манометр; 7 – разъем; 8 – фиксирующая шайба; 9 – датчик температуры и влажности

состоит в следующем. Проба газа поступает в измерительную камеру 2, в которой определяется скорость распространения звука. Для измерения содержания диоксида углерода в природном газе пробу газа необходимо дополнительно очистить от механических примесей и осушить с помощью блока подготовки пробы. Содержание диоксида углерода определяется в блоке определения содержания диоксида углерода 3, 4. Также измеряются давление, температура и влажность пробы газа.

Для экспериментального исследования нового метода определения теплоты сгорания отобрано 20 образцов природного газа. С помощью экспериментальной установки измерены информативные параметры: скорость распространения ультразвука в газе и содержание диоксида углерода. В табл. 1 приведены результаты определения информативных параметров. Теплота сгорания природного газа была определена с помощью хроматографа ЛХМ-80 на базе Ивано-Франковского национального технического университета нефти и газа.

Таблица 1. Результаты измерения информативных параметров

| Номер пробы | Скорость распространения звука в газе, м/с | Содержание диоксида углерода, % | Теплота сгорания газа, ккал/м ³ |
|-------------|--|---------------------------------|--|
| 1 | 398,95 | 0,59 | 9086,4 |
| 2 | 410,82 | 0,52 | 8931,0 |
| 3 | 403,67 | 0,47 | 8838,2 |
| 4 | 406,64 | 0,56 | 8822,3 |
| 5 | 395,72 | 0,56 | 8961,6 |
| 6 | 402,66 | 0,55 | 8873,5 |
| 7 | 406,91 | 0,51 | 8879,2 |
| 8 | 409,34 | 0,56 | 8962,8 |
| 9 | 408,03 | 0,58 | 8772,4 |
| 10 | 409,19 | 0,57 | 9071,0 |
| 11 | 401,85 | 0,6 | 9167,6 |
| 12 | 403,9 | 0,62 | 9099,1 |
| 13 | 406,56 | 0,64 | 9042,2 |
| 14 | 399,18 | 0,57 | 9108,2 |
| 15 | 401,64 | 0,59 | 8957,8 |
| 16 | 404,13 | 0,6 | 8983,3 |
| 17 | 394,52 | 0,53 | 8885,5 |
| 18 | 399,63 | 0,56 | 9174,0 |
| 19 | 401,65 | 0,56 | 8825,2 |
| 20 | 403,9 | 0,56 | 8951,7 |

С целью расчета значений теплоты сгорания природного газа по результатам измерений была использована специально разработанная искусственная нейронная сеть. Для тренировки сети выбраны 16 наборов информативных параметров из 20, а для тестирования – 4, которые не использовали для тренировки. На вход ИНС были поданы скорость распространения звука в газе, содержание диоксида углерода, а на выходе – теплота сго-

рания природного газа. Результаты тестирования ИНС приведены в табл. 2.

Как видно из таблицы, значения теплоты сгорания, которые определены газовым хроматографом, соответствуют значениям, полученным с помощью искусственной нейронной сети разработанного метода. Абсолютная погрешность составила 39,64 ккал/м³, а приведенная к диапазону – 4,66%. Такие результаты можно считать приемлемыми, поскольку при проверке метода на основе данных, взятых из сертификатов качества на природный газ, приведенная к диапазону погрешность составляла 5,56%.

Экспериментальные исследования нового метода определения теплоты сгорания природного газа подтвердили его адекватность и возможность практического применения.

Экспериментальная установка требовала усовершенствования, поскольку необходимо было учесть влияние влажности и температуры пробы газа. С этой целью был доработан блок определения скорости распространения звука в газе путем введения датчиков влажности и температуры непосредственно в цилиндрическую измерительную камеру блока. Также был усовершенствован отражатель – предварительный заменен на отражатель вогнутой формы из нержавеющей стали диаметром 20 мм и кривизной поверхности 520 мм, что позволило сфокусировать акустический сигнал от первичного преобразователя и повысить значение энергии принятых акустических колебаний. Кроме того, конструкцией блока измерения скорости распространения звука в газе предусмотрена возможность регулировки расстояния от первичного преобразователя до отражателя, что позволяет в зависимости от частоты излучения получать максимальное значение энергии отраженного сигнала.

Таблица 2. Результаты определения теплоты сгорания природного газа по разработанному методу

| Номер образца | Теплота сгорания, полученная с помощью ИНС, ккал /м ³ | Теплота сгорания, полученная с помощью хроматографа, ккал /м ³ |
|---------------|--|---|
| 1 | 8815,8 | 8822,3 |
| 2 | 8948,5 | 8961,6 |
| 3 | 8958,8 | 9071,0 |
| 4 | 8924,9 | 8957,7 |

После устранения выявленных недостатков промышленную апробацию предложенного метода определения теплоты сгорания природного газа по приведенной выше методике путем сравнения полученных результатов с результатами хроматографического анализа проб газа проводили в ГП «Ивано-Франковскстандартметрология» и ОАО

«Ивано-Франковскгаз». Приведенная погрешность измерения с помощью предложенного метода не превышала 4%.

В настоящее время проводятся работы по изготовлению промышленного образца установки.

Следующим этапом проверки возможности промышленного использования предлагаемого метода была промышленная его апробация в условиях ОАО «Ивано-Франковскгаз». В ходе апробации отобраны 20 проб из газораспределительных станций и пунктов Ивано-Франковска и области (ГРС Городенка, ГРС Коломыя, ГРС Брошнев, ГРС Угринов – всего 16 объектов).

Технология промышленной апробации экспериментальной установки для определения ТСПГ следующая. Одновременно отбирали по две пробы газа. Одну пробу газа анализировали с помощью хроматографа «Кристалл-2000М» (зав. № 721753). Определяли компонентный состав газа и ТСПГ. На экспериментальной установке проводили измерения теплоты сгорания газа на второй отобранной пробе. Результаты определений уравнивали.

Для обеспечения достоверности проведения измерений температура проб газа была постоянной – в пределах 18 ± 1 °С. Также было стабилизировано давление природного газа по измерениям параметров распространения звука и содержания диоксида углерода в газе, значение которого составляло $2,2 \pm 0,2$ кПа. С целью определения влияния влажности на изменение показаний скорости распространения звука были проанализированы изменения последнего параметра от значения относительной влажности в пределах 3–30%. Существенного влияния влажности на значение скорости распространения звука в газе не обнаружено.

По разработанной методике экспериментальных исследований на экспериментальной установке были осуществлены измерения концентрации содержания диоксида углерода в природном газе и скорости распространения ультразвука в нем. В табл. 3 приведены результаты определения основных параметров газа, которые необходимы в дальнейших исследованиях. В ходе исследования определяли низшую теплоту сгорания газа, поскольку в межгосударственном стандарте ГОСТ 22667-82 [8] регламентированы требования именно к этому показателю, а не к высшей теплоте сгорания.

Правильность определения скорости распространения звука в газе с помощью экспериментальной установки проверена программой FLOWSOLV™ – AGA10 Gas Speed of Sound Calculation Input, которая позволяет рассчитывать скорость распространения звука в газе на основе полученных хроматографических данных о природном газе и реа-

лизует методику, одобренную Американской газовой ассоциацией [9]. Результаты проверки правильности определения скорости распространения звука в газе показаны на рис. 4.

Т а б л и ц а 3. Результаты исследования проб газа

| Теплота сгорания газа, определенная с помощью хроматографа, ккал/м ³ | Содержание диоксида углерода, определенное с помощью хроматографа, % | Содержание диоксида углерода, определенное с помощью экспериментальной установки, % | Скорость распространения звука в газе, м/с |
|---|--|---|--|
| 8362 | 0,748 | 0,85 | 420,8269 |
| 8063 | 0,072 | 0 | 437,2918 |
| 8203 | 0,732 | 0,79 | 425,7564 |
| 8113 | 0,532 | 0,6 | 427,3900 |
| 8315 | 0,616 | 0,69 | 423,7630 |
| 8128 | 1,345 | 1,59 | 424,6738 |
| 8114 | 0,53 | 0,56 | 430,7159 |
| 8114 | 0,538 | 0,59 | 430,2920 |
| 8132 | 1,565 | 1,86 | 424,7973 |
| 8054 | 0,071 | 0 | 437,1080 |
| 8122 | 1,332 | 1,57 | 425,5931 |
| 8368 | 0,173 | 0 | 424,9928 |
| 8493 | 0,409 | 0,44 | 419,6791 |
| 8129 | 0,985 | 1,13 | 428,0924 |
| 8107 | 0,404 | 0,43 | 431,3390 |
| 7998 | 0,089 | 0 | 436,9938 |
| 8057 | 0,07 | 0 | 437,3565 |
| 8289 | 0,526 | 0,56 | 424,2429 |
| 8263 | 0,489 | 0,53 | 424,8192 |
| 8132 | 0,976 | 1,05 | 427,5515 |

Как видно из рисунка, значения измеренной скорости распространения звука в природном газе соответствуют значениям, рассчитанным с помощью FLOWSOLV™ – AGA10 Gas Speed of Sound Calculation Input. Коэффициент корреляции между этими значениями равен 0,98.

Результаты экспериментальных исследований позволили установить наличие и характер зависимости между теплотой сгорания природного газа и скоростью распространения звука (рис. 5).

Зависимость, приведенная на рисунке, является нелинейной обратно пропорциональной, коэффициент корреляции равен –0,82. Теоретически рассчитанное значение этого коэффициента равно –0,63, что указывает на соответствие экспериментальных результатов теоретическим [10].

С целью определения ТСПГ пробы газа разделены на две части (17 проб и 3 пробы). На результатах исследования 17 образцов газа была выполнена настройка программного обеспечения, которое позволяет определить теплоту сгорания газа. На результатах остальных трех образцов газа было осуществлено тестирование разработанного метода определения теплоты сгорания.

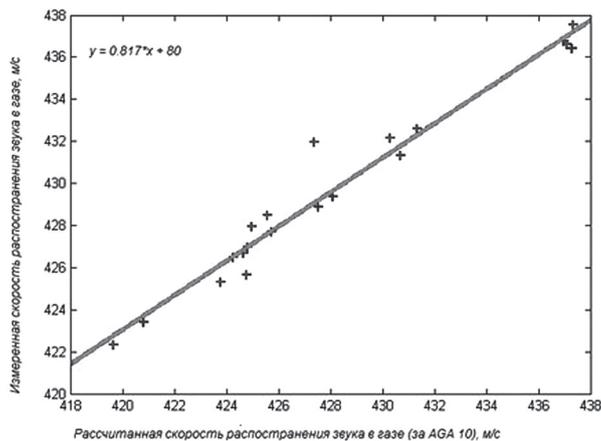


Рис. 4. Зависимость измеренной скорости распространения звука в газе от рассчитанной по AGA 10

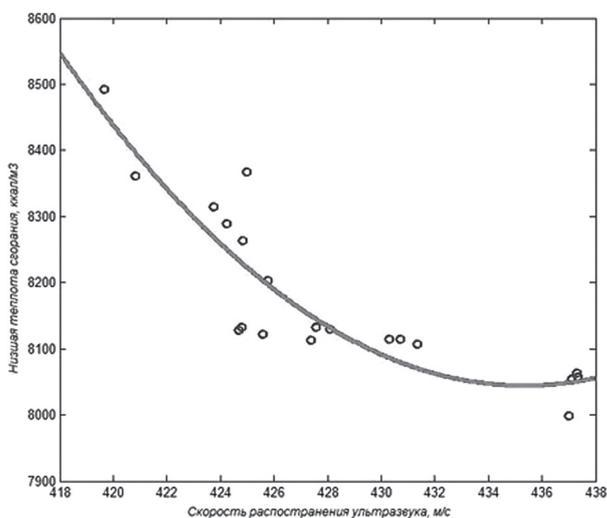


Рис. 5. Зависимость низшей ТСПГ от скорости распространения звука в газе

Результаты расчетов теплоты сгорания, согласно разработанному методу, по сравнению с результатами, полученными хроматографическим анализом, приведены в табл. 4.

Приведенная погрешность определения низшей теплоты сгорания природного газа составляет 1,6% (абсолютная погрешность равна 8 ккал/м³).

Преимуществом предлагаемого метода является быстрота проведения определения ТСПГ. Время проведения анализа одной пробы газа на совре-

менном хроматографе составляет около 20 мин, а с помощью экспериментальной установки – до 5 мин. Это основное преимущество, тем более, что экспериментальную установку можно применять в полевых условиях.

К недостаткам экспериментальной установки следует отнести отсутствие автоматизированного процесса расчета ТСПГ. Для решения этой проблемы будет разработано специализированное программное обеспечение.

Для обеспечения практического использования результатов исследований был разработан проект СОУ «Газ природный горючий. Экспресс-контроль теплоты сгорания природного газа». Этот нормативный документ согласован с международным стандартом ISO 15112 (п. 6.3.1), согласно которому предусмотрено использование для определения ТСПГ наряду с использованием традиционных методик (прямые измерения – с помощью калориметрической аппаратуры, косвенные измерения – с помощью газохроматографической аппаратуры) методик, относенных к категории корреляционных [2].

Таблица 4. Результаты промышленной апробации

| Номер пробы (по протоколу) | Низшая теплота сгорания (по протоколу), ккал/м ³ | Содержание двуоксида углерода (по протоколу), % | Содержание двуоксида углерода (данные экспериментальной установки), ккал/м ³ | Содержание двуоксида углерода (данные экспериментальной установки), % | Скорость распространения ультразвука (данные экспериментальной установки), м/с |
|----------------------------|---|---|---|---|--|
| 1 (11) | 8203 | 0,732 | 8209 | 0,79 | 425,76 |
| 2 (1) | 8129 | 0,985 | 8115 | 1,13 | 428,09 |
| 3 (16) | 8263 | 0,489 | 8259 | 0,53 | 424,82 |

Проект СОУ содержит методические рекомендации и описание алгоритма выполнения измерений и расчетов на разработанной экспериментальной установке определения ТСПГ. Также в проекте СОУ приведены практические рекомендации по внедрению предлагаемого метода в промышленности Украины.

На основе полученных результатов промышленной апробации экспериментальной установки сделаны следующие выводы.

1. Предлагаемый метод и экспериментальная установка позволяют определять ТСПГ в экспресс-режиме и с удовлетворительной точностью (до 5%) путем измерения скорости распространения звука и содержания диоксида углерода в природном газе.

Эти положения полностью согласуются с теоретическими результатами, полученными авторами ранее [3, 7].

2. Экспериментальную установку определения ТСПГ с учетом обнаруженных недостатков можно допустить к метрологической аттестации и более широкой апробации в соединении с проектом нормативного документа, регламентирующего порядок получения и использования результатов измерения низшей теплоты сгорания природного газа.

3. Необходима техническая реализация предложенной технологии определения ТСПГ, соблюдая требования к метрологическому и нормативному обеспечению.

Литература

1. www.rada.gov.ua. Официальный веб-сайт Верховной Рады Украины. Постановление национальной комиссии регулирования электроэнергетики Украины от 25.10.2008 N 1239 «Об утверждении розничных цен на природный газ, используемый для нужд населения, Международного детского центра «Артек» и Украинского детского центра «Молодая гвардия».
2. ISO 15112:2011 Natural gas – Energy determination.
3. К а р п а ш О. New approach to natural gas quality determination (Новий підхід до визначення якості природного газу) / О. Карпаш, І. Дарвай, М. Карпаш // Journal of petroleum science and engineering. 2010. Vol. 71. Issue 3–4. P. 133–137.
4. К а р п а ш О. М. Новые информативные параметры для определения теплоты сгорания природного газа / О. М. Карпаш, И. Я. Дарвай, М. О. Карпаш // Нефтяная и газовая промышленность. 2008. № 4. С.57–60.
5. К а р п а ш О. М. Теоретическое основание метода экспресс-контроля теплоты сгорания природного газа / О. М. Карпаш, И. Я. Дарвай // Неразрушающий контроль и техническая диагностика: материалы 6-й Национальной науч.-техн. конф. и выставки. Киев, 9–12 июня 2009 г.
6. M o r g o w T. B. Development of a low cost inferential natural gas energy flow rate prototype retrofit module, Final report, DOE Cooperative Agreement No. DE-FC21–96MC33033, U. S. Department of Energy, Morgantown, WV. SouthwestResearchInstitute, San-Antonio, TX.
7. Д а р в а й И. Я. Теоретическое обоснование метода определения теплоты сгорания природного газа / И. Я. Дарвай // Нефтегазовая энергетика: проблемы и перспективы: материалы Междунар. науч.-техн. конф. и выставки. Ивано-Франковск, 20–23 октября 2009 г.
8. Газы горючие природные. Расчетный метод определения теплоты сгорания, относительной плотности и числа Воббе: ГОСТ 22667-82.
9. Speed of Sound in Natural Gas and Other Related Hydrocarbon Gases. AGA Report. N, American Gas Association. 2003. N 10.
10. Д а р в а й И. Я., К а р п а ш О. М. Оптимизация количества информативных параметров для определения теплоты сгорания природного газа // Методы и средства неразрушающего контроля промышленного оборудования: материалы 2-й науч.-практ. конф. студентов и молодых ученых. Ивано-Франковск, 25–26 ноября 2009 г.