

Ю. В. Загашвили, д-р техн. наук, проф., ген. директор, y.zagashvili@yandex.ru,
Г. Б. Савченко, науч. сотр., Ю. Н. Филимонов, канд. техн. наук, проф., гл. конструктор,
ООО "ВТР", Санкт-Петербург

Идентификация статических характеристик газогенератора синтез-газа

Предложена методика идентификации статических характеристик газогенераторов синтез-газа, позволяющая получить зависимости выходных переменных (массовых расходов компонентов синтез-газа — водорода и монооксида углерода) от входных переменных — массовых расходов углеводородного горючего и окислителя. Методика иллюстрируется примером расчета характеристик газогенератора типа высокотемпературного реактора, в котором реализуется технология парциального окисления дизельного топлива кислородом.

Ключевые слова: газогенератор, камера сгорания, парциальное окисление, углеводородное горючее, окислитель, синтез-газ, водород, термодинамические расчеты, концентрации компонентов, идентификация, статические характеристики, модели приращений

Введение

Синтез-газ, представляющий собой смесь водорода H_2 и монооксида углерода CO , используется в качестве сырья для химической промышленности или как промежуточный продукт в технологиях переработки природных и попутных газов нефтяных месторождений в товарные углеводороды, например моторные топлива. Проблемам совершенствования традиционных и создания новых технологий получения синтез-газа посвящены многочисленные исследования и разработки [1].

Одной из наиболее перспективных технологий является парциальное окисление углеводородного горючего (УВГ) в высокоэнергоемких, малогабаритных, управляемых газогенераторах — высокотемпературных реакторах (ВТР) [2—6]. ВТР является основным узлом установок получения синтез-газа, в котором происходит термическое разложение исходного УВГ и цепь химических реакций с образованием синтез-газа и балластных газов (двуокиси углерода CO_2 , водяного пара H_2O , оксидов азота). Поэтому автоматическое управление режимами работы ВТР является важным способом повышения эффективности технологического процесса получения синтез-газа. Оно позволяет обеспечить многорежимность установок, квазиоптимальность технологических процессов в условиях изменяющихся характеристик УВГ и нестационарности собственных параметров установки, возможность программного изменения производительности и др.

Для решения перечисленных задач необходимо знание математических моделей процессов в реакторах, связывающих входные управляющие воздей-

ствия с выходными управляемыми переменными. Однако традиционно используемые проектировщиками математические модели — уравнения равновесия (диссоциации), уравнения материального баланса (сохранения вещества), уравнения Дальтона и уравнения сохранения энергии — описывают равновесные термодинамические процессы в реакторах [7]. На их основе рассчитывают параметры режимов процессов горения, концентрации компонентов водородсодержащего газа на выходе реакторов, необходимую производительность реакторов по синтез-газу, номинальные значения массовых расходов компонентов подачи (горючего, окислителя, воды). Но эти модели не позволяют непосредственно проводить синтез законов управления технологическими процессами и моделирование режимов работы химических реакторов.

Поэтому целью настоящего исследования является разработка методики структурной и параметрической идентификации ВТР и получение зависимостей, связывающих массовые расходы компонентов синтез-газа с массовыми расходами компонентов подачи.

Описание объекта исследования

ВТР является управляемым химическим реактором и представляет собой охлаждаемую модульную конструкцию, состоящую из следующих основных элементов: блока подачи горючего и окислителя, устройства зажигания, камеры сгорания (КС), блока впрыска воды, испарительной камеры (ИК), блока очистки от твердой фазы, блока автоматики [3—6].

Входными управляющими воздействиями для ВТР являются массовые расходы УВГ и окислителя, подаваемые в КС, а также массовый расход воды, подаваемой в ИК. Выходными управляемыми переменными являются массовые расходы H_2 и CO , отношение объемных концентраций водорода к монооксиду углерода C^{H_2}/C^{CO} в получаемом синтез-газе и его массовый расход на выходе ВТР.

Заметим, что в ИК за счет впрыска воды происходит только охлаждение водородсодержащего газа, поступающего из КС. При этом массовые расходы компонентов собственно синтез-газа (CO , H_2) не изменяются. Поэтому количественные и качественные параметры синтез-газа идентичны и для КС, и для ВТР в целом.

В качестве УВГ могут использоваться любые жидкие и газообразные углеводороды, а в качестве окислителя — кислород или кислород воздуха. Подача горючего, окислителя и воды осуществляется системами подачи компонентов, исполнительными элементами которых являются расходомеры-регуляторы (РХМ), обеспечивающие плавное и точное регулирование массовых расходов компонентов.

Основными технологическими режимами работы ВТР являются: режим стабилизации — автоматическое поддержание заданных массовых расходов горючего, окислителя и их соотношения, режим оптимизации — автоматическое регулирование массовых расходов горючего, окислителя и их соотношения для обеспечения требуемого количественного и качественного состава синтез-газа.

Методика идентификации

Исходными данными для проведения исследований являются химический состав применяемого УВГ и заданный диапазон изменения параметров рабочего режима в камере сгорания ВТР, который уточняется на стадии подготовки технического задания на проектирование ВТР в зависимости от целевого назначения синтез-газа.

На *первом этапе* идентификации проводится серия многофакторных термодинамических расчетов, заключающихся в расчете объемных и массовых концентраций компонентов в водородсодержащем газе на выходе КС (H_2 , CO , CO_2 , H_2O , оксидов азота), температуры газа и других вспомогательных характеристик в широком диапазоне изменения параметров рабочего режима ВТР и химического состава горючего.

Расчеты проводятся с помощью пакета прикладных программ, разработанного на основе данных и методик, изложенных в справочнике [7].

На *втором этапе* по результатам анализа проведенных термодинамических расчетов обосновывается выбор номинального режима парциального окисления. Прежде всего, из условий предотвращения сажеобразования (К-фазы) и обеспечения требуемого соотношения компонентов синтез-газа

определяется основной технологический параметр — коэффициент избытка окислителя α . Теоретическое значение коэффициента рассчитывается по формуле

$$\alpha = m^{OK}/(m^F K_{m0}), \quad (1)$$

где K_{m0} — стехиометрическое значение соотношения компонентов для заданной пары окислитель — УВГ; m^{OK} — массовый расход окислителя; m^F — массовый расход углеводородного горючего.

На этом же этапе выбираются и другие параметры номинального режима: давление в КС, температура подогрева УВГ и окислителя, степень увлажненности УВГ, массовые расходы подачи компонентов, в том числе номинальный массовый расход подачи воды в ИК для обеспечения заданной температуры водородсодержащего газа на выходе ВТР.

На *третьем этапе* проводятся повторные термодинамические расчеты, но в более узком диапазоне — не более 10 % от номинальных значений — изменения параметров, оказывающих существенное влияние на режим парциального окисления УВГ.

На *четвертом этапе* проводится собственно структурная и параметрическая идентификация статических характеристик ВТР в окрестностях номинального технологического режима, а именно:

- идентификация зависимостей, связывающих массовые расходы компонентов водородсодержащего газа на выходе КС с массовыми расходами горючего и окислителя на входе в КС;
- идентификация зависимости температуры водородсодержащего газа на выходе КС от параметров α и входных управляющих воздействий.

Результаты расчетов, полученные на третьем этапе, позволяют перейти к приращением соответствующих концентраций и температуры в окрестности параметров выбранного номинального режима работы ВТР и далее использовать их в качестве исходных данных для нахождения искомых статических характеристик путем применения стандартных процедур определения эмпирических зависимостей [8].

Пример

Рассмотрим применение изложенной методики к задаче определения статических характеристик ВТР для компонентов подачи кислород — дизельное топливо. Такая пара компонентов может использоваться, например, для получения синтез-газа с последующей каталитической конверсией CO в установках по производству водорода [9].

В соответствии с методикой на первом этапе проведены численные эксперименты в широком диапазоне параметров режима работы ВТР — соотношения компонентов подачи, давлений в КС, температур подогрева и степени увлажнения компонентов. Фрагменты термодинамических расчетов приведены на рис. 1—4.

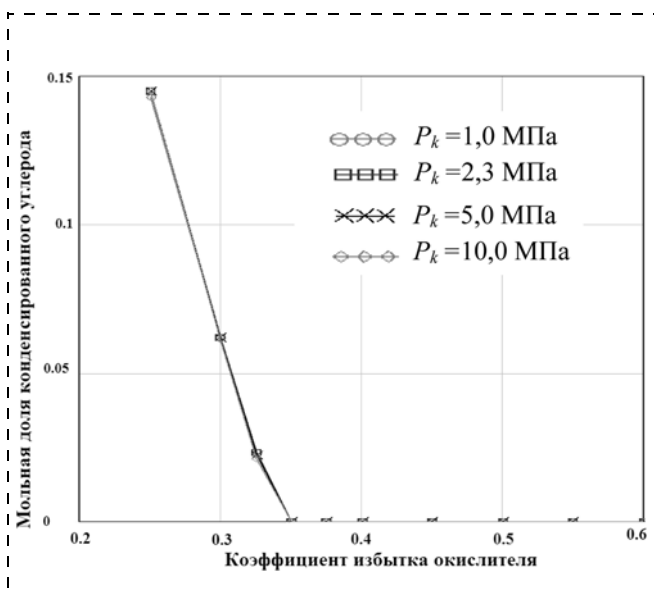


Рис. 1. Зависимость мольной доли конденсированного углерода от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

На втором этапе проводится разведочный анализ данных. Из графиков, приведенных на рис. 1—4, следует, что в диапазоне изменения $0,35 < \alpha < 0,5$ объемные концентрации компонентов синтез-газа линейно зависят от α и практически не зависят от давления в КС, причем вблизи нижней границы указанного диапазона концентрации компонентов близки к максимальным значениям. Температура водородсодержащего газа на выходе КС в указанном диапазоне α также изменяется линейно и не зависит от давления. Кроме того, выявлено подобие

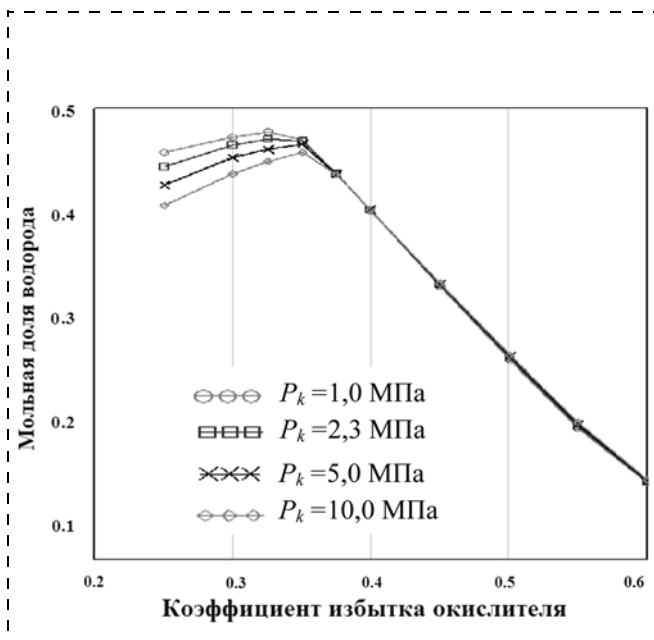


Рис. 2. Зависимость концентрации водорода от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

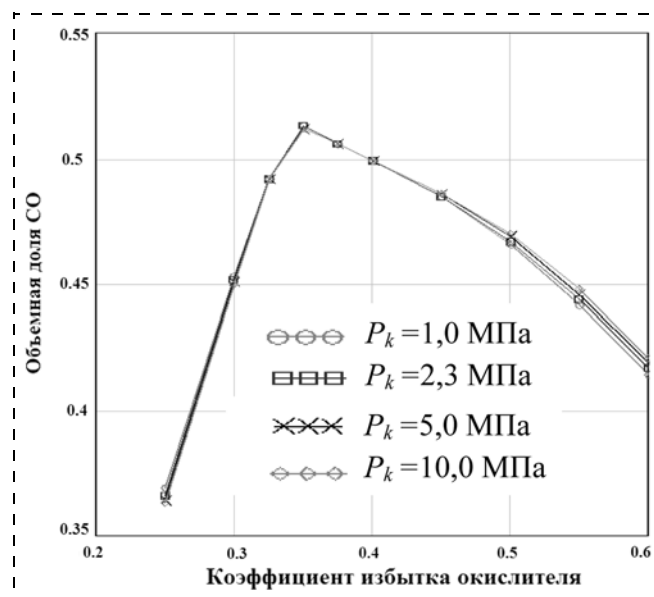


Рис. 3. Зависимость концентрации СО от коэффициента избытка окислителя для топливной пары кислород—дизельное топливо

графиков концентраций компонентов и температуры газа на выходе КС при изменении температуры подогрева горючего и окислителя, а также степени их увлажнения.

При обосновании выбора номинального технологического режима предположим, что целевое назначение синтез-газа — получение водорода. Тогда для максимизации выходов компонентов синтез-газа и предотвращения сажеобразования в соответствии с рис. 1—3 целесообразно выбрать номинальное значение $\bar{\alpha} = 0,4 \pm 0,05$.

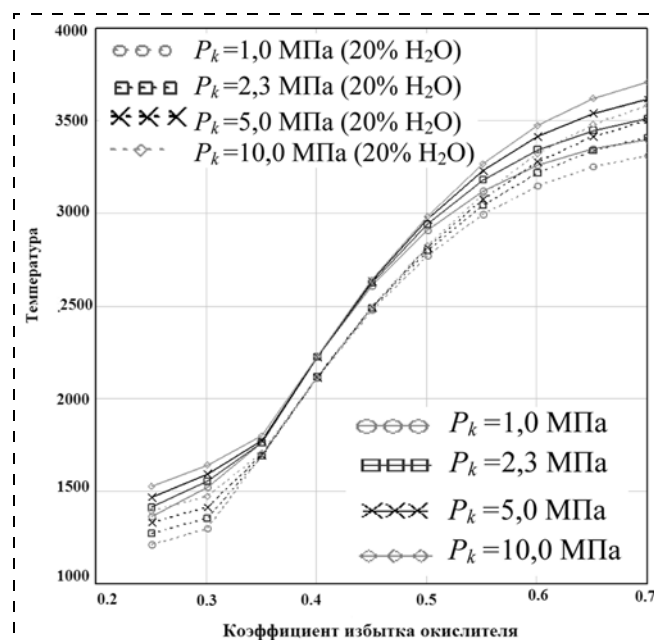


Рис. 4. Зависимость температуры газа в КС от коэффициента избытка окислителя для топливных пар кислород—дизельное топливо, кислород — дизельное топливо — 20 % массовых воды

Выбор давления в КС зависит от дальнейшего использования синтез-газа. Как правило, этот параметр оговаривается в техническом задании на проектирование. При производстве водорода целесообразно выбирать давление в диапазоне от 1,5 до 4,0 МПа для обеспечения работоспособности катализаторов в процессе паровой каталитической конверсии монооксида углерода.

На третьем этапе проведены повторные термодинамические расчеты в окрестности номинального режима при изменении параметра α с шагом 0,01, фрагменты расчетов приведены в *Приложении 1*. В *Приложении 2* приведена таблица приращений соответствующих переменных, составленная на основании данных *Приложения 1*.

Данные о приращениях являются исходными для идентификации семейства характеристик $\Delta m^{H_2} = f(\Delta\alpha)$, $\Delta m^{CO} = f(\Delta\alpha)$, $\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = f(\Delta\alpha)$, $\Delta T = f(\Delta\alpha)$. В качестве иллюстрации одной из возможных вычислительных процедур в *Приложении 2* рассмотрена идентификация зависимости $\Delta m^{CO} = f(\Delta\alpha)$.

Показано, что все искомые характеристики могут быть адекватно описаны линейными моделями вида

$$\Delta m^{H_2} = -0,28\Delta\alpha \text{ при } m^{\Gamma} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{\Gamma} = 0; \quad (2)$$

$$\Delta m^{H_2} = -0,41\Delta\alpha \text{ при } m^{OK} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{OK} = 0; \quad (3)$$

$$\Delta m^{CO} = -1,88\Delta\alpha \text{ при } m^{\Gamma} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{\Gamma} = 0; \quad (4)$$

$$\Delta m^{CO} = -4,73\Delta\alpha \text{ при } m^{OK} = 1 \text{ г/с и } \Delta m^{OK} = 0; \quad (5)$$

$$\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = -1,12\Delta\alpha; \quad (6)$$

$$\Delta T = 8600\Delta\alpha. \quad (7)$$

Формулы (2)—(5) получены по данным таблиц П.1.2, П.1.3 и описывают удельные характеристики, приведенные к единичному массовому расходу горючего или окислителя. Формулы (6), (7) получены по данным таблицы П.1.1.

Для нахождения характеристик конкретного газогенератора с заданной производительностью необходимо ввести масштабные коэффициенты, соответствующие номинальным массовым расходам компонентов подачи. Тогда формулы (2)—(5) принимают вид

$$\Delta m^{H_2} = -0,28\bar{m}^{\Gamma}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{\Gamma} = 0, \quad (8)$$

$$\Delta m^{H_2} = -0,41\bar{m}^{OK}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{OK} = 0, \quad (9)$$

$$\Delta m^{CO} = -1,88\bar{m}^{\Gamma}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{\Gamma} = 0, \quad (10)$$

$$\Delta m^{CO} = -4,73\bar{m}^{OK}\Delta\alpha, \text{ при } \Delta m^{OK} = 0, \quad (11)$$

где $\bar{m}^{\Gamma}$, $\bar{m}^{OK}$ — номинальные массовые расходы горючего (дизтоплива) и окислителя (кислорода).

Характеристики (6)—(11) описывают зависимости искомых выходных переменных от промежуточного параметра — приращения $\Delta\alpha$ — в окрестности номинального $\bar{\alpha}$. Для перехода к входным управляющим переменным воспользуемся выражением (1). Дифференцируя (1), найдем

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m^{OK}}\right)\Delta m^{OK} + \left(\frac{\partial\alpha}{\partial m^{\Gamma}}\right)\Delta m^{\Gamma} = \\ &= K_1\Delta m^{OK} + K_2\Delta m^{\Gamma}, \end{aligned} \quad (12)$$

где $K_1 = 1/(\bar{m}^{\Gamma} K_{m0})$, $K_2 = -\bar{m}^{OK}/[(\bar{m}^{\Gamma})^2 K_{m0}]$.

Проводя промежуточные преобразования выражений (6)—(11) с учетом (12), окончательно получим

$$\Delta m^{H_2} = 0,221\Delta m^{\Gamma} - 0,083\Delta m^{OK}, \quad (13)$$

$$\Delta m^{CO} = 2,550\Delta m^{\Gamma} - 0,558\Delta m^{OK}, \quad (14)$$

$$\Delta(C^{H_2}/C^{CO}) = (0,400\Delta m^{\Gamma} - 0,332\Delta m^{OK})/\bar{m}^{\Gamma}, \quad (15)$$

$$\Delta T = (2550\Delta m^{OK} - 3440\Delta m^{\Gamma})/\bar{m}^{\Gamma}. \quad (16)$$

Важно отметить, что полученные зависимости (13)—(16) инвариантны к положению рабочей точки в области рациональных параметров режима парциального окисления, что следует из проведенных на втором этапе анализа данных термодинамических расчетов.

Рассмотрим пример расчета статических характеристик ВТР, работающего на компонентах дизтопливо — кислород со следующими параметрами номинального режима: $\bar{\alpha} = 0,4$, номинальные расходы подачи компонентов — $\bar{m}^{\Gamma} = 24,335$ г/с, $\bar{m}^{OK} = 33,309$ г/с; давление в КС — 2,5 МПа; номинальный массовый выход водорода — 6,25 г/с; температура газа на выходе КС — 2240 К.

Пусть возмущенное движение характеризуется уменьшением массового расхода окислителя на 5 % и увеличением массового расхода горючего на 7 %. Требуется оценить изменение выходных реакций ВТР.

Согласно (1) найдем $\alpha = m^{OK}/(m^{\Gamma} K_{m0}) = 31,644/(26,038 \cdot 3,375) = 0,360$. По формуле (13) найдем приращение массового расхода водорода к номинальному режиму:

$$\begin{aligned} \Delta m^{H_2} &= 0,221\Delta m^{\Gamma} - 0,083\Delta m^{OK} = \\ &= 0,221 \cdot 1,703 + 0,083 \cdot 1,665 = 0,515 \text{ г/с.} \end{aligned}$$

Из формулы (14)

$$\begin{aligned} \Delta m^{CO} &= 2,550\Delta m^{\Gamma} - 0,558\Delta m^{OK} = \\ &= 2,55 \cdot 1,703 + 0,558 \cdot 1,665 = 5,272 \text{ г/с.} \end{aligned}$$

Согласно (16) найдем изменение температуры газа на выходе КС:

$$\begin{aligned} \Delta T &= (2550\Delta m^{OK} - 3440\Delta m^{\Gamma})/\bar{m}^{\Gamma} = \\ &= (2550 \cdot (-1,665) - 3440 \cdot 1,703)/24,335 = -415 \text{ К.} \end{aligned}$$

Заключение

Разработана методика идентификации газогенераторов синтез-газа, позволяющая определять удельные статические характеристики, связывающие входные управляющие переменные (компоненты подачи — УВГ и окислитель) с выходными переменными (компонентами синтез-газа — водородом и монооксидом углерода) в окрестностях номинального технологического режима. Методика основана на данных предварительных термодинамических расчетов процессов парциального окисления, проводимых для заданной пары исходных компонентов УВГ — окислитель, и последующем применении стандартных процедур структурной и параметрической идентификации.

Получены формулы пересчета, позволяющие масштабировать результаты путем перехода от удельных к фактическим статическим характеристикам в зависимости от заданной производительности газогенератора.

Методика иллюстрируется примером расчета статических характеристик газогенератора синтез-газа типа ВТР, в котором реализуется технология парциального окисления дизельного топлива газообразным кислородом. Показана относительная инвариантность искомых статических характеристик к значительным вариациям параметров режима парциального окисления, что существенно расширяет область применения моделей для управления процессами получения синтез-газа заданного состава.

Список литературы

1. Брагинский О. Б. Мировой нефтегазовый комплекс. М.: Наука, 2004. 605 с.
2. 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, Вып. 8. С. 1335—1341.
3. Устройство для получения синтез-газа. Патент РФ № 2523824.
4. Устройство генератора синтез-газа. Патент РФ № 2535121.
5. Способ получения синтез-газа. Патент РФ № 2521377.
6. Реактор для получения непредельных углеводородов, преимущественно этилена. Патент РФ № 2369431.
7. Термодинамические и теплофизические свойства продуктов сгорания / Под ред. В. П. Глушко. Т. 1. М.: ВИНТИ АН СССР, 1971. 263 с.
8. Львовский Е. Н. Статистические методы построения эмпирических формул. М.: Высшая шк., 1988. — 239 с.
9. Савченко Г. Б. Способ получения водорода на основе критических технологий // Насосы. Турбины. Системы. 2014. № 1. С. 21—26.

Приложение 1

Расчет состава продуктов парциального окисления дизельного топлива в кислороде

Углеводородное горючее — дизельное топливо (C_7H_{13}); окислитель — кислород газообразный. Стехиометрическое соотношение компонентов $K_{m0} = 3,375$. Диапазон изменения $\alpha = 0,35...0,45$. Давление в камере сгорания ВТР — 2,5 МПа.

При расчете принято упрощение, связанное с учетом только основных получаемых при парциальном

Таблица П.1.1

Расчетные концентрации продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при различных соотношениях компонентов

Параметры газа на выходе камеры сгорания ВТР											
α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
T, К	1759	1854	1950	2043	2134	2223	2309	2392	2472	2549	2623
μ , г/моль	15,80	15,98	16,20	16,44	16,68	16,92	17,16	17,40	17,65	17,89	18,13
Концентрации объемные, % об.											
C^{CO}	51,91	51,51	51,01	50,60	50,10	49,59	49,09	48,58	48,08	47,47	46,97
C^{H_2}	47,17	46,46	45,55	44,44	43,43	42,42	41,41	40,40	39,39	38,38	37,37
C^{H_2O}	1,141	2,071	3,070	4,131	5,171	6,201	7,232	8,252	9,252	10,30	11,21
C^{CO_2}	0,485	0,881	1,313	1,798	2,283	2,778	3,283	3,798	4,323	4,858	5,404
δ , %	0,293	0,079	0,061	0,030	0,020	0,010	−0,010	−0,030	−0,040	−0,010	0,050
C^{H_2}/C^{CO}	0,909	0,902	0,893	0,878	0,867	0,855	0,844	0,832	0,819	0,809	0,796
Концентрации массовые, % масс.											
C^{CO}	92,02	90,27	88,21	86,20	84,10	82,07	80,09	78,16	76,29	74,31	72,52
C^{H_2}	5,972	5,815	5,627	5,407	5,208	5,014	4,826	4,643	4,465	4,291	4,122
C^{H_2O}	1,300	2,333	3,414	4,524	5,581	6,598	7,586	8,534	9,438	10,37	11,13
C^{CO_2}	1,350	2,425	3,568	4,812	6,022	7,223	8,417	9,601	10,78	11,95	13,11
δ , %	0,361	0,160	0,177	0,061	0,085	0,094	0,077	0,065	0,025	0,084	0,117
C^{H_2}/C^{CO}	0,065	0,064	0,064	0,063	0,062	0,061	0,060	0,059	0,059	0,058	0,057

Удельный массовый выход продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при единичном расходе горючего

α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$m^{\text{ок}}$	1,181	1,215	1,249	1,283	1,316	1,350	1,384	1,418	1,451	1,485	1,519
m	2,181	2,215	2,249	2,283	2,316	2,350	2,384	2,418	2,451	2,485	2,519
m^{CO}	1,997	1,980	1,964	1,948	1,929	1,910	1,890	1,871	1,852	1,828	1,809
m^{H_2}	0,131	0,128	0,125	0,122	0,119	0,117	0,114	0,111	0,108	0,106	0,103
$m^{\text{H}_2\text{O}}$	0,028	0,051	0,076	0,102	0,128	0,154	0,179	0,204	0,229	0,255	0,278
m^{CO_2}	0,029	0,053	0,079	0,109	0,138	0,168	0,199	0,230	0,262	0,294	0,327
$\delta, \%$	-0,18	-0,16	-0,18	-0,06	-0,08	-0,09	-0,08	-0,07	-0,02	-0,08	-0,12

Таблица П.1.3

Удельный массовый выход продуктов парциального окисления дизельного топлива кислородом при единичном расходе окислителя

α	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$m^{\text{Г}}$	0,847	0,823	0,801	0,780	0,760	0,741	0,723	0,705	0,689	0,673	0,658
m	1,847	1,823	1,801	1,780	1,760	1,741	1,723	1,705	1,689	1,673	1,658
m^{CO}	1,682	1,629	1,573	1,519	1,465	1,414	1,366	1,320	1,276	1,231	1,191
m^{H_2}	0,109	0,105	0,100	0,095	0,091	0,086	0,082	0,078	0,075	0,071	0,068
$m^{\text{H}_2\text{O}}$	0,024	0,042	0,061	0,080	0,097	0,114	0,129	0,144	0,158	0,172	0,183
m^{CO_2}	0,025	0,044	0,064	0,085	0,105	0,124	0,144	0,162	0,180	0,198	0,215
$\delta, \%$	-0,36	-0,16	-0,18	-0,06	-0,08	-0,09	-0,08	-0,06	-0,02	-0,08	-0,12

окислении компонентов: монооксида углерода CO , водорода H_2 , двуоксида углерода CO_2 , воды H_2O .

В таблице П.1.1 обозначены: T — температура в КС (до впрыска воды); μ — мольная масса полученного газа; δ — относительная погрешность расчета концентраций, обусловленная наличием в газе не учитываемых компонент.

В таблицах П.1.2, П.1.3 обозначены: $m^{\text{ок}}$ — массовый расход окислителя при единичном расходе горючего ($m^{\text{Г}} = 1$), $m^{\text{Г}}$ — массовый расход горючего при единичном расходе окислителя ($m^{\text{ок}} = 1$); m — суммарный массовый расход углеводородного газа на выходе КС; m^i — массовый выход i -й компоненты смеси на единицу горючего, $i = \text{H}_2, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}$; δ — относительная погрешность подсчета суммарного массового расхода, обусловленная наличием в газе не учитываемых компонент.

Приложение 2

Описание процедуры идентификации

Для проведения структурной и параметрической идентификации семейства статических характеристик ВТР по данным Приложения 1 составлена таблица приращений П.2.1. При расчете приращений применялась формула восходящих разностей, например, $\Delta T(\alpha_i) = T(\alpha_{i+1}) - T(\alpha_i)$.

Как следует из таблицы П.2.1, приращения массовых расходов компонентов синтез-газа и температуры практически во всех поддиапазонах параметра α изменяются незначительно, что качественно свидетельствует о линейности искомых зависимостей. Дополнительно проводили количественную оценку адекватности линейной модели, которая подтвердила справедливость этой гипотезы для всех анализируемых функций.

Таблица П.2.1

Таблица локальных приращений исследуемых функций

α	0,360	0,370	0,380	0,390	0,400	0,410	0,420	0,430	0,440
$\Delta\alpha$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
ΔT	96	93	91	89	86	83	80	77	74
$\Delta(C^{\text{H}_2}/C^{\text{CO}})$	-0,009	-0,015	-0,011	-0,012	-0,011	-0,012	-0,013	-0,010	-0,013
$\Delta m^{\text{ок}}(m^{\text{Г}} = 1)$	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034	0,034
Δm^{H_2}	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,003	-0,003	-0,003	-0,002	-0,003
Δm^{CO}	-0,016	-0,016	-0,019	-0,019	-0,020	-0,019	-0,019	-0,024	-0,019
$\Delta m^{\text{Г}}(m^{\text{ок}} = 1)$	-0,022	-0,021	-0,020	-0,019	-0,018	-0,018	-0,016	-0,016	-0,015
Δm^{H_2}	-0,005	-0,005	-0,004	-0,005	-0,004	-0,004	-0,003	-0,004	-0,003
Δm^{CO}	-0,056	-0,054	-0,054	-0,051	-0,048	-0,046	-0,044	-0,045	-0,040

Данные для проверки линейности модели $\Delta m^{\text{CO}} = f(\Delta\alpha)$

α_i	0,35	0,36	0,37	0,38	0,39	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$\Delta\alpha_i$	-0,05	-0,04	-0,03	-0,02	-0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
Δm_i^{CO}	0,268	0,215	0,159	0,105	0,051	-0,048	-0,094	-0,130	-0,183	-0,223
$\Delta m_{ip}^{\text{CO}}$	0,237	0,189	0,142	0,095	0,047	-0,047	-0,095	-0,142	-0,180	-0,237
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

В качестве примера проверим адекватность модели $\Delta m^{\text{CO}} = K\Delta\alpha$ для зависимости $\Delta m^{\text{CO}} = f(\Delta\alpha)$ при изменении α за счет варьирования массового расхода дизельного топлива. Выбор примера обусловлен тем, что приращения именно этой переменной визуально изменяются в наибольшей степени. Исходные данные для вычислений получены из таблицы П.1.3 и приведены в таблице П.2.2, где обозначены:

$\Delta\alpha_i = \alpha_i - \bar{\alpha}$, $\bar{\alpha} = 0,40$; $\Delta m_i^{\text{CO}} = m^{\text{CO}}(\alpha_i) - m^{\text{CO}}(\bar{\alpha})$;

m_{ip}^{CO} — значения приращений, рассчитанные по формуле (П.2.1).

Воспользуемся стандартной методикой, изложенной, например, в работе [8]. Прежде всего найдем оценку неизвестного коэффициента K по методу наименьших квадратов:

$$K = \sum_i \Delta m_i^{\text{CO}} \cdot \Delta\alpha_i / \sum_i (\Delta\alpha_i)^2 = -4,73, \quad i = \overline{1, 10}, \quad \text{откуда}$$

$$\Delta m^{\text{CO}} = -4,73\Delta\alpha. \quad (\text{П.2.1})$$

Расчетное значение критерия Фишера для модели (П.2.1) имеет вид [8]

$$F = R_\Phi(n-2)/R_0 = 0,2445 \cdot 8/0,0024 = 815,$$

где $R_0 = \sum_{i=1}^{10} (\Delta m_{ip}^{\text{CO}} - \bar{\Delta m}^{\text{CO}})^2 = 0,2445$ — остаточная сумма квадратов отклонений расчетных значений

$\Delta m_{ip}^{\text{CO}}$ от среднего $\bar{\Delta m}^{\text{CO}} = \sum_{i=1}^{10} \Delta m_i^{\text{CO}} = 0,012$,

где $n = 10$ — число наблюдений; $R_\Phi = \sum_{i=1}^{10} (\Delta m_i^{\text{CO}} - \Delta m_{ip}^{\text{CO}})^2 = 0,0024$ — сумма квадратов отклонений наблюдаемых и расчетных значений.

Поскольку даже при высоком уровне значимости $p = 0,01$ расчетное значение критерия Фишера больше табличного $F \gg F^T$ ($p = 0,01, 1, 8$) = 11,26, то линейная модель (П.2.1) адекватно описывает исходные данные.

Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators

Yu. V. Zagashvili, y.zagashvili@yandex.ru ✉, **G. B. Savchenko**, **Yu. N. Filimonov**,
LLC "HTR", Saint-Petersburg, 199226, Russian Federation

Corresponding author: **Zagashvili Yury V.**, Ph. D.,
LLC "HTR", Saint-Petersburg, 199226, Russian Federation,
e-mail: y.zagashvili@yandex.ru

Received on April 09, 2015

Accepted April 23, 2015

A method is proposed for identification of the static characteristics of the synthesis gas generators, allowing us to obtain the dependences of the output variables — mass flow components of the synthesis gas (hydrogen and carbon monoxide) — on the input variables — the mass flow of hydrocarbon fuel and oxidizer. The technique is illustrated by calculation of the characteristics of the original high-energy managed core engine of STS type, in which diesel fuel and oxygen are treated as the initial feed components. According to the preliminary thermodynamic calculations of the hydrogen-containing gas at the outlet of the combustion chamber of STS models, the obtained mass flow increments the components of the synthesis gas in the vicinity of the nominal technological mode, allowing calculation of the output characteristics of the STS as an object of regulation. The presentation models were confirmed by the linear dependencies. A relative invariability to the variations in the parameters of the models of a fractionary oxidation mode was proved. The models, which were obtained for example, are applicable for a given pair of the input components, but have sufficient flexibility, as they permit to take into account the scale factor — the core engine efficiency. The proposed method of identification and the obtained models based on it allow a synthesis of the control laws for the fractionary oxidation process and simulation modes of the core engine. In particular, these models can be used for an optimal automatic control of the performance of the core engine, while ensuring the desired ratio of the synthesis gas components, which is especially important when the hydrocarbon fuel is used as the APG with an unstable composition.

Keywords: core engine, combustion chamber, fractionary oxidation, hydrocarbon fuel, oxidant, synthesis gas, hydrogen, thermodynamic calculations, concentrations of components, identification, static characteristics, model increments

For citation:

Zagashvili Yu. V., Savchenko G. B., **Filimonov Yu. N.** Identification of the Static Characteristics of the Synthesis Gas Generators, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 556–563.

DOI: 10.17587/mau.16.556-563

References

1. **Braginskij O. B.** *Mirovoj neftegazovyy kompleks* (World oil and gas industry), Moscow, Nauka, 2004, 605 p. (in Russian).
2. **Aniskevich Ju. V., Krasnik V. V., Filimonov Ju. N.** *Vybor rezhimnyh parametrov processa parcial'nogo gazofaznogo okisleniya metana kislorodom vozduha s cel'ju poluchenija sintez-gaza trebuemogo sostava* (Selection of operating parameters of the gas-phase partial oxidation of methane with oxygen from air to produce the required synthesis gas composition), *Zhurnal Prikladnoj Himii*, 2009, vol. 82, iss. 8, pp. 1335–1341 (in Russian).

3. **Ustrojstvo dlja poluchenija sintez-gaza** (An apparatus for producing synthesis gas), Patent RF № 2523824 (in Russian).
4. **Ustrojstvo generatora sintez-gaza** (The device synthesis gas generator), Patent RF № 2535121 (in Russian).
5. **Sposob poluchenija sintez-gaza** (A method for producing synthesis gas), Patent RF № 2521377 (in Russian).
6. **Reaktor dlja poluchenija nepredel'nyh uglevodorodov, preimushhestvenno jetilena** (The reactor to produce unsaturated hydrocarbons, mainly ethylene), Patent RF № 2369431 (in Russian).
7. **Glushko V. P.** ed. *Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva produktov sgoranija* (Thermodynamic and transport properties of combustion products), vol. 1, Moscow, VINITI AN SSSR, 1971, 263 p. (in Russian).
8. **L'vovskij E. N.** *Statisticheskie metody postroenija jempiricheskikh formul* (Statistical methods for constructing empirical formulas), Moscow, Vysshaja shkola, 1988, 239 p. (in Russian).
9. **Savchenko G. B.** *Sposob poluchenija vodoroda na osnove kriticheskikh tehnologij* (A method for producing a hydrogen based on critical technologies), *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2014, no.1, pp. 21–26 (in Russian).

УДК 623.7.011.89

DOI: 10.17587/mau.16.563-569

А. В. Шукалов^{1, 2}, ген. директор, доц., aviation78@mail.ru,

И. О. Жаринов^{1, 2}, д-р техн. наук, доц.,

руководитель учебно-научного центра, зав. кафедрой, igor_rabota@pisem.net,

О. О. Жаринов³, канд. техн. наук, доц., zharinov73@hotmail.ru,

М. О. Костишин², аспирант, job.max@me.com,

В. А. Нечаев^{1, 2}, главный конструктор, доц., postmaster@elavt.spb.ru,

¹ Санкт-Петербургское ОКБ "Электроавтоматика" им. П. А. Ефимова,

² Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),

³ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения (ГУАП)

Алгоритм решения проектной задачи выбора оптических параметров бортового средства индикации на основе жидкокристаллической панели

Рассматривается проектная задача выбора оптических параметров бортового средства индикации, выполненного на базе жидкокристаллической панели. Релевантными параметрами проектирования определены: неравномерность яркости, яркость, цветовой контраст, яркостной контраст, коэффициент диффузного отражения, коэффициент зеркального отражения, цветовой охват. Предлагается алгоритм автоматизированного выбора значений параметров, основанный на процедуре лексикографической оценки. Процедура лексикографической оценки предполагает ранжирование проектных параметров по важности и поиск оптимального значения каждого параметра независимо от значений других параметров. Приводятся выражения для вычисления значений оценок параметров и описываются способы поиска наилучшего значения по каждому из параметров. В основе алгоритма используются частные решающие правила, устанавливающие граничные значения анализируемых параметров.

Ключевые слова: авионика, средства индикации, оптические параметры, процедура выбора, проектное решение, алгоритм

Введение

Выбор оптических параметров бортового средства индикации класса МФЦИ (многофункциональный цветной индикатор) [1, 2] является проектной процедурой, подлежащей оптимизации. Оптимизация решения задачи выбора может осуществляться на двух этапах:

- на этапе проектирования пилотажно-навигационного комплекса (ПНК), в состав которого входит МФЦИ;
- на этапе проектирования МФЦИ.

Решение задачи выбора оптических параметров МФЦИ на этапе проектирования ПНК выполняется с использованием критерия оптимальности Парето [3, 4], когда разработчику предъявлено множество моделей МФЦИ, характеристики которых заданы в технической документации. Критерий Парето состоит в отказе от поиска единственного (наилучшего) проектного решения и соглашении о том, что предпочтение одного проектного решения (варианта) перед другим можно отдавать, только если первый вариант оказывается лучше второго