

МОДЕЛЬ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ АНАЛИЗА КАЧЕСТВА ПРИРОДНОГО ГАЗА С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Брокарев И.А.¹

(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва)

Васьковский С.В.², Фархадов М.П.³

(ФГБУН Институт проблем управления
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

В результате проведенного исследования была предложена имитационная модель автоматизированной информационной системы определения энергетических параметров природного газа, приведены её основные узлы, показан вариант работы системы на экспериментальных данных. Предложенная модель автоматизированной системы на основе метода обработки информации состоит из следующих подсистем – подсистема алгоритмов, подсистема измерительной информации, подсистема проведения анализа. Основные преимущества метода и системы на его основе заключаются в следующем: преимуществом каждой из подсистем является их многофункциональность, позволяющая модифицировать систему на каждом этапе под определенную задачу и осуществлять получение необходимой измерительной информации коммерчески доступным и относительно недорогим измерительным оборудованием. Система апробирована на результатах экспериментов, проведенных в лабораторных условиях на данных реальных газовых смесей. Рассчитаны показатели точности определения энергетических параметров, по которым можно сделать вывод об возможности применения исследуемого метода и системы на его основе для анализа качества реальных газовых смесей. Реализованная модель автоматизированной информационной системы на основе метода обработки информации является информационно-вычислительной, обеспечивающей анализ качества газа с низкими временными затратами. Быстродействие модели системы выражается в определении требуемых показателей качества с использованием данных, полученных с

¹ Иван Андреевич Брокарев, ассистент (brokarev.i@gubkin.ru).

² Сергей Владимирович Васьковский, к.т.н., старший научный сотрудник (v63v@yandex.ru).

³ Маис Пашаевич Фархадов, д.т.н., главный научный сотрудник (mais@ipu.ru).

измерительных приборов, и программного обеспечения для расчёта параметров.

Ключевые слова: анализ качества природного газа, оценка точности систем газоанализа, автоматизированные информационные системы.

1. Введение

В качестве практической реализации предлагаемых решений в данной статье рассмотрено экспериментальное подтверждение предложенного метода обработки информации, в частности реализация имитационной модели автоматизированной информационной системы (АИС) анализа качества газа, а также алгоритмическую часть, включающую описание алгоритмов работы основных узлов системы. При исследовании данной модели системы использовались ранее полученные в работах [1 - 4] результаты, в частности: использование разработанной нейросетевой модели, применение многокритериальной оценки для выбора входных параметров, использование алгоритма перехода к модели эквивалентного псевдогаза, оценка надёжности с применением вероятностного метода. Модель системы функционирует следующим образом. На технологическом объекте, к которому планируется применить разработанную модель, в байпасе (обводном трубопроводе технологической установки, применяющемся для транспортировки газа параллельно запорной и регулирующей арматуре) от основной технологической трубы располагаются две измерительные камеры (основная и резервная). В каждой измерительной камере установлены следующие измерительные приборы: прибор TCG3880 от компании Xensor Integration для измерения коэффициента теплопроводности, прибор TDS0119 от компании Dynament Infrared Gas Sensors для измерения концентрации диоксида углерода, прибор Optim от компании Optel для измерения скорости звука. Также на объекте необходим эталонный анализатор (в рассматриваемом случае это газовый хроматограф VARIAN CP4900) для получения эталонных данных для анализа. Данные измерений через

концентратор поступают на персональный компьютер. Поступившие от блока входных данных измерения поступают на подсистему алгоритмов, реализованную на ПК в Matlab. Модель АИС состоит из трёх основных узлов: подсистема алгоритмов, включающая подготовку расчётных данных, выбор входных параметров для статистической модели, выбор вида и архитектуры модели; подсистему получения измерительной информации, включая измерение физических параметров газа и получение информации от эталонного анализатора; подсистему проведения расчёта требуемых параметров, включая обработку измерительной информации и расчёт энергетических параметров с последующим сравнением с эталонными данными. Структурная схема модели АИС показана на рисунке 1.

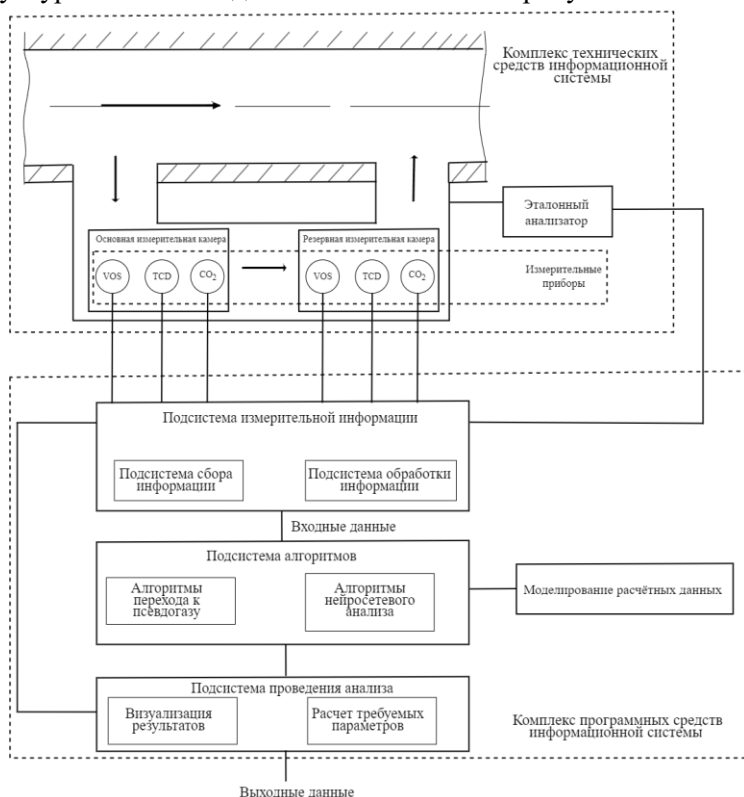


Рис. 1. Структурная схема модели АИС.

2. Описание модели АИС

2.1. ПОДСИСТЕМА ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

Подсистема измерительной информации состоит из измерительных приборов и аппаратуры, которую возможно использовать в исследуемой задаче для получения значений требуемых физических параметров и эталонных данных для оценки работы системы в целом. Стоит отметить, что данная подсистема апробировалась на имитационном макете, обладающем всеми свойствами предлагаемой системы, в частности возможность достижения высокой точности анализа за счёт подготовки смесей с использованием регуляторов массового расхода, проведение измерений коммерчески доступными и относительно недорогими измерительными приборами.

Также исследуемая подсистема измерительной информации включает в себя визуализацию основных измеряемых параметров, в частности скорости звука, теплопроводности и концентрации диоксида углерода для наглядного представления процесса измерения. Визуализация реализуется при помощи алгоритмов из соответствующей подсистемы, в частности алгоритма для визуализации различия параметров исходных смесей и модели псевдогазовых смесей, приведённого в приложении. Предлагаемая подсистема получения измерительной информации апробировалась на доступном измерительном оборудовании, её основная функция – предоставление измерительной информации для последующей обработки в следующей подсистеме. Преимуществами данной подсистемы являются возможность использования измерительного оборудования для апробации подсистемы и использование известных измерительных методов для измерения параметров газа.

2.2. ПОДСИСТЕМА АЛГОРИТМОВ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Данная подсистема включает программное обеспечение с реализованными алгоритмами основных функций подсистемы. В предлагаемой реализации имитационной модели системы в качестве программного обеспечения используется пакет прикладных программ для решения задач технических вычислений Matlab 2019b [6] с плагином NIST REFPROP [8], программы производящей расчёт различных свойств газовых смесей, как физических параметров, являющихся измеряемыми в исследуемой задаче, так и энергетических параметров, являющихся выходными целевыми параметрами в исследуемой задаче. В качестве пакета прикладных программ для реализации алгоритмов и расчёта параметров газа в исследуемой задаче возможно использовать программное обеспечение, функционирующее на современных операционных системах, включая Linux, macOS и Windows, в котором возможно реализовать приведенные алгоритмы, что является преимуществом предлагаемой системы - свойством многофункциональности системы. Примеры алгоритмов рассмотрены в приложении. Подсистема алгоритмов включает в себя следующие алгоритмы: алгоритмы формирования расчётных данных, алгоритмы проведения нейросетевого анализа, алгоритмы первичной визуализации данных. Алгоритм формирования компонентного состава газа заключается в задании минимального и максимального (согласно стандартам) значения концентрации каждого компонента с последующим перебором всех возможных вариантов компонентного состава с заданием шага по каждому компоненту. Алгоритм расчёта компонентного состава модели эквивалентного псевдогаза заключается в использовании методик для расчёта по компонентному составу исходного газа компонентного состава модели четырёх-, пятикомпонентного псевдогаза или двух видов псевдогаза одновременно, что можно задать в данном алгоритме. Алгоритм задания температуры и давления

позволяет добавлять к компонентному составу значения давления и температуры в задаваемом диапазоне для формирования расчётных данных. Алгоритм расчёта физических параметров и энергетических характеристик для исходного газа и модели эквивалентного псевдогаза заключается в выборе стандарта, по которому будет производиться расчет, выбора параметров, которые будут рассчитаны, единиц измерения, формирования отчёта о возможных ошибках расчёта и формировании массива расчётных данных. Схема алгоритма расчета компонентного состава модели эквивалентного псевдогаза показана на рисунке 2. Входной информацией для алгоритма является количество доступных технических средств информационной системы (ИС) и сведения о рассматриваемом объекте исследования. В зависимости от соотношения количества доступных технических средств (N_s) и числа компонентов в объекте (N) расчёт возможен по моделям четырёх- и пятикомпонентного псевдогаза. Выходной информацией в алгоритме является компонентный состав выбранной модели псевдогаза.

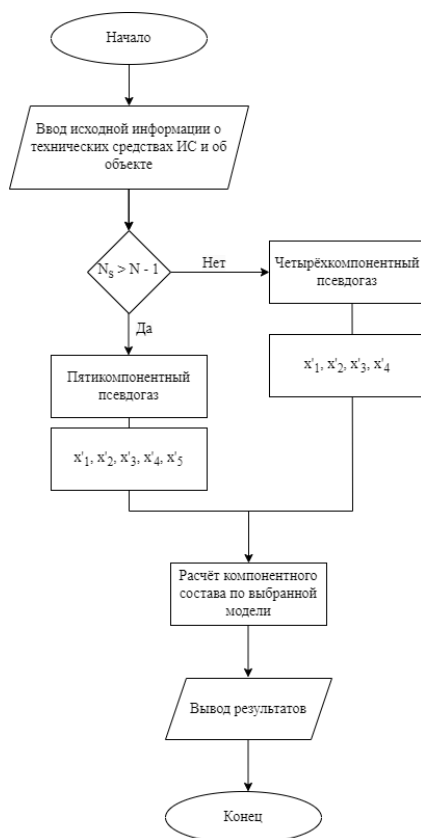


Рис. 2. Блок-схема алгоритма перехода к модели эквивалентного псевдогаза.

Алгоритмы, реализующие нейросетевой анализ, заключается в формировании данных для модели, разработке самой модели, её обучении и тестировании на расчётных данных. Алгоритм импорта данных предназначен для формирования удобного для представления вида расчётных данных в зависимости от платформы, из которого осуществляется импорт. Основной алгоритм нейросетевого анализа включает в себя ряд алгоритмов, реализующих следующие функции: возможность пропуска ряда моделей в

случае отсутствия необходимости их рассмотрения; многокритериальная оценка входных параметров с последующим выбором наиболее подходящего набора входных данных; разделение данных на тренировочную, валидационную, тестовую выборки с выбором объема выборки, количества разбиений, процентом данных, идущих на каждую из выборок; выбор набора входных и выходных данных, их округление до значений, которые возможно получить посредством измерений приборами; вычисление матрицы коэффициентов корреляции, нормализация и кросс-валидация данных; реализация статистических моделей, описанных выше (как регрессионных, так и нейросетевых), для нейросетевых моделей настройка требуемых параметров, в том числе архитектуры модели, алгоритма обучения, критерия окончания обучения, количества циклов обучения, расчёта ошибок при обучении для всех моделей, обратной денормализации данных, расчёта показателей точности при обучении и тестировании статистических моделей и выбор модели для последующего тестирования. Алгоритмы симуляции статистической модели заключаются в тестировании выбранной на предыдущем шаге модели и расчёте показателей точности на этапе тестирования модели.

Алгоритмы визуализации расчётных данных заключаются в построении графиков по различиям в параметрах исходных газовых смесей и модели эквивалентных псевдогазовых смесей для расчёта отклонения и его вклада в погрешность метода, а также графиков по процессу обучения и тестирования моделей для поиска возможных ошибок при протекании данных процессов и их устранении из реализации алгоритмов.

Подсистема приведённых алгоритмов является важным преимуществом предлагаемой модели системы анализа качества газа, реализующая алгоритмы предварительной подготовки расчётных данных и разработки нейросетевой модели. На этом этапе в силу многофункциональности подсистемы возможно пропустить или модифицировать некоторые этапы, подстроив подсистему под определённую задачу. Также в данной

подсистеме возможно реализовать предварительное обучение и тестирование модели, многокритериальную оценку входных параметров, переход к модели эквивалентного псевдогаза и другие алгоритмы, позволяющие упростить дальнейшую разработку системы и дающие возможность протестировать некоторые этапы функционирования системы.

2.3. ПОДСИСТЕМА ПРОВЕДЕНИЯ АНАЛИЗА

Данная подсистема была реализована с использованием того же программного обеспечения, что и подсистема алгоритмов. В данной подсистеме разработанная в подсистеме алгоритмов нейросетевая модель симулировалась на измерительных данных, полученных в соответствующей подсистеме, с последующим сравнением с эталонными данными. Для апробации предлагаемой подсистемы был произведён измерительный эксперимент, который заключался в измерении физических параметров газа, в частности, скорости звука, коэффициента теплопроводности и концентрации диоксида углерода для исходных газовых смесей и для соответствующих им четырёх- и пятикомпонентных псевдогазовых смесей. Данные параметры при выбранных термодинамических стандартных условиях измерялись двумя однотипными измерительными приборами для оценки надёжности получаемых измерительных данных. Скорость звука, теплопроводность измерялись для матрицы газовых смесей. Данная матрица строилась путём постепенного увеличения содержания компонентов для покрытия выбранного объекта, а именно российского природного газа. Исследуемая матрица газовых смесей соответствует диапазонам по компонентам российского природного газа, что означает, что в проведенном эксперименте был покрыт весь исследуемый природный газ, что может считаться преимуществом системы по её качеству апробации.

На рисунке 3 показаны данные об измерении скорости звука для газовой смеси метан-пропан-азот-диоксид углерода.

На рисунке 4 показаны результаты измерения для смеси метан 94%, пропан 1%, диоксид углерода 1%, азот 4%. Из рисунка видно, что в связи с высокой повторяемостью измерений в рамках одного компонентного состава смеси скорость звука не выходит за пределы 5 см/с. Стоит отметить, скачки на графиках 3 и 4 объясняются тем, что в начале и конце измерений происходит проверка на чистом метане для контроля достоверности измерений и дальнейшей коррекции данных по температуре и давлению.

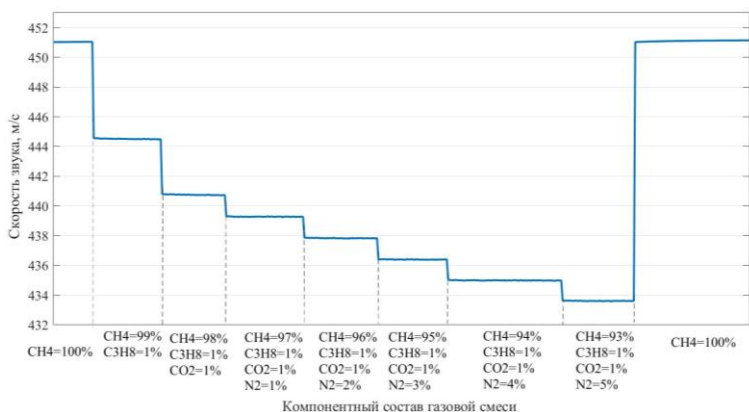


Рис. 3. Результаты измерения скорости звука газовой смеси метан-пропан-азот-диоксид углерода.

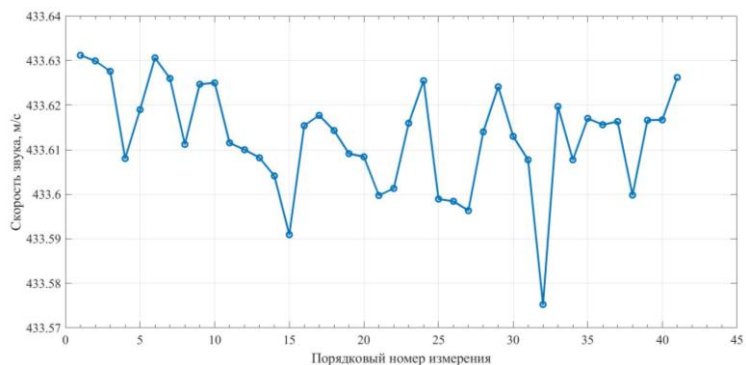


Рис. 4. Результаты измерения скорости звука для газовой смеси метан 94%, пропан 1%, диоксид углерода 1%, азот 4%.

На следующем шаге в данной подсистеме разработанная в подсистеме алгоритмов нейросетевая модель симулировалась на измерительных данных, полученных в соответствующей подсистеме. Рассчитывались показатели точности определения как компонентного состава модели эквивалентного псевдогаза, так и точность определения требуемых энергетических параметров газа. Работа данной подсистемы заключается в тестировании разработанной нейросетевой модели на полученных экспериментальных данных после их коррекции и предварительной обработки. Результаты тестирования (с рассчитанными максимальным (MAO), средним абсолютным отклонением (CAO) и среднеквадратичным отклонением (СКО) показаны в таблице 1.

Таблица 1. Точность определения компонентного состава псевдогаза разработанной нейросетевой моделью на экспериментальных данных.

Компонент	MAO, молярная доля, %	CAO, молярная доля, %	СКО
Метан	0.94	0.56	0.64
Пропан	0.53	0.36	0.32
Азот	0.44	0.25	0.23

В таблице 2 и на рисунках 5 и 6 показана точность определения энергетических характеристик газа (низшая объемная теплотворная способность и число Воббе), полученных путем расчета по полученному компонентному составу модели эквивалентного псевдогаза в сравнении с эталонными данными. В качестве эталонных данных использовались данные хроматографического анализа.

Таблица 2. Точность определения энергетических параметров газа по разработанной нейросетевой модели на этапе тестирования.

Параметр точности, МДж/м ³	Теплотворная способность	Число Воббе
МАО	0.351	0.478
САО	0.112	0.235

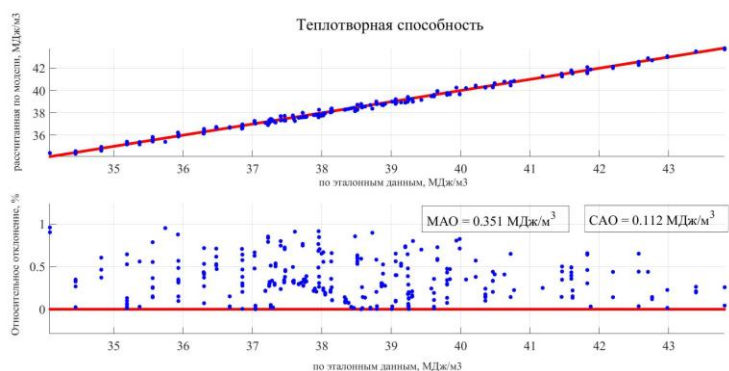


Рис. 5. Точность определения теплотворной способности по разработанной нейросетевой модели на этапе тестирования.

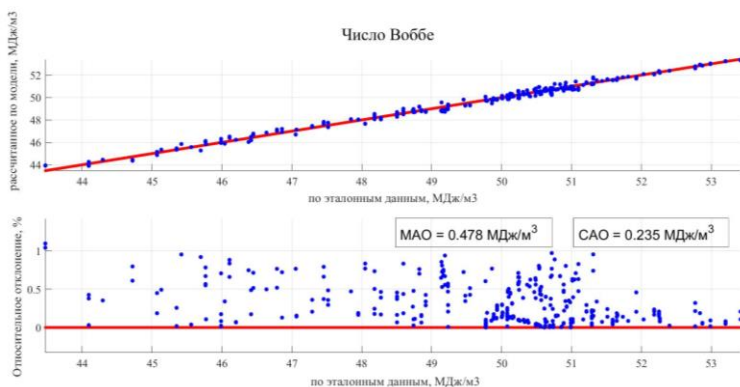


Рис. 6. Точность определения числа Воббе по разработанной нейросетевой модели на этапе тестирования.

3. Заключение

Разработана модель АИС для определения значений энергетических характеристик природного газа по результатам измерения заданного набора его физических параметров. Данная модель системы состоит из подсистемы алгоритмов, подсистемы измерительной информации и подсистемы проведения анализа. Преимуществом модели системы можно считать её распределённую структуру, заключающееся в том, что выход из строя одного из узлов(подсистемы) не приводит к полной остановке всей системы. Возможность функционирования модели системы обосновывается использованием программного обеспечения, выполняющего расчёты, и измерительных приборов, предоставляющих измерительную информацию. Стоит отметить, что высокое быстродействие системы крайне важно для тех случаев, когда свойства газа могут изменяться быстро и требуют постоянного мониторинга, что делает разработку исследуемой системы крайне актуальной, например, это переработка попутного газа нефтяных месторождений, который раньше шел в факелы, газ, получаемый гидроразрывом пласта и биогаз из различных источников [5, 7, 9, 10]. Реализация в системе ряда алгоритмов, методов и технологий, в том числе использование нейросетевых технологий, многокритериальной оценки входных параметров, алгоритма перехода к модели эквивалентного псевдогаза, оценка надёжности с применением вероятностного метода также являются преимуществами системы.

Литература

1. BROKAREV I.A., FARKHADOV M.P., VASKOVSKII S.V.
Recurrent neural networks to analyze the quality of natural gas

- // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta - Upravlenie, Vychislitel'naya Tekhnika i Informatika. – 2021. – №55. — P. 11–17.
2. BROKAREV I.A., VASKOVSKII S.V. *Gas Quality Determination Using Neural Network Model-based System* // Proceedings of the 2nd International Workshop on Stochastic Modeling and Applied Research of Technology (SMARTY 2020). – Petrozavodsk: Institute of Applied Mathematical Research, Karelia Research Centre of the Russian Academy of Sciences, 2020. – Vol-2792. – P. 113-128.
 3. BROKAREV I.A., VASKOVSKII S.V. *Investigation of Reliability for Information System for Natural Gas Quality Analysis* // Advances in Systems Science and Applications. –2022. – Vol-22, No. 2. – P. 11-20.
 4. BROKAREV I.A., VASKOVSKII S.V. *Multi-criteria estimation of input parameters in natural gas quality analysis* // Advances in Systems Science and Applications. –2020. – Vol-20, No. 2. – P. 60-69.
 5. KOTURBASH T., BICZ A., KUTCHEROV V.G. *Real-time quality metering of propanated biomethane*. – 2021. – Vol. 27, No. 1. – P. 8.
 6. Matlab 2019b Software. URL: <https://www.mathworks.com> (Access date: 30.05.2023).
 7. PETCULESCU A. *An acoustic approach to assess natural gas quality in real time* // The Journal of the Acoustical Society of America. – 2017. – №142. – P. 2547.
 8. REFPROP Software. URL: <https://www.nist.gov/srd/refprop> (Access date: 30.05.2023).
 9. WU F., YAN Y., YIN C. *Real-time microseismic monitoring technology for hydraulic fracturing in shale gas reservoirs: A case study from the Southern Sichuan Basin* // Natural Gas Industry. – 2017. – Volume 4, Issue 1. – P. 68-71.
 10. YI P., LIZHI X., YUANZHONG Z. *Remote real-time monitoring system for oil and gas well based on wireless sensor networks* // International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. – 2010. – P. 2427-2429.

MODEL OF INFORMATION SYSTEM FOR NATURAL GAS QUALITY ANALYSIS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

Ivan Brokarev, National University of Oil and Gas «Gubkin University», Moscow, assistant (brokarev.i@gubkin.ru).

Sergei Vaskovskii, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Candidate of Sciences, senior researcher (v63v@yandex.ru).

Mais Farhadov, V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences, Moscow, Doctor of Sciences, chief researcher (mais@ipu.ru).

Abstract: As a result of the study, a simulation model of an automated information system for determining the energy parameters of natural gas was proposed, its main components are given, and a variant of the system operation based on experimental data is shown. The proposed model of an automated system based on the method of information processing consists of the following subsystems - a subsystem of algorithms, a subsystem of measuring information, a subsystem of analysis. The main advantages of the method and the system based on it are as follows: the advantage of each of the subsystems is their multifunctionality, which makes it possible to modify the system at each stage for a specific task and to obtain the necessary measurement information using commercially available and relatively inexpensive measuring equipment. The system was tested on the results of experiments carried out in laboratory conditions on the data of real gas mixtures. Accuracy indicators for determining the energy parameters are calculated, according to which it can be concluded that the method under study and the system based on it can be used to analyze the quality of real gas mixtures. The implemented model of the automated information system based on the method of information processing is information and computational, which provides analysis of gas quality with low time costs. The speed of the system model is expressed in the determination of the required quality indicators using data obtained from measuring instruments and software for calculating the parameters.

Keywords: analysis of the quality of natural gas, assessment of the accuracy of gas analysis systems, automated information systems.

УДК 519.6
ББК 30.1

*Статья представлена к публикации
членом редакционной коллегии ...заполняется редактором...*

Поступила в редакцию ...заполняется редактором...

Опубликована ...заполняется редактором...