The paper suggests ways to determine the technological parameters of vacuum arc remelting. Usually, the remelting automated control systems measure only the quantities necessary for a direct control, which in certain cases cannot be used to estimate the reliably the technological parameters of melting. Maintaining of certain technological parameters during melting is a pre-requisite for obtaining a quality ingot. These parameters include the melting rate. It cannot be measured directly and it is expected that, with certain values of the electrical power given to the furnace, it will be maintained within the technology described limits, which is not always a fact. The subject of this paper is the method for determination of the rate of melting of a consumable electrode, when, due to the design features of the vacuum arc furnace, it is not possible to measure the weight of the consumable electrode and the ingot. This problem can be solved by installation on the viewing window of the furnace of laser range finders, which in their turn help to determine the amount of the remelted electrode. Knowing the volume of the consumable electrode in the previous and current periods of time one can determine the rate of the going on remelting. Determination of the speed of measurement of the laser range finders is not the least task. The relevance of the data is very important. If measurements are done every four minutes, the system allows us to maintain the rate of melting at the desired level. Since the system of maintaining of the supply of electrical power to the furnace is reasonably stable and rapid heating of the electrode without increasing the power is not feasible, we can expect a stable speed of remelting without any significant deviations from the estimated value.

Keywords: vacuum arc furnace, volume of ingot, volume of electrode, rate of melting, laser rangefinder, electrode approximation, time of measurements, height of ingot, weight of ingot, radius of the electrode

For citation:

Livatkin P. A., Polozhentsev K. A. Estimates of the Melting Rate of a Consumable Electrode Using a Laser Range Finder for Control of Vacuum Arc Remelting, Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 699-704.

DOI: 10.17587/mau.16.699-704

References

1. Polozhentsev K. A., Livatkin P. A., Aleksandrov A. G. Postroenie modeli protsessa upravleniya napryazheniem vakuumnoi dugovoi pechi. Soobshchenie 1 (Building a model of the process control voltage

pechi. Soobsheheme I (Building a model of the process control voltage vacuum arc furnace. Message 1) Izvestiya Vuzov: Chernaya Metallurgiya, 2015, no. 3, pp. 203—206 (in Russian).

2. Lapshin I. V. Avtomatizatsiya dugovykh pechei (Automatisation arc oven), Moscow, Publishing housu of NSU, 2004, 165 p. (in Russian).

3. Mikhailov O. P. Avtomatizirovannyi elektroprivod stankov i promyshlennykh robotov (Automated electric drive machines and industrial robots), Moscow, Mashinostroenie, 1990, 304 p. (in Russian).

4. Tashkinov A. Yu. Razrabotka matematicheskikh modelei i algoritmovi ikh primanni dhy isoladovaniya i upovarshanstvoandelei a provintenovi ikh primanni dhy isoladovaniya i upovarshanstvoandelei nagoritmovi ikh primanni dhy isoladovaniya i upovarshanstvoaniyani.

ritmov i ikh primenenie dlya issledovaniya i usovershenstvovaniya protsessov vakuumnogo dugovogo pereplava (Development of mathematical models and algorithms and their application to the study and improvement of the processes of vacuum arc remelting): Avtoref. dis. ...

kand. tekhn. nauk, Ekaterinburg, 2003, 21 p. (in Russian).

5. **Nekhamin I. S.** *Razrabotka sistemy upravleniya dugovoi pech'yu postoyannogo toka* (Development of control system of arc furnace DC):

Avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Moscow, 2009, 20 p. (in Russian).

6. Fomin A. V. Postroenie imitatsionnoi modeli dugovoi staleplavil'noi pechi (Building a simulation model of the electric arc furnace), Izv. Tul'skogo Gosud. Universiteta. Tekhn. Nauki, 2009, no. 3, pp. 315—321. (in Russian).

7. Q. Jane Wang, Yip-Wah Chung. Vacuum Arc — A Cathodic Arc Operating Without Any Process Gas. Springer US. 2013. P. 3945.

8. Kovaleva M. G., Kolpakov A. J., Poplavsky A. I., Galkina M. E. Effect of vacuum annealing on tribological behavior of paposized dia-

Effect of vacuum annealing on tribological behavior of nanosized dia-

mond-like carbon coatings produced by pulse vacuum-arc method, *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, iss. 6, pp. 481—486.

9. Woodside C. R., King P. E., Nordlund C. Arc Distribution During the Vacuum Arc Remelting of Ti-6Al-4V. Metallurgical and Materials Transactions B, 2013, vol. 44, iss. 1, pp. 154—165.

10. Zhi-jun Yang 杨治军, Hong-chao Kou 寇宏超, Xiao-hua Zhao 赵小华, Jin-shan Li 李金山, Rui Hu 胡锐, Hui Chang 常辉, Lian Zhou 周康. Effect of remelting current on molten pool profile of titaming the state of th um alloy ingot during vacuum arc remelting process, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), 2011, vol. 16, iss. 2, p. 133—136.

11. Shmelev D. L., Barengolts S. A., Shchitov N. N. The effect of cathode deuteration on the parameters of vacuum-arc plasma, *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, iss. 9, pp. 783—786.

12. Belyanchikov L. N. Stabilization of vacuum arc remelting of steels and alloys, Russian Metallurgy (Metally), 2012, vol. 2012, iss. 12,

13. Blinkov I. V., Volkhonskii O. A., Anikin V. N., Konukhov Yu. V. Nanostructured wear-resistant coatings based on multicomponent nitrides and produced by vacuum-arc ion-plasma deposition, Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces, 2012, vol. 48, iss. 6, pp. 649–655.

14. Savostikov V. M., Potekaev A. I., Tabachenko A. N. Physical and technological principles of designing layer-gradient multicomponent surfaces by combining the methods of ion-diffusion saturation and magnetron- and vacuum-arc deposition, *Russian Physics Journal*,

2011, vol. 54, iss. 7, pp. 756—764.

15. **Ryabchikov A. I., Sivin D. O., Bumagina A. I., Struts V. K.**Mechanisms and behavioral regularities of the vacuum-arc microparticles near and on a potential electrode immersed in plasma. Journal of Surface Investigation, X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2013, vol. 7, iss. 6, pp. 1148—1155.

16. Sobol' O. V., Andreev A. A., Grigoriev S. N., Gorban' V. F., Volosova M. A., Aleshin S. V., Stolbovoi V. A. Effect of high-voltage

pulses on the structure and properties of titanium nitride vacuum-arc coatings, *Metal Science and Heat Treatment*, 2012, vol. 54, iss. 3—4, pp. 195—203.

УДК 66-5 DOI: 10.17587/mau.16.704-709

Ю. В. Загашвили, д-р техн. наук, проф., ген. директор, y.zagashvili@yandex.ru,

Ю. В. Анискевич, канд. техн. наук, науч. сотр., А. М. Кузьмин, канд. техн. наук, науч. сотр.,

А. А. Левихин, канд. техн. наук, науч. сотр., **Г. Б. Савченко,** науч. сотр., ООО "ВТР", Санкт-Петербург

Управление технологическим процессом получения синтез-газа в высокотемпературном реакторе

Предложен метод получения синтез-газа заданного состава при реализации перспективной технологии парциального окисления углеводородного горючего. Желаемое соотношение компонентов синтез-газа и требуемая производительность высокотемпературного реактора по синтез-газу обеспечиваются путем связанного регулирования компонентов подачи — массовых расходов углеводородного горючего и окислителя. Метод управления иллюстрируется примером расчета процесса парциального окисления попутного нефтяного газа кислородом.

Ключевые слова: парциальное окисление, углеводородное горючее, окислитель, синтез-газ, высокотемпературный реактор, водород, монооксид углерода, термодинамические расчеты, соотношение компонентов, коэффициент избытка окислителя, химический состав горючего, производительность реактора

Введение

Синтез-газ, представляющий собой смесь водорода и монооксида углерода, используется в качестве сырья для химической промышленности или как промежуточный продукт в технологиях переработки природных и попутных газов нефтяных месторождений в моторные топлива [1—5].

Проблемам совершенствования традиционных и созданию новых технологий получения синтезгаза посвящены многочисленные исследования и разработки. В основе традиционных технологий лежат базовые процессы получения синтез-газа (паровая и автотермическая конверсия). В этом направлении работают фирмы Exxon, BG Technology, British Petroleum (BP), ICI Katalco. Работы по созданию новых технологий производства синтез-газа проводят Air Products and Chemical Inc., Babcock & Wilcox Co., Atlantic Richfield Co (ARCO) и др.

Одной из наиболее перспективных технологий является парциальное окисление углеводородного сырья кислородом или кислородом воздуха в малогабаритных высокоэнергоемких высокотемпературных химических реакторах (ВТР), в которых при варыровании режимных параметров можно получать синтез-газ различного состава и количества [6—11].

Принципиально получение синтез-газа возможно практически из любого углеводородного сырья, но наиболее актуально и экономически целесообразно использование углеводородных газов $(YB\Gamma)$ — метана, природного и попутного газа нефтяных месторождений $(\Pi H\Gamma)$.

Важнейшим химическим соединением, входящим в состав УВГ и определяющим в конечном итоге балансовые соотношения продуктов парциального окисления УВГ, является метан. Объемная доля метана, имеющего наибольшее водородное число среди входящих в состав УВГ химических соединений, может варьироваться в широких пределах от 40 до 95 % в зависимости от типа используемого УВГ. Поэтому и соотношение объемных долей компонентов синтез-газа (водорода H_2 и монооксида углерода CO) и массовое содержание синтез-газа по отношению к балластным газам (водяному пару, диоксиду углерода, оксиду азота) в продуктах парциального окисления УВГ может значительно изменяться.

Традиционный способ управления технологическим процессом получения синтез-газа заданного состава состоит в стабилизации параметров номинального режима парциального окисления. При этом расчетные значения массовых расходов горючего и окислителя, обеспечивающие требуемую производительность реактора по синтез-газу и желаемое соотношение его компонентов, поддерживаются постоянными с помощью расходомероврегуляторов подачи компонентов [6, 11].

Недостатком традиционного способа является невозможность учета изменения энтальпии горючего, особенно в случае использования ПНГ с изменяющимися концентрациями входящих в его состав химических соединений, главным образом метана.

Поскольку для каждой конкретной технологии органического синтеза требования, предъявляемые к соотношению водорода и монооксида углерода в получаемом синтез-газе, различны (например, в процессе Фишера—Тропша при получении синтетического бензина желаемое соотношение объемных долей синтез-газа $C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}}=2$ [4]), то актуальной проблемой является обеспечение требуемого состава синтез-газа с учетом ряда дополнительных технологических ограничений.

Постановка задачи

Входными управляющими воздействиями на ВТР являются массовые расходы подачи компонентов. Давление подачи и температура подогрева компонентов оказывают незначительное влияние на состав синтез-газа в окрестности номинальных значений соотношения компонентов [6, 11].

Не умаляя общности, будем рассматривать в дальнейшем ПНГ в качестве УВГ, а кислород — в качестве окислителя. Обозначим массовый расход ПНГ $m^{\Pi\Pi\Gamma}$, массовый расход кислорода m^{κ} .

Одним из основных параметров, характеризующих технологический режим парциального окисления УВГ, является коэффициент избытка окислителя, рассчитываемый по формуле

$$\alpha = m^{K}/(m^{\Pi H \Gamma} K_{m0}), \tag{1}$$

где $K_{m0} = 2,9...4,2$ — стехиометрическое значение соотношения компонентов для пары кислород— ПНГ, изменяющееся в зависимости от концентрации метана в ПНГ.

Целью управления является оптимизация основного технологического режима работы BTP — режима получения синтез-газа заданного состава и с заданной производительностью в условиях изменяющихся характеристик ПНГ при наличии технологических ограничений.

Основным технологическим ограничением является необходимость нахождения параметра α в заданном диапазоне. Как правило,

$$\alpha = \overline{\alpha} \mp 10 \%, \tag{2}$$

где $\overline{\alpha}$ — значение коэффициента избытка окислителя в номинальном режиме, которое выбирается по данным предварительных термодинамических расчетов для конкретной пары горючее—окислитель исходя из условий обеспечения заданного состава синтез-газа, предотвращения сажеобразования, ограничения температуры газа на выходе реактора и других факторов [6, 11].

Метод управления

Описание исходных данных. Пусть известен химический состав ПНГ и диапазон изменения объемных долей составляющих его химических соединений, главным образом метана. В существующих установках получения синтез-газа компоненты, поступающие в реактор, часто увлажняются для снижения образования сажи при парциальном окислении УВГ. Доля паров воды, поступающая с ос-

новными компонентами в ВТР, может составлять до 20 % по массе от расхода УВГ в зависимости от технологической схемы и конструктивных особенностей установки. Пример физико-химического состава ПНГ (мольное содержание компонентов в процентах) приведен ниже:

Метан
Этан
Пропан
и-Бутан
н-Бутан
и-Пентан0,26
н-Пентан
Алканы C_{6+}
Циклоалканы
Арены
Азот
Кислород
Водород
Гелий
Углекислый газ
Вода
Б ОДШ

Стехиометрические соотношения компонентов для пары кислород—ПНГ представлены в таблице.

На основании имеющихся данных проводится предварительный термодинамический расчет концентраций компонентов и других характеристик синтез-газа на выходе камеры сгорания ВТР при различных сочетаниях параметров режима парциального окисления ПНГ — коэффициента избытка окислителя, давления в камере сгорания, объемной доли метана в ПНГ, степени увлажнения ПНГ, температуры подогрева компонентов подачи. Результаты расчетов служат исходными данными для проектирования реактора, они же используются при обосновании номинального технологического режима парциального окисления УВГ и в предлагаемом алгоритме управления процессом.

В качестве примера на рис. 1—3 (см. третью сторону обложки) приведены фрагменты термодинамических расчетов, проведенных с учетом вариаций состава ПНГ для исходных данных (см. выше) на основе алгоритмов и методик, изложенных в справочнике [12]. На рис. 1—3 (см. третью сторону обложки) показано влияние изменения состава ПНГ на выход основных составляющих синтез-газа при нагреве компонентов подачи до 500 K, добавке воды в количестве 20 % от массового расхода ПНГ и давлении в камере сгорания 5,0 МПа.

Описание алгоритма управления. Предполагается, что завершены переходные процессы, связанные с выводом реактора на номинальный расчетный режим, характеризуемый заданным химическим со-

Стехиометрические соотношения ПНГ и кислорода

Показатели	Значения				
Концентрация метана, об. % Массовое стехиометрическое соотношение компонентов без добавки воды Массовое стехиометрическое соотношение компонентов с добавкой 20 % воды к массе ПНГ	55 3,65 2,92		75 3,85 3,08	85 3,96 3,17	95 4,11 3,29

ставом ПНГ, рабочим давлением и температурой подачи компонентов. Также с помощью расходомеров-регуляторов обеспечены расчетные номинальные значения массовых расходов подачи компонентов $m^{\Pi H \Gamma}$ и m^{K} , их номинальное соотношение $\overline{\alpha}$ и номинальная расчетная производительность реактора по синтез-газу M.

Тогда алгоритм управления процессом следующий.

Шаг 1. Определение текущей объемной доли метана в ПНГ в линии подачи горючего $C^{\Pi H \Gamma}(n)$, где n — произвольный номер такта опроса газоанализатора.

Изменение состава ПНГ происходит сравнительно редко, поэтому длительность интервала опроса составляет не менее 10 мин.

Шаг 2. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов значения стехиометрического соотношения компонентов $K_{m0}(n)$.

Для пары кислород—ПНГ справочные данные приведены в таблице.

Шаг 3. Определение по данным термодинамических расчетов при α (q-1), $C^{\Pi H \Gamma}(n)$ отношения объемных долей компонентов синтез-газа (C^{H_2}/C^{CO}) на шаге q внутреннего цикла управления, где q=1,2,... целое положительное число, характеризующее число внутренних итераций алгоритма до выполнения условия (3). При q=1 имеем $\alpha(0)=\alpha(n-1)$.

Для пары кислород—ПНГ эти отношения могут определяться по графикам, приведенным на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Длительность одного цикла расчета в зависимости от производительности и геометрии реактора, а также рабочего давления должна находиться в диапазоне 0,2...0,5 с.

Шаг 4. Определение $\Delta(q) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(q) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_{\text{H}}$, где $(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_{\text{H}}$ — отношение объемных долей компонентов синтез-газа в номинальном режиме.

Шаг 5. Проверка условия

$$\Delta(q) \mid < \Delta_{\mathrm{H}}, \tag{3}$$

где $\Delta_{\rm H}$ — заданное в технических условиях значение. Если условие (3) выполняется при q=1, то управление на текущем такте n остается неизменным и, соответственно, массовые расходы компонентов подачи не корректируются до следующего анализа состава ПНГ, при этом $m^{\Pi H \Gamma}(n) = m^{\Pi H \Gamma}(n-1)$, $m^{\rm K}(n) = m^{\rm K}(n-1)$, $\alpha(n) = \alpha(n-1)$.

Если условие (3) выполняется при $q \ge 2$, то переходят к шагу 9 алгоритма.

Если условие (3) не выполняется, то переходят к следующему шагу алгоритма.

Шаг 6. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов приращения $\Delta\alpha(q)$, обеспечивающего желаемое соотношение объемных долей компонентов синтез-газа при текущем значении $C^{\Pi H \Gamma}(n)$.

Для пары ПНГ—кислород это приращение можно определить по соответствующему графику на рис. 1 (см. третью сторону обложки).

Для упрощения алгоритма целесообразно аппроксимировать типичную для различных составов ПНГ гладкую нелинейную зависимость отношений ($C^{\rm H_2}/C^{\rm CO}$) от параметра α . Как следует из рис. 1 (см. третью сторону обложки), приближенная зависимость для пары кислород—ПНГ в окрестности рекомендуемого значения $\overline{\alpha}=0,35$ имеет вид

$$\Delta\alpha(q) = 0.25\Delta(q). \tag{4}$$

Для обеспечения гарантированной сходимости вычислительного процесса целесообразно ввести коэффициент ослабления сигнала, например, в виде $\gamma = q^{-0.5}$. Тогда формула (4) примет вид

$$\Delta\alpha(q) = \gamma(q) \cdot 0.25 \cdot \Delta(q). \tag{5}$$

Шаг 7. Расчет скорректированного значения коэффициента избытка окислителя

$$\alpha(q) = \alpha(q-1) + \Delta\alpha(q). \tag{6}$$

Приведем доказательство сходимости процесса идентификации (5), (6) по типу стохастической аппроксимации [13, с. 301].

Покажем, что $\lim_{q\to\infty} \Delta\alpha(q)=0$. Действительно, величина $\Delta(q)$ в формуле (5) ограничена по физическому смыслу как приращение соотношения объемных долей компонентов синтез-газа в составе углеводородного газа на выходе камеры сгорания ВТР.

В рассматриваемом случае, как следует из рис. 1 (см. третью сторону обложки), для заданного диапазона изменения параметра $\alpha=0,35\mp0,05$ и изменения объемной доли метана в ПНГ в диапазоне от 0,55 до 0,95 максимальное значение $\Delta<0,3$.

При $\gamma(q)=q^{-0.5}$ имеем $\lim_{q\to\infty}\gamma(q)=0$, откуда следует исходное утверждение $\lim_{q\to\infty}\Delta\alpha(q)=0$. Но тогда и $\alpha(q)$ в формуле (6) стремится к своему пределу при увеличении числа итераций q, что и требовалось доказать.

Шаг 8. Проверка технологического ограничения

$$|\alpha(q) - \tilde{\alpha}| \le 0.05. \tag{7}$$

Если условие (7) не выполняется, то в силу технологических ограничений реактор не может обеспечить желаемое качество синтез-газа. При корректном выборе номинального технологического режима невыполнение условия (7) является признаком нештатной ситуации, обусловленной резким изменением химического состава ПНГ, и требует вмешательства оператора.

В случае выполнения условия (7) имеем q = q + 1 и осуществляется возврат к шагу 3 алгоритма.

Шаг 9. Завершение расчета скорректированного значения коэффициента избытка окислителя, обеспечивающего требуемое соотношение компонентов синтез-газа при изменившемся составе ПНГ, при этом $\alpha(n) = \alpha(q)$.

Счетчик внутреннего цикла расчетов возвращается в исходное начальное состояние q = 1.

Шаг 10. Определение по данным предварительных термодинамических расчетов значений массовых долей компонентов синтез-газа — водорода

 $C_{\rm M}^{{
m H}_2}$ и монооксида углерода $C_{\rm M}^{{
m CO}}$ — в водородсодержащем газе на выходе камеры сгорания реактора при $\alpha=\alpha(n)$.

Для пары кислород—ПНГ на рис. 2, 3 (см. третью сторону обложки) приведены типовые графики изменения соответствующих массовых долей.

Шаг 11. Расчет скорректированного значения массового расхода ПНГ:

$$m^{\Pi H \Gamma}(n) = M/[(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_{M}^{H_{2}} + C_{M}^{CO})].$$
 (8)

Приведем вывод формулы (8). Запишем выражение массового расхода синтез-газа на выходе реактора в виде

$$M = M^{T}(C_{M}^{H_{2}} + C_{M}^{CO}),$$

где $M^{\Gamma} = m^{K} + m^{\Pi H \Gamma}$ — суммарный массовый расход компонентов подачи на входе в реактор; $C_{\rm M}^{\rm H_2}$, $C_{\rm M}^{\rm CO}$ — массовые доли компонентов синтез-газа в углеводородном газе на выходе камеры сгорания реактора.

Подставляя выражение M^{Γ} , получим

$$M = (m^{K} + m^{\Pi H \Gamma})(C_{M}^{H_{2}} + C_{M}^{CO}).$$

Из формулы (1) при известном коэффициенте избытка окислителя найдем

$$m^{K} = \alpha K_{m0} m^{\Pi H \Gamma}$$
.

Подставляя m^{K} в выражение M и преобразовывая, окончательно получим

$$m^{\Pi H \Gamma} = M/[(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_{M}^{H_2} + C_{M}^{CO}).$$

Шаг 12. Расчет скорректированного значения массового расхода кислорода на основе формулы (1):

$$m^{K}(n) = \alpha(n)K_{m0}(n)m^{\Pi H \Gamma}(n). \tag{9}$$

Таким образом, сначала на основе применения конечно сходящихся рекуррентных процедур по типу стохастической аппроксимации рассчитывается значение коэффициента избытка окислителя $\alpha(n)$, при котором достигается требуемое соотношение компонентов синтез-газа. Затем по формулам (8), (9) рассчитываются скорректированные значения массовых расходов подачи компонентов $m^{\rm K}(n)$, $m^{\rm ПН}\Gamma(n)$, обеспечивающие заданную производительность реактора по синтез-газу.

Пример расчета

Параметры номинального режима: объемная доля метана в ПНГ $C^{\Pi H \Gamma}=0.85$, содержание паров воды составляет дополнительно 20 % к массе ПНГ, $K_{m0}=3.17, \ \overline{\alpha}=0.35, \ m^{\Pi H \Gamma}=145.12 \ \text{г/c}, \ m^{\text{K}}=161.01 \ \text{г/c},$ давление газа в КС — 5,0 МПа. Заданный диапазон изменения объемных долей метана в ПНГ — от 0,55 до 0,95. Требуется обеспечить отношение компонентов синтез-газа ($C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}}$)_н = $1.75 \pm 0.03, \ \Delta_{\text{H}}=0.03$ и производительность реактора по синтез-газу $M=200 \ \text{г/c}$.

Проведем пошаговый расчет скорректированных сигналов управления.

- 1. Пусть на такте n опроса газоанализатора объемная доля метана составила $C^{\Pi H \Gamma}(n) = 0,65$. Пусть также, не умаляя общности, значения настроек регуляторов-расходомеров и параметров технологического режима на (n-1)-м такте соответствовали номинальному режиму.
- 2. По данным таблицы найдем значение $K_{m0}(n) = 2.99$.
- 3. При q=1 имеем α $(q-1=0)=\alpha(n-1)=$ $=\overline{\alpha}=0,35$. По рис. 1 (см. третью сторону обложки) определим текущее значение ($C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}}$)(1) = 1,63.

4.
$$\Delta(1) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(1) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_{\text{H}} = 1,63 - 1,75 = -0,12.$$

5. $|\Delta(1)| = 0.12 > 0.03$, откуда следует необходимость корректировки коэффициента избытка окислителя.

6.
$$\Delta\alpha(1) = 1 \cdot 0.25 \cdot \Delta(1) = 0.25 \cdot (-0.12) = -0.03$$
.

7.
$$\alpha(1) = \alpha(n-1) + \Delta\alpha(1) = 0.35 - 0.03 = 0.32$$
.

- $8. |\alpha(1) \tilde{\alpha}| = |0,35 0,32| = 0,03 \le 0,05$, т. е. технологическое ограничение соблюдается и возможно продолжение расчета на шаге q = q + 1 = 2.
- 9. При $\alpha(1)=0.32$ и $C^{\Pi H\Gamma}(n)=0.65$ найдем ($C^{\rm H_2}/C^{\rm CO}$)(2) = 1.70.

10.
$$\Delta(2) = (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})(n=2) - (C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})_{\text{H}} = 1.70 - 1.75 = -0.05.$$

11. $|\Delta(2)| = 0.05 > 0.03$, откуда следует необходимость дальнейшей корректировки коэффициента избытка окислителя.

12.
$$\Delta\alpha(2) = 2^{-0.5} \cdot 0.25 \cdot \Delta(2) = 0.707 \cdot 0.25 \cdot (-0.05) \approx 0.01$$
.

- 13. $\alpha(2) = \alpha(1) + \Delta\alpha(2) = 0.32 0.01 = 0.31$.
- $14. \, |\alpha(2)-\widetilde{\alpha}\,|=0.35-0.31=0.04\leqslant 0.05,$ т. е. возможно продолжение расчета на шаге q=q+1=3.
- 15. При $\alpha(2)=0.31$ и $C^{\Pi H \Gamma}(n)=0.65$ найдем ($C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}}$)(3) = 1.74.

16.
$$\Delta(3) = (C^{H_2}/C^{CO})(3) - (C^{H_2}/C^{CO})_H = 1,74 - 1,75 = -0,01.$$

- $17. |\Delta(3)| = 0.01 < 0.03$, т. е. дальнейшей корректировки коэффициента избытка окислителя не требуется и переходим к шагу 9 алгоритма.
- 18. Итоговое скорректированное значение коэффициента избытка окислителя $\alpha(n) = \alpha(2) = 0,31$. Счетчик внутреннего цикла возвращаем в исходное состояние q = 1.
- 19. В соответствии с шагом 10 алгоритма по графикам на рис. 2, 3 (см. третью сторону обложки) определим при $\alpha(n)=0.31$ и $C^{\Pi H \Gamma}(n)=0.65$ массовые концентрации водорода $C_{\rm M}^{\rm H_2}=0.074$ и монооксида углерода $C_{\rm M}^{\rm CO}=0.585$.

20. Рассчитаем скорректированное значение массового расхода ПНГ по формуле (8):

$$m^{\Pi H \Gamma}(n) = M/[(1 + \alpha(n)K_{m0}(n))(C_{M}^{H_2} + C_{M}^{CO})] =$$

= 200/[(1 + 0,31 \cdot 2,99) \cdot (0,074 + 0,585)] = 157,50 \cdot \cdot c.

21. Рассчитаем скорректированное значение массового расхода кислорода по формуле (9):

$$m^{K}(n) = \alpha(n)K_{m0}(n)m^{\Pi H \Gamma}(n) =$$

= 0,31 \cdot 2,99 \cdot 157,50 = 145,99 \cdot \cdot/c.

Заключение

Предложен метод управления технологическим процессом получения синтез-газа путем парциального окисления УВГ в управляемом высокотемпературном реакторе.

Метод базируется на использовании данных предварительных термодинамических расчетов по определению состава синтез-газа в различных режимах парциального окисления для заданных пар компонентов подачи УВГ и окислителя.

Путем связанного управления массовыми расходами компонентов подачи горючего и окислителя метод позволяет обеспечить желаемое соотношение компонентов синтез-газа — водорода и монооксида углерода — при одновременном поддержании требуемого массового расхода синтез-газа в условиях значительного изменения химического состава УВГ.

Приведен пример расчета корректирующего управления расходомерами-регуляторами подачи компонентов в камеру сгорания высокотемпературного реактора для пары ПНГ—кислород.

Доказана сходимость вычислительного алгоритма, обеспечивающего расчет скорректированного значения коэффициента избытка окислителя.

Метод имеет важное прикладное значение для предприятий нефтехимической промышленности, использующих синтез-газ в качестве промежуточного сырья для синтеза целевых продуктов. Он реализован в установке по производству водорода (рис. 4, см. третью сторону обложки) путем парциального окисления дизельного топлива кислородом [11].

Список литературы

- 1. **Брагинский О. Б.** Мировой нефтегазовый комплекс. М.: Наука, 2004. 605 с.
- 2. **Арутюнов В. С.** Роль нефтехимии в инновационном развитии России // Газохимия. 2008. № 1. С. 11-21.
- 3. **Шурупов С. В.** К вопросу утилизации попутного нефтяного газа // Газохимия. 2008. № 1. С. 42—48.
- 4. **Колбановский Ю. А.** Некоторые вопросы создания экологически чистых топлив для карбюраторных двигателей // Нефтехимия. 2002. Т. 42, № 2. С. 154—159.
- 5. **Pena M. A., Gomes J. P., Fierro J. L. G.** New catalytic routes for syngas and hydrogen production // Applied Catalysis. 1996. V. A144. P. 7—57.
- 6. **Анискевич Ю. В., Красник В. В., Филимонов Ю. Н.** Выбор режимных параметров процесса парциального газофазного окисления метана кислородом воздуха с целью получения син-

тез-газа требуемого состава // Журнал прикладной химии. 2009. Т. 82, Вып. 8. С. 1335—1341.

- 7. **Устройство** для получения синтез-газа. Патент РФ № 2523824.
 - 8. Устройство генератора синтез-газа. Патент РФ № 2535121.
 - 9. Способ получения синтез-газа. Патент РФ № 2521377.
- 10. **Реактор** для получения непредельных углеводородов, преимущественно этилена. Патент **РФ** № 2369431.
- 11. **Савченко Г. Б.** Способ получения водорода на основе критических технологий // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 1. С. 21—26.
- 12. **Термодинамические** и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНИТИ АН СССР, 1971. 263 с.
- 13. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А. А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

Control of the Technological Process of the Synthesis Gas Production in a High-Temperature Reactor

Yu. V. Zagashvili, y.zagashvili@yandex.ru⊠, J. V. Aniskevich, A. M. Kuzmin, A. A. Levikhin, G. B. Savchenko, VTR Co., St. Petersburg, 199226, Russian Federation

Corresponding author: Zagashvili Yury V., Ph. D., VTR Co., St. Petersburg, 199226, Russian Federation, e-mail: y.zagashvili@yandex.ru

Received on May 12, 2015 Accepted on May 29, 2015

Synthesis gas, which includes a mixture of hydrogen and carbon monoxide, is an important intermediate component in the synthesis of the commodity petrochemicals such as dimethyl ether, methanol, motor oils and fuels. One of the most promising technologies for production of the synthesis gas is partial oxidation of a hydrocarbon fuel with a lack of oxidant, which is realized in a controlled high temperature reactor (HTR). The authors propose a method for production of the synthesis gas of a given composition, which ensures the desired ratio of the volume fractions of hydrogen and carbon monoxide, and the required power of HTR. These parameters are especially important for the use of the hydrocarbon fuels with a varying concentration of components in their chemical composition, which is typical for the associated gas in the oil fields (PNG). For example, in PNG the volumetric content of methane as a component with the largest hydrogen number may vary within a wide range from 0.4 up to 0.95. Control of the technological process is implemented by an associated regulation of the components, which are used in HTR, — mass flows of the hydrocarbon fuel and oxidizer. In the control algorithm the operational information about the current chemical composition of the fuel and the preliminary data of the thermodynamic calculations of a given pair of the fuel-oxidizer are used. A computational algorithm was developed intended for implementation of the process in real time. It ensures convergence of the calculation process of the control signals. The method is illustrated by an example of the calculation process of a partial oxidation by APG oxygen.

Keywords: partial oxidation, hydrocarbon fuel, oxidant, synthesis gas, high temperature reactor, control of the composition of the synthesis gas, hydrogen, carbon monoxide, methane, thermodynamic calculations, ratio of components, coefficient of excess oxidant, chemical composition of fuel, reactor output

For citation:

Zagashvili Yu. V., Aniskevich J. V., Kuzmin A. M., Levikhin A. A., Savchenko G. B. Control of the Technological Process of the Synthesis Gas Production in a High-Temperature Reactor, *Mekhatronika*, *Avtomatizatsiya*, *Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 10, pp. 704—709.

DOI: 10.17587/mau.16.704-709

Reference

- 1. **Braginskij O. B.** *Mirovoj neftegazovyj kompleks* (Global oil and gas complex), Moscow, Nauka, 2004, 605 p. (in Russian).
- 2. **Arutjunov V. S.** *Rol' neftehimii v innovacionnom razvitii Rossii* (The role of petrochemicals in the innovative development of Russia), Gazohimija, 2008, no. 1, pp. 11–21 (in Russian).
- 3. **Shurupov S. V.** *K voprosu utilizacii poputnogo neftjanogo gaza* (To the question of associated petroleum gas utilization), Gazohimija, 2008, no. 1, pp. 42—48 (in Russian).
- 4. **Kolbanovskij Ju. A.** *Nekotorye voprosy sozdanija jekologicheski chistyh topliv dlja karbjuratornyh dvigatelej* (Some questions of creating cleaner fuels for gasoline engines), Neftehimija, 2002, vol. 42, no. 2, pp. 154—159 (in Russian).
- 5. **Pena M. A., Gomes J. P., Fierro J. L. G.** New catalytic routes for syngas and hydrogen production, *Applied Catalysis*, 1996, vol. A144, pp. 7—57.
- 6. Aniskevich Ju. V., Krasnik V. V., Filimonov Ju. N. Vybor rezhimnyh parametrov processa parcial'nogo gazofaznogo okislenija me-

tana kislorodom vozduha s cel'ju poluchenija sintez-gaza trebuemogo sostava (The choice of regime parameters of the process gas-phase partial oxidation of methane with oxygen of air to produce syngas of desired composition), *Zhurnal Prikladnoj Himii*, 2009, vol. 82, iss. 8, S. 1335—1341 (in Russian).

- 7. **Ustrojstvo** *dlja poluchenija sintez-gaza* (A device for syngas producing), Patent RF № 2523824 (in Russian).
- 8. **Ustrojstvo** *generatora sintez-gaza* (The generator of syngas), Patent RF № 2535121 (in Russian).
- 9. **Sposob** *poluchenija sintez-gaza* (Method of syngas producing), Patent RF № 2521377 (in Russian).
- 10. **Reaktor** dlja poluchenija nepredel'nyh uglevodorodov, preimushhestvenno jetilena (The reactor for producing unsaturated hydrocarbons, preferably ethylene), Patent RF № 2369431 (in Russian).
- 11. **Savchenko G. B.** *Sposob poluchenija vodoroda na osnove kriticheskih tehnologij* (A method for producing hydrogen based on critical technologies), *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2014, no. 1, pp. 21—26 (in Russian).
- 12. **Glushko V. P.** ed. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svojstva produktov sgoranija*, vol. 1 (Thermodynamic and thermophysical properties of combustion products), Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, 263 p. (in Russian).
- 13. **Krasovsky A. A.** ed. *Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravlenija* (Handbook of automatic control theory), Moscow, Nauka, 1987, 712 p. (in Russian).