

# ИДЕНТИФИКАЦИЯ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА СИНТЕЗ-ГАЗА

УДК 681.5

**Ю.В. Загашвили**, д.т.н., проф., ООО «ВТР» (Санкт-Петербург, РФ),

y.zagashvili@yandex.ru

**А.М. Кузьмин**, к.т.н., ООО «ГСГ» (Санкт-Петербург, РФ),

kuzmin.lex@gmail.com

**Автоматическое управление режимами работы генератора синтез-газа – важнейший способ повышения эффективности технологического процесса получения синтез-газа. Традиционно используемые при проектировании математические модели не позволяют непосредственно получать и исследовать характеристики генератора синтез-газа типа «вход – выход», синтезировать законы управления технологическими процессами.**

**Исследовано семейство газогенераторов синтез-газа, реализующее технологию парциального окисления природного газа воздухом и предназначенное для генерации синтез-газа при малотоннажном производстве метанола в промышленных условиях. Описана принципиальная работа генератора синтез-газа, дана краткая информация по внутрикамерным процессам при некаталитическом парциальном окислении природного газа воздухом.**

**Статья посвящена идентификации статических характеристик семейства газогенераторов, инвариантных к незначительным изменениям состава природного газа и положению рабочей точки режима парциального окисления. Процедура идентификации включает предварительные термодинамические расчеты процесса и выбор номинального режима парциального окисления, при котором на выходе камеры сгорания генерируемый газ имеет требуемый состав и параметры. Для номинального режима определены зависимости выходных переменных (концентраций компонентов газа на выходе камеры сгорания) от входных управляющих воздействий (массовых расходов компонентов подачи или их отношения).**

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ГАЗОГЕНЕРАТОР СИНТЕЗ-ГАЗА, КАМЕРА СГОРАНИЯ, ПАРЦИАЛЬНОЕ ОКИСЛЕНИЕ, УГЛЕВОДОРОДНЫЕ ГАЗЫ, ВОДОРОД, МОНООКСИД УГЛЕРОДА, ДИОКСИД УГЛЕРОДА, ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ, СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ.

Синтез-газ (СГ), представляющий смесь водорода  $H_2$  и монооксида углерода  $CO$ , является промежуточным сырьем для синтеза большинства целевых химических продуктов, в том числе метанола. При малотоннажном производстве метанола в промышленных условиях перспективной технологией получения СГ считается парциальное окисление углеводородных газов (УВГ) воздухом в высокоэнергоемких малогабаритных управляемых трехкомпонентных газогенераторах СГ (ГСГ), позволяющих создавать мобильные транспортные установки [1, 2].

Состав и параметры генерируемого СГ оказывают определяющее влияние на эффективность каталитического синтеза метанола,

поэтому автоматическое управление режимами работы ГСГ служит важнейшим способом повышения эффективности технологического процесса получения СГ. Для решения задач управления необходимо знание математических моделей процессов в реакторах, связывающих входные управляющие воздействия с выходными управляемыми переменными. Традиционно используемые проектантом ГСГ математические модели – уравнения равновесия (диссоциации), уравнения материального баланса (сохранения вещества), уравнения Дальтона и уравнения сохранения энергии – описывают равновесные термодинамические процессы в газогенераторе [3]. На их основе рассчитывают параметры режимов процессов пар-

циального окисления (горения при недостатке окислителя), концентрации компонентов газовой смеси на выходе реакторов, необходимую производительность реакторов, номинальные значения массовых расходов компонентов подачи (горючего, окислителя, воды). Но эти модели не позволяют непосредственно получать и исследовать характеристики ГСГ типа «вход – выход», синтезировать законы управления технологическими процессами.

В работе [4] предложена методика структурной и параметрической идентификации статических характеристик высокотемпературных реакторов. В настоящей статье методика развивается применительно к конкретному семейству ГСГ, предназначенно-

**Yu.V. Zagashvili**, Doctor of Sciences (Engineering), VTR LLC (Saint Petersburg, Russian Federation),  
y.zagashvili@yandex.ru

**A.M. Kuzmin**, Candidate of Sciences (Engineering), GSG LLC (Saint Petersburg, Russian Federation),  
kuzmin.lex@gmail.com

### Identification of the static characteristics of the combustion chamber of the synthesis gas generator

Automatic control of the operation modes of the synthesis gas generator is the most important way to improve the efficiency of the technological process of producing synthesis gas. Mathematical models which traditionally used by engineers do not allow to directly obtain and research the characteristics of such type of the synthesis gas generator as “input-output” and to synthesize the laws of control of technological process.

The study object is a family of synthesis gas generators, which implements the technology of partial oxidation of natural gas by air and is intended for the generation of synthesis gas in low-tonnage production of methanol in field conditions. The principal work of the synthesis gas generator is described and brief information concerning the in-chamber processes in the non-catalytic partial oxidation of natural gas by air is given.

The aim of the work is to identify the static characteristics of the gas generator family, invariant to minor changes in the composition of natural gas and to the position of the working point of the partial oxidation mode. The identification procedure includes preliminary thermodynamic calculations of the process and the choice of the nominal partial oxidation regime in which the generated gas has the required composition and parameters at the output of the combustion chamber. The dependences of the output variables (concentrations of the gas components at the output of the combustion chamber) on the input control actions (mass flow rates of the feed components or their ratio) are determined for the nominal mode.

**KEYWORDS:** SYNTHESIS GAS GENERATOR, COMBUSTION CHAMBER, PARTIAL OXIDATION, HYDROCARBON GASES, HYDROGEN, CARBON MONOXIDE, CARBON DIOXIDE, THERMODYNAMIC CALCULATIONS, STATIC CHARACTERISTICS.

му для использования в малотоннажных установках по производству метанола и работающему на компонентах «природный газ – воздух» [2, 5], с целью получения зависимостей, связывающих установившиеся значения выходных параметров камеры сгорания ГСГ с входными управляющими воздействиями.

#### ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Трехкомпонентный ГСГ представляет управляемый химический реактор – охлаждаемую модульную конструкцию, состоящую из следующих основных элементов [1]: блоки подачи природного газа, воздуха и химочищенной воды, смесительная головка, устройство зажигания, камера сгорания (КС), испарительная камера (ИК), блок очистки от твердой фазы, блок автоматики. Входными управляющими воздействиями для ГСГ выступают массовые расходы компонентов подачи (природного газа, воздуха и химочищенной воды). Выходными переменными КС ГСГ являются

объемные и массовые расходы  $H_2$ ,  $CO$ , диоксида углерода  $CO_2$ , отношение объемных концентраций  $H_2/CO$ , температура газовой смеси на выходе КС  $T$ .

Работа ГСГ происходит следующим образом. Природный газ и воздух от компрессоров через расходомеры – регуляторы массовых расходов подают с давлением 6,5–7,5 МПа в блоки подготовки компонентов, с выхода которых нагретый и увлажненный природный газ и нагретый воздух отдельно подают в смесительную головку ГСГ [2, 5]. В КС газогенератора происходит парциальное окисление природного газа воздухом с образованием на выходе газовой смеси, состоящей из  $СГ$ ,  $CO_2$ , водяного пара, азота, непрореагировавшего природного газа и следовых количеств других компонентов, включая конденсированную фазу (сажу и смолы). С выхода КС газовая смесь поступает в ИК, в которую подают химочищенную воду для охлаждения газовой смеси до регулируемой температуры  $T = 850–950$  °С. При этом протека-

ют побочные реакции некаталитической паровой конверсии  $CO$  и газификации сажи, в результате чего балансированный состав газовой смеси на выходе ГСГ изменяется с увеличением отношения  $H_2/CO$ , что благоприятно для синтеза метанола.

Основным технологическим режимом работы ГСГ является квазистационарный режим стабилизации массовых расходов природного газа и воздуха, обеспечивающий номинальное соотношение компонентов подачи, характеризующее коэффициентом избытка окислителя, и, соответственно, требуемый количественный и качественный состав генерируемой газовой смеси на выходе КС.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Идентификация нацелена на получение зависимостей приращения выходных переменных (мольных и массовых концентраций компонентов генерируемого водородсодержащего газа ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ), отношения  $H_2/CO$  и температуры  $T$ ) от приращений



входных переменных (массовых расходов сырья и окислителя или коэффициента избытка окислителя). В соответствии с изложенной в [4] методикой на первом этапе идентификации проводят серию многофакторных термодинамических расчетов объемных и массовых концентраций компонентов ( $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ,  $N_2$ ) на выходе КС в широком диапазоне изменения параметров парциального окисления.

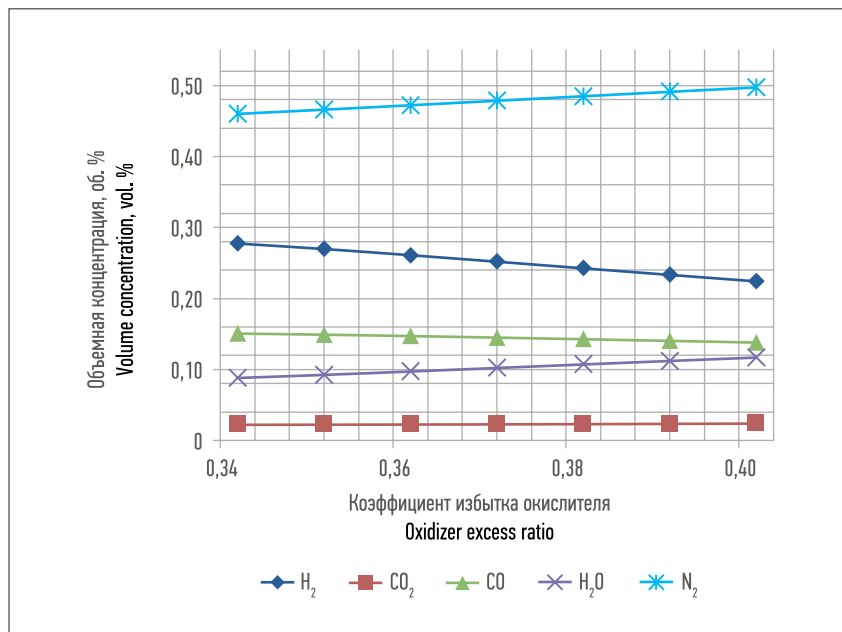
На рисунке приведены фрагменты результатов расчетов для природного газа следующего состава, об. %:  $CH_4$  – 97,5;  $C_2H_6$  – 1,0;  $N_2$  – 0,8;  $C_3H_8$  – 0,4;  $C_4H_{10}$  – 0,2;  $CO_2$  – 0,1.

По результатам расчетов анализируют рациональный диапазон изменения основного параметра технологического режима – коэффициента избытка окислителя:

$$\alpha = \frac{m_{ок}}{m_r \cdot K_{m0}}, \quad (1)$$

где  $m_{ок}$  – массовый расход окислителя, кг/ч;  $m_r$  – массовый расход природного газа, кг/ч;  $K_{m0}$  – стехиометрическое значение соотношения компонентов для пары «природный газ – воздух».

Анализ графиков показывает, что в рабочем диапазоне изменения коэффициента избытка окислителя  $0,32 < \alpha < 0,40$  объемные и массовые концентрации



Зависимость объемных концентраций продуктов парциального окисления компонентов «природный нефтяной газ – воздух» от коэффициента избытка окислителя при  $P = 6$  МПа

Dependence of the volume concentrations of the products of partial oxidation of the components “natural oil gas – air” on the oxidizer excess ratio at  $P = 6$  MPa

компонентов газовой смеси на выходе КС линейно зависят от  $\alpha$  и практически не зависят от давления. Причем вблизи нижней границы указанного диапазона концентрации компонентов близки к максимальным значениям. Температура водородсодержащего газа на выходе КС в указанном диапазоне  $\alpha$  также изменяется линейно и не зависит от

давления. Кроме того, выявлено подобие графиков концентраций компонентов и температуры газа на выходе КС при изменении температуры нагрева горючего и окислителя, а также степени их увлажнения.

По результатам анализа выбран номинальный режим парциального окисления природного газа воздухом, характеризующийся

Балансовый состав газовой смеси на выходе камеры сгорания  
Balance composition of the gas mixture at the output of the combustion chamber

$\alpha$	Мольный состав газовой смеси Molar composition of the gas mixture						$H_2/CO$	$T, ^\circ C$
	$H_2$	$CO$	$H_2O$	$N_2$	$CO_2$	$CH_4$		
0,34	0,278	0,151	0,088	0,460	0,022	0,001	1,84	1119
0,35	0,270	0,149	0,092	0,466	0,022	0,000	1,81	1151
0,36	0,261	0,147	0,097	0,472	0,022	0,000	1,77	1185
0,37	0,252	0,145	0,102	0,478	0,023	0,000	1,74	1219
0,38	0,242	0,143	0,107	0,485	0,023	0,000	1,70	1254
0,39	0,233	0,140	0,112	0,491	0,023	0,000	1,66	1288
0,40	0,224	0,138	0,117	0,497	0,024	0,000	1,63	1322

следующими параметрами. Номинальное значение коэффициента избытка окислителя должно находиться в диапазоне  $\alpha = 0,37-0,39$ , что обеспечивает технологический компромисс, сохраняя достаточный выход СГ при отсутствии сажеобразования [6, 7].

Номинальное давление подачи компонентов составляет 6,5–7,5 МПа, что гарантирует с учетом потерь в газовых магистралях давление подачи СГ в блок каталитического синтеза метанола не менее 5,0 МПа для обеспечения рекомендуемых режимов эксплуатации современных медьцинк-алюминиевых катализаторов [8]. Номинальная степень увлажнения сырья составляет 15 % массы водяного пара относительно массы природного газа и позволяет обеспечить надежную профилактику сажеобразования при сохранении устойчивого режима горения [8]. Номинальные температуры нагрева компонентов перед их подачи в смесительную головку составляют: парогазовой смеси 450–550 °С, воздуха 250–500 °С, что обеспечивает надежное воспламенение и высокую скорость парциального окисления газовой смеси, отсутствие конденсации водяного пара при высоких давлениях.

Проиллюстрируем процедуру расчетов на примере идентификации мольных приращений выходных переменных КС от ее входных переменных. В таблице приве-

дены результаты термодинамических расчетов парциального окисления в номинальном режиме, характеризуемом следующими параметрами:  $\alpha = 0,38$ , начальная температура парогазовой смеси 450 °С, начальная температура воздуха 250 °С, давление в КС 6,0 МПа.

Помимо графической интерпретации дополнительным обоснованием допущения о линейности статических характеристик КС стали результаты работы [4], в которой проведена структурная идентификация подобных зависимостей и доказана адекватность линейных моделей. В итоге после проведения стандартных процедур параметрической идентификации с использованием данных термодинамических расчетов модели приращений искомых переменных в окрестности номинального режима имеют следующий вид:

$$\Delta H_2 = 0,91\Delta\alpha; \quad (2)$$

$$\Delta CO_2 = -0,02\Delta\alpha; \quad (3)$$

$$\Delta CO = 0,22\Delta\alpha; \quad (4)$$

$$\Delta(H_2/CO) = 3,5\Delta\alpha; \quad (5)$$

$$\Delta T = -3400\Delta\alpha, \quad (6)$$

где  $\Delta$  – приращение, рассчитываемое как разница между номинальным и фактическим значениями переменной.

Формулы (2–6) описывают зависимости мольных приращений выходных переменных КС от приращения относительного параметра  $\Delta\alpha$  в окрестности  $\pm 10\%$  от номинального  $\bar{\alpha}$ . Для перехода к характеристикам газогенератора, учитывающим непосредственные изменения входных физических переменных, необходимо использовать выражение (1). Дифференцируя (1), найдем

$$\Delta\alpha = \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m_{ок}}\right) \cdot \Delta m_{ок} + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m_r}\right) \cdot \Delta m_r = K_1 \cdot \Delta m_{ок} + K_2 \cdot \Delta m_r, \quad (7)$$

где

$$K_1 = \frac{1}{\bar{m}_r \cdot K_{mо}}$$

$$K_2 = \frac{-\bar{m}_{ок}}{(\bar{m}_r)^2 \cdot K_{mо}}$$

Проводя преобразования (2–6) с учетом (7), можно получить итоговые выражения, связывающие приращения мольных концентраций выходных переменных КС с приращениями массовых расходов входных физических управляющих переменных. Используя предложенную методику, аналогичным образом могут быть найдены и характеристики КС, связывающие приращения массовых расходов выходных переменных от приращений входных переменных.

Рассмотрим применение полученных моделей для анализа



статических характеристик КС при отклонении фактического режима парциального окисления от номинального. Пусть номинальный режим парциального окисления природного газа воздухом характеризуется следующими параметрами:  $\bar{\alpha} = 0,38$  при давлении в камере сгорания 6,0 МПа и начальной температуре газовой смеси 400 °С, массовый расход природного газа составляет 468 кг/ч, воздуха – 3112 кг/ч, степень увлажнения УВГ составляет 15 % массы водяного пара к массе УВГ. Пусть возмущенный режим работы ГСГ характеризуется уменьшением массового расхода окислителя на 5 % и увеличением массового расхода природного газа на 6 %. Требуется оценить изменение выходных реакций КС газогенератора.

Согласно (1)  $\alpha = m_{ок} / (m_r \cdot K_{m0}) = 2956 / (496 \cdot 17,5) = 0,340$ , приращение  $\Delta\alpha = \bar{\alpha} - \alpha = 0,38 - 0,34 = 0,04$ . Подставляя найденное значение в формулы (2–6), найдем:

$$\begin{aligned} \Delta H_2 &= 0,91 \cdot 0,04 \approx 0,036; \\ \Delta CO_2 &= -0,02 \cdot 0,04 \approx -0,001; \\ \Delta CO &= 0,22 \cdot 0,04 \approx 0,009; \\ \Delta(H_2/CO) &= 3,5 \cdot 0,04 \approx 0,14; \\ \Delta T &= -3400 \cdot 0,04 \approx -136. \end{aligned}$$

Рассчитаем значения мольных концентраций генерируемой на выходе КС газовой смеси в возмущенном режиме парциального окисления:

$$\begin{aligned} H_2 &= \bar{H}_2 + \Delta H_2 = \\ &= 0,242 + 0,036 = 0,278; \\ CO_2 &= \bar{CO}_2 + \Delta CO_2 = \\ &= 0,023 - 0,001 = 0,022; \\ CO &= \bar{CO} + \Delta CO = \\ &= 0,143 + 0,009 = 0,152; \\ T &= \bar{T} + \Delta T = 1254 - 136 = 1118 \text{ }^\circ\text{C}. \end{aligned}$$

Относительная погрешность приближенных расчетов, как свидетельствуют данные таблицы, составляет <0,1 %.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены термодинамические расчеты парциального окисления

природного газа воздухом и определены параметры номинального технологического режима в энергоемких малогабаритных ГСГ. Идентифицированы статические характеристики семейства газогенераторов, связывающие приращения мольных концентраций компонентов водородсодержащего газа на выходе КС с приращениями коэффициента избытка окислителя и приращениями массовых расходов сырья и окислителя. Характеристики инвариантны к незначительным изменениям состава природного газа и положению рабочей точки режима парциального окисления.

Найденные зависимости предназначены для использования при проектировании систем автоматического управления параметрами технологического процесса, в частности при выборе и обосновании допустимых статических погрешностей расходомеров – регуляторов массовых расходов компонентов подачи. ■

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. Основы проектирования трехкомпонентного газогенератора синтез-газа // Нефтегазохимия. 2017. № 4. С. 9–16.
2. Патент на полезную модель № 176510 РФ. Малотоннажная установка получения метанола / Ю.В. Загашвили, В.Н. Ефремов, А.М. Кузьмин и др. Заявл. 20.06.2017, опубл. 22.01.2018 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (дата обращения: 11.01.2019).
3. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / под ред. В.П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 263 с.
4. Загашвили Ю.В., Савченко Г.Б., Филимонов Ю.Н. Идентификация статических характеристик газогенератора синтез-газа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16. № 8. С. 556–563.
5. Патент № 2632846 РФ. Способ получения водородсодержащего газа для производства метанола и устройство для его осуществления / Ю.В. Анискевич, А.А. Левихин, Р.Н. Ефремов и др. Опубл. 10.10.2017 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.findpatent.ru/patent/263/2632846.html> (дата обращения 11.01.2019)
6. Анискевич Ю.В., Красник В.В., Филимонов Ю.Н. Выбор режимных параметров процесса парциального газофазного окисления метана кислородом воздуха с целью получения синтез-газа требуемого состава // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82. № 8. С. 1335–1341.
7. Загашвили Ю.В., Левихин А.А., Кузьмин А.М. и др. Технология получения водорода с использованием малогабаритных транспортальных установок на основе высокотемпературных газогенераторов синтез-газа // Вопросы материаловедения. 2017. № 2. С. 92–109.
8. Обзор современных катализаторов синтеза метанола [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=883](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=883) (дата обращения: 11.01.2019).
9. Арутюнов В.С. Окислительная конверсия природного газа. М.: Крассанд, 2011. 590 с.

#### REFERENCES

1. Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M. Foundations of Design of Three-Component Gas Generator of Synthesis Gas. *Neftegazokhimiya = Oil and Gas Chemistry*, 2017, No. 4, P. 9–16. (In Russian)
2. Utility Model Patent No. 176510 RF. Small-Scale Plant of Methanol Production. Yu.V. Zagashvili, V.N. Efremov, A.M. Kuzmin, et al. Submit June 20, 2017, published January 22, 2018 [Electronic source]. Access mode: [http://www1.fips.ru/fips\\_servl/fips\\_servlet](http://www1.fips.ru/fips_servl/fips_servlet) (access date: January 11, 2019). (In Russian)
3. Thermodynamic and Thermophysical Properties of Combustion Products. Edited by V.P. Glushko. Vol. 1. Moscow, VINITI of the Academy of Sciences the USSR, 1972, 263 p. (In Russian)
4. Zagashvili Yu.V., Savchenko G.B., Filimonov Yu.N. Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2015, Vol. 16, No. 8, P. 556–563. (In Russian)
5. Patent No. 2632846 RF. Method of Production of Hydrogen-Containing Gas for the Production of Methanol and the Device for Its Implementation. Yu.V. Aniskevich, A.A. Levikhin, R.N. Efremov, et al. Published October 10, 2017 [Electronic source]. Access mode: <http://www.findpatent.ru/patent/263/2632846.html> (access date: January 11, 2019). (In Russian)
6. Aniskevich Yu.V., Krasnik V.V., Filimonov Yu.N. Choice of the Regime Parameters of the Process of Partial Gas-Phase Oxidation of Methane by Oxygen of Air to Produce Synthesis Gas of the Required Composition. *Zhurnal prikladnoy khimii = Journal of Applied Chemistry*, 2009, Vol. 82, No. 8, P. 1335–1341. (In Russian)
7. Zagashvili Yu.V., Levikhin A.A., Kuzmin A.M., et al. Production of Hydrogen by Using Small-Scale Transportable Plants Based on High-Temperature Syngas Generators. *Voprosy materialovedeniya = Problems of Materials Science*, 2017, No. 2, P. 92–109. (In Russian)
8. Review of Modern Catalysts for Methanol Synthesis [Electronic source]. Access mode: [http://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=883](http://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=883) (access date: January 11, 2019). (In Russian)
9. Arutyunov V.S. Oxidation Conversion of Natural Gas. Moscow, Krasand, 2011, 590 p. (In Russian)