

УДК 620.92.004.14:621.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2017-2-45-54

Энергосбережение в топливных печах посредством конверсии природного газа

С.К. Попов, И.Н. Свистунов

В программных комплексах MathCad и Aspen Plus выполнено моделирование и проведено расчетное исследование тепловых схем ванной стекловаренной печи с рекуперацией теплоты газовых отходов. Рассмотрены тепловые схемы с термической рекуперацией теплоты газовых отходов и термохимической рекуперацией на основе конверсии первичного топлива – природного газа. Исследованы два варианта окислителя для процесса конверсии: водяной пар и рециркулирующие газовые отходы (уходящие газы). Для каждой тепловой схемы определены режимные параметры тепловых схем, химические составы газовых потоков, структура теплового баланса теплотехнологического реактора.

Сопоставительный анализ полученных данных приводит к выводу, что переход от термической рекуперации теплоты высокотемпературных отходящих газов к термохимической рекуперации на основе конверсии природного газа может дать существенное снижение расхода первичного топлива — до 32 %. При этом рассмотренные варианты схем с термохимической рекуперацией характеризуются практически одинаковым энергосберегающим эффектом, хотя и заметно различаются составом конвертированного газа. Переход к термохимической рекуперации на основе конверсии природного газа сопровождается ростом коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов на 46 %. Анализ полученных результатов показывает, что на долю процессов нагрева и термохимического преобразования компонентов конверсии приходится 57 % в структуре коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов, из которых 25 % приходится на нагрев, а 32 % обеспечивается приростом химической теплоты топлива в процессе его конверсии. Это дает основание квалифицировать рассматриваемую рекуперацию как термохимическую.

Впервые разработана классификация работ по термохимической рекуперации в высокотемпературной теплотехнологии. Для этого использованы семь классификационных параметров, каждый из которых может принимать несколько дискретных значений. Проиллюстрировано, как в предложенной классификационной системе позиционируются разработки по термохимической рекуперации, выполненные в СССР, РФ и за рубежом. Разработанная классификация позволила систематизировать значительный массив информации и может быть использована для выбора направлений дальнейших исследований.

Ключевые слова: топливная печь, тепловые отходы, термохимическая рекуперация, энергосбережение, конверсия природного газа.

Energy Saving in Fuel Furnaces by Reforming Natural Gas

S.K. Popov, I.N. Svistunov

The cycle diagrams of a glass melting tank furnace with recovering the heat of gas wastes are modeled and numerically investigated in the MathCad and Aspen Plus software packages. The cycle diagrams with thermal recovering of the gas waste heat and with thermochemical recovering based on reforming natural gas used as primary fuel are considered. Two versions of an oxidizer for the reforming process, namely, steam and recirculating gas wastes (flue gases) are investigated. The cycle diagram operating parameters, the chemical compositions of gas streams, and the thermal processing reactor's heat balance structure are determined for each cycle diagram.

A conclusion can be drawn from a comparative analysis of the obtained data that the transition from using thermal recovering of the heat of high-temperature flue gases to the use of thermochemical recovering based on the natural gas reforming technology can yield a significant — up to 32 % — saving of the primary fuel consumption. The considered versions of cycle diagrams with thermochemical recovering are characterized by almost the same energy-saving effect, although they have noticeably different compositions of the reformed gas.

The transition to recovery based on thermochemical reforming of natural gas entails an increase in the gas waste heat comprehensive recuperation ratio by 46 %. An analysis of the obtained results shows that the heating and thermochemical conversion of the reforming components account for 57 % in the structure of the gas waste heat comprehensive recuperation ratio, including 25 % for heating and 32 % due to the increase in the chemical heat of fuel in the course of its reforming. This gives us grounds to qualify the considered recuperation as being thermochemical in nature.

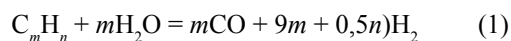
A classification of works on thermochemical recuperation in the high-temperature thermal technology has been elaborated for the first time. The authors used seven classification parameters, each of which can take a few discrete values. Examples are given to illustrate how different research works on thermochemical recuperation carried out in the former Soviet Union, Russia, and abroad are presented in the proposed classification system. The developed classification made it possible to systematize a significant amount of information and can be used to select areas for future investigations.

Key words: fuel furnace, heat wastes, thermochemical recovery, energy saving, natural gas reforming.

В ряде теплотехнологических систем и установок наиболее энергоемким элементом является печь, отапливаемая природным газом. Тепловой поток с высокотемпературными газовыми отходами на выходе из печи (с отходящими газами) составляет значительную долю в расходной части теплового баланса таких печей. Рекуперация данного теплового потока теплоносителями, направляемыми в печь, обеспечивает снижение видимого расхода топлива и является эффективным энергосберегающим мероприятием.

В случае термической рекуперации нагрев теплоносителей (окислителя, топлива, исходного технологического материала) происходит без их химических и фазовых превращений. Альтернативным вариантом является термохимическая рекуперация (ТХР), при которой тепловой поток, покидающий печь (тепловой отход), используется не только для повышения температуры регенерирующего теплоносителя, но и для осуществления эндотермических химических реакций между компонентами теплоносителя.

Например, если регенерирующим теплоносителем является смесь природного газа и водяного пара H_2O , то при нагреве этой смеси отходящими газами до $900\text{ }^\circ\text{C}$ углеводороды $C_m H_n$, составляющие природный газ, подвергаются паровой конверсии согласно реакции



идущей с поглощением теплоты. Если регенерирующий теплоноситель — смесь природного газа и части потока газовых отходов (например, уходящих газов, направляемых в окружающую среду), то благодаря наличию в газовых отходах газа диоксида углерода CO_2 и водяного пара в реакторе конверсии наряду с химической реакцией (1) протекает реакция (2) углекислотной конверсии углеводородов



Реакция (2) также эндотермическая.

Вследствие термохимической рекуперации на основе конверсии природного газа по реакциям (1) и (2) энергия теплового отхода в большей мере усваивается регенерирующим теплоносителем и возвращается в печь, обеспечивая дополнительную экономию топлива по сравнению с вариантом термической рекуперации.

Одной из количественных характеристик эффективности рекуперации является коэффициент комплексной рекуперации теплового отхода [1]. В частности, коэффициент комплексной рекуперации теплоты газовых отходов может быть вычислен по формуле

$$R_{г.о} = \Delta Q_{г.о}^{per} / \Delta Q_{г.о}^{max},$$

где $\Delta Q_{г.о}^{per}$ — тепловой поток, отведенный от газовых отходов и переданный регенерирующим теплоносителям, МВт; $Q_{г.о}(t)$ — тепловой поток с газовыми отходами при температуре t , МВт; $\Delta Q_{г.о}^{max} = Q_{г.о}(t_{o,r}) - Q_{г.о}(t_{o,c})$ — потенциал рекуперации теплоты газовых отходов, МВт. Данная величина определяется как тепловой поток, отво-

димый от материального потока газов при охлаждении их от температуры отходящих газов $t_{o,r}$ до температуры окружающей среды $t_{o,c}$.

Выполнено моделирование в средах MathCad и Aspen Plus и проведено расчетное исследование вариантов рекуперации теплоты газовых отходов в применении к рекуперативной ванной стекловаренной печи производительностью 250 т/сут с $t_{o,r} = 1500\text{ }^\circ\text{C}$, массовой долей стеклобоя в исходном материале 30 %. Топливо — природный газ с низшей теплотой сгорания 37,740 МДж/м³. Подводимые к печи потоки топлива, воздуха и исходного материала имеют температуру окружающей среды $t_{o,c} = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

Исследованные тепловые схемы представлены на рис. 1. В схеме I реализована термическая рекуперация теплоты газовых отходов, в схеме II — ТХР на основе паровой конверсии, в схеме III — ТХР с рециркулирующими газовыми отходами (уходящими газами).

В случае термической рекуперации тепловая схема печи (схема I на рис. 1) включает в себя два элемента: теплотехнологический реактор (собственно ванну расплава) и подогреватель воздуха. При подогреве дутьевого воздуха до температуры $t_{г.в} = 850\text{ }^\circ\text{C}$ удельный видимый расход топлива оставляет 6,94 МДж/(кг стекломассы) или в пересчете на условное топливо 236 кг/(т стекломассы). Тепловой баланс варочной зоны теплотехнологического реактора (ТТР) представлен в табл. 1.

Потенциал рекуперации теплоты газовых отходов в схеме I

$$\Delta Q_{г.о}^{max} = Q_{г.о}(t_{o,r}) - Q_{г.о}(t_{o,c}) = 16,67 - 0,19 = 16,48 \text{ МВт.}$$

Теплота газовых отходов регенерируется в схеме I только дутьевым воздухом, поэтому

$$\Delta Q_{г.о}^{per} = \Delta Q_{г.в} = Q_{г.в} - Q_{х.в} = 6,92 - 0,15 = 6,77 \text{ МВт.}$$

Здесь $\Delta Q_{г.в}$ — тепловой поток, освоенный дутьевым воздухом в процессе его нагрева газовыми отходами в воздухоподогревателе; $Q_{х.в} = 0,15 \text{ МВт}$ — тепловой поток с холодным воздухом на входе в воздухоподогреватель.

Коэффициент комплексной рекуперации теплоты газовых отходов в схеме I

$$R_{г.о} = \Delta Q_{г.о}^{per} / \Delta Q_{г.о}^{max} = 6,77 / 16,48 = 0,41.$$

При термохимической рекуперации первичное топливо — природный газ — превращается во вторичное топливо, называемое синтез-газом или конвертированным газом, после чего синтез-газ направляется на отопление теплотехнологического реактора.

Тепловая схема печи с термохимической рекуперацией на основе паровой конверсии природного газа с использованием теплоты газовых отходов (схема II на рис. 1) включает в себя четыре регенеративных теплообменника: реактор конверсии (РК), подогреватель воздуха (ПВ), подогреватель парогазовой смеси (ППГС) и

Схема I

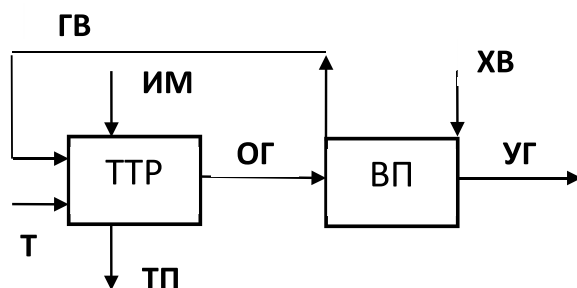


Схема II

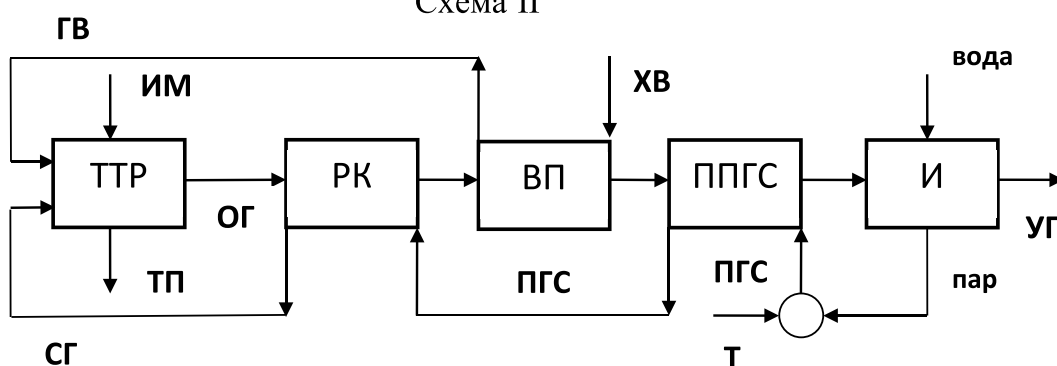


Схема III

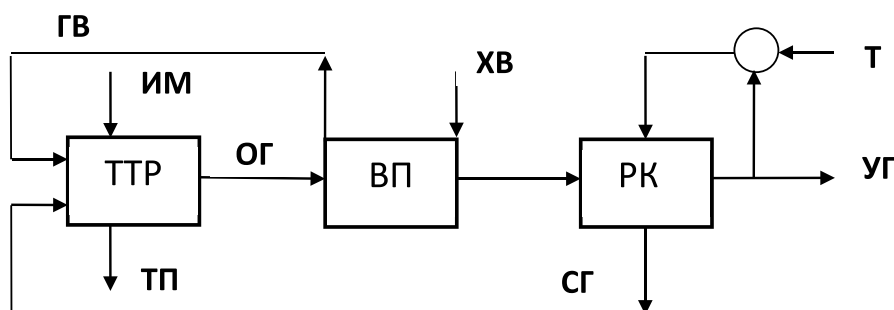


Рис. 1. Тепловые схемы топливных печей:

ТТР — теплотехнологический реактор; ВП — воздухоподогреватель; РК — реактор конверсии; ППГС — подогреватель парогазовой смеси; И — испаритель; ИМ — исходный материал; ТП — технологический продукт; ОГ — отходящие газы; УГ — уходящие газы; ХВ — холодный воздух; ГВ — горячий воздух; Т — топливо (природный газ); СГ — синтез-газ; ПГС — парогазовая смесь

испаритель (И). Все теплообменники включены последовательно по тракту газовых отходов.

Тепловая схема смоделирована в среде Aspen Plus в предположении, что синтез-газ и отходящие газы на выходе из ТТР находятся в состоянии термодинамического равновесия. Исследование модели выполнено при температуре синтез-газа (на выходе из реактора конверсии) $t_{cr} = 900$ °С, горячего воздуха $t_{гв} = 850$ °С, парогазовой смеси (на выходе из ППГС) $t_{пгс} = 300$ °С, удельном расходе пара на процесс конверсии $2,5$ м³/(м³ природного газа).

В результате исследования установлены следующие режимные параметры тепловой схемы II с ТХР: удельный видимый расход природного газа $0,125$ м³/(кг стекломас-

сы) или в пересчете на условное топливо 161 кг/(т стекломассы), удельный выход синтез-газа $V_{cr} = 5,653$ м³/(м³ природного газа). Тепловой баланс варочной зоны ТТР в схеме II представлен в табл. 1. Характеристики синтез-газа приведены в табл. 2.

Низшая теплота сгорания синтез-газа $Q_{cr} = 8,302$ МДж/(м³ синтез-газа) или в пересчете на 1 м³ природного газа $8,302 \cdot 5,653 = 46,931$ МДж/(м³ природного газа). Если сравнить с низшей теплотой сгорания первичного топлива $37,740$ МДж/(м³ природного газа), то отсюда следует, что химически связанная энергия природного газа увеличивается в процессе его конверсии на $24,4$ % благодаря рекуперации теплоты газовых отходов. Это и составляет основу эффективности ТХР

Таблица 1

Тепловые балансы теплотехнологических реакторов

Тепловой поток	Схема I		Схема II		Схема III	
	МВт	%	МВт	%	МВт	%
Приход						
Химическая теплота топлива $Q_{\text{т}}^{\text{хим}}$	20,07	74,13	17,02	69,50	16,94	69,28
Физическая теплота топлива $Q_{\text{т}}^{\text{физ}}$	0,02	0,06	2,67	10,91	2,85	11,64
Теплота горячего воздуха $Q_{\text{г.в}}$	6,92	25,57	4,73	19,32	4,60	18,81
Теплота исходного материала	0,06	0,24	0,06	0,27	0,06	0,27
Итого:	27,07	100,00	24,48	100,00	24,45	100,00
Расход						
Теплота стекломассы	5,33	19,69	5,33	21,77	5,33	21,80
Теплота отходящих газов	16,67	61,58	14,08	57,54	14,05	57,48
Теплота на эндотермические реакции	1,82	6,72	1,82	7,42	1,82	7,43
Потери теплоты через ограждение ТТР в окружающую среду	3,25	12,01	3,25	13,27	3,25	13,29
Итого:	27,07	100,00	24,48	100,00	24,45	100,00
Удельный видимый расход первичного топлива, кг/(т стекломассы)	236		161		160	
$R_{\text{г.о}}$	0,41		0,76		0,77	

Таблица 2

Характеристики синтез-газа в схемах с ТХР

Схема с ТХР	Состав синтез-газа, %						$V_{\text{ст}}$, (м ³ синтез-газа)/ (м ³ природного газа)	$Q_{\text{ст}}$, МДж/ (м ³ синтез-газа)
	CO ₂	H ₂ O	CH ₄	CO	H ₂	N ₂		
Схема II (паровая конверсия)	4,16	21,04	0,01	14,90	59,41	0,48	5,653	8,302
Схема III (конверсия на уходящих газах)	0,23	0,51	0,22	23,26	39,99	35,80	6,420	7,335

как энергосберегающего мероприятия, что иллюстрируется полученными данными: при переходе от схемы I с термической рекуперацией к схеме II с ТХР удельный видимый расход первичного топлива снижается на 32 %.

В рассматриваемой схеме II с ТХР в подсистему регенеративных теплообменников (РК, ПВ, ППГС, И) входят три регенерирующих теплоносителя: природный газ, дутьевой воздух и вода. Этим теплоносителям соответствуют тепловые потоки: химическая теплота природного газа $Q_{\text{пр.г}}^{\text{хим}} = 13,69$ МВт; физическая теплота природного газа $Q_{\text{пр.г}}^{\text{физ}} = 0,01$ МВт; с водой $Q_{\text{вода}} = 0,06$ МВт и холодным воздухом $Q_{\text{х.в}} = 0,10$ МВт.

На выходе из подсистемы регенеративных теплообменников — два регенерирующих теплоносителя: синтез-газ и горячий дутьевой воздух. Им соответствуют тепловые потоки: химическая теплота синтез-газа $Q_{\text{ст}}^{\text{хим}}$, физическая теплота синтез-газа $Q_{\text{ст}}^{\text{физ}}$, с горячим воздухом $Q_{\text{г.в}}$. Величины этих потоков для схемы II приведены в табл. 1.

В рассматриваемой схеме

$$\Delta Q_{\text{г.о}}^{\text{рег}} = \Delta Q_{\text{конв}}^{\text{хим}} + \Delta Q_{\text{конв}}^{\text{физ}} + \Delta Q_{\text{в}} = 3,33 + 2,60 + 4,63 = 10,56 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{\text{конв}}^{\text{хим}} = Q_{\text{ст}}^{\text{хим}} - Q_{\text{пр.г}}^{\text{хим}} = 17,02 - 13,69 = 3,33 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_{\text{конв}}^{\text{физ}} = Q_{\text{ст}}^{\text{физ}} - Q_{\text{пр.г}}^{\text{физ}} - Q_{\text{вода}} = 2,67 - 0,01 - 0,06 = 2,60 \text{ МВт};$$

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{г.в}} - Q_{\text{х.в}} = 4,73 - 0,10 = 4,63 \text{ МВт},$$

где $\Delta Q_{\text{конв}}^{\text{хим}}$ — тепловой поток, регенерированный посредством изменения химической теплоты конвертируемых теплоносителей; $\Delta Q_{\text{конв}}^{\text{физ}}$ — тепловой поток, регенерированный посредством изменения физической теплоты конвертируемых теплоносителей.

Потенциал рекуперации теплоты газовых отходов в схеме II

$$\Delta Q_{\text{г.о}}^{\text{max}} = Q_{\text{г.о}}(t_{\text{о.г}}) - Q_{\text{г.о}}(t_{\text{о.с}}) = 14,08 - 0,16 = 13,92 \text{ МВт}.$$

Коэффициент комплексной рекуперации теплоты газовых отходов в схеме II

$$R_{\text{г.о}} = \Delta Q_{\text{г.о}}^{\text{рег}} / \Delta Q_{\text{г.о}}^{\text{max}} = 10,56 / 13,92 = 0,76.$$

Данный коэффициент можно представить как сумму коэффициентов термической рекуперации $R_{г.о}^{терм}$ и термохимической рекуперации $R_{г.о}^{ТХР}$ теплоты газовых отходов:

$$R_{г.о} = R_{г.о}^{терм} + R_{г.о}^{ТХР};$$

$$\Delta Q_{конв}^{физ} = Q_{ст}^{физ} - Q_{пр.г}^{физ} - Q_{вода} = (2,60 + 4,63)/13,92 = 0,52;$$

$$R_{г.о}^{ТХР} = \Delta Q_{конв}^{хим} / \Delta Q_{г.о}^{max} = 3,33/13,92 = 0,24.$$

Доля теплоты, регенерированной посредством химических реакций конверсии природного газа, составляет $R_{г.о}^{ТХР}/R_{г.о} = 0,24/0,76 = 0,32$.

Структура коэффициента $R_{г.о}$ представлена на рис. 2.

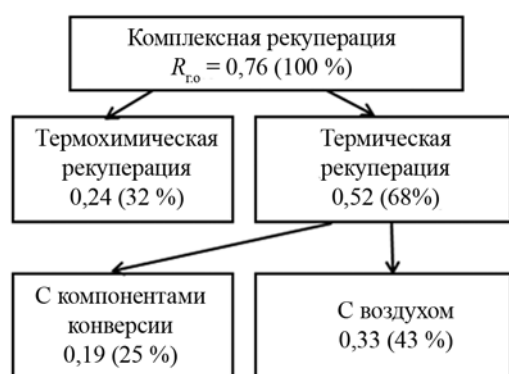


Рис. 2. Структура коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов

На долю процессов нагрева и термохимического преобразования компонентов конверсии приходится 57 % в структуре коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов.

Полученные данные приводят к следующим выводам:

- переход от термической к термохимической рекуперации сопровождается существенным увеличением коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов: с 0,41 до 0,76;
- в печи с ТХР увеличенная доля регенерированной теплоты в значительной мере — на 32 % — обеспечивается притоком химической теплоты топлива в процессе его конверсии. Это дает основание квалифицировать рассматриваемую рекуперацию как термохимическую.

Тепловая схема, в которой предусмотрена ТХР с конверсией природного газа посредством рециркулирующих уходящих газов, представлена на рис. 1 (схема III). Исследование модели тепловой схемы, разработанной в среде Aspen Plus, выполнено при объемной доле рециркулирующих уходящих газов $\varphi = 0,21$. В рассматриваемой схеме зависимость удельных энергозатрат от не монотонная, и выбранное значение лежит в диапазоне, соответствующем минимуму удельного расхода топлива [2, 3]. Температуры синтез-газа и горячего воздуха приняты такими же, как при исследовании схемы II.

В ходе исследования Aspen-модели схемы III получены результаты, представленные в табл. 1 и 2.

Для схемы III

$$\Delta Q_{конв}^{хим} = 3,36 \text{ МВт}; \Delta Q_{конв}^{физ} = 2,85 - 0,01 = 2,84 \text{ МВт};$$

$$\Delta Q_B = 4,50 \text{ МВт},$$

откуда $\Delta Q_{г.о}^{рег} = \Delta Q_{конв}^{хим} + \Delta Q_{конв}^{физ} + \Delta Q_B = 10,70 \text{ МВт}$. Потенциал рекуперации теплоты газовых отходов в схеме III $\Delta Q_{г.о}^{max} = 13,89 \text{ МВт}$. Следовательно, коэффициент комплексной рекуперации теплоты газовых отходов в схеме III

$$R_{г.о} = \Delta Q_{г.о}^{рег} / \Delta Q_{г.о}^{max} = 10,70/13,89 = 0,77.$$

Схемы II и III несущественно различаются по энергопотреблению, эффективности рекуперации теплоты газовых отходов и структуре коэффициента $R_{г.о}$.

Таким образом, использование эндотермических химических реакций конверсии природного газа в процессе рекуперации теплоты уходящих газов обеспечивает дополнительный энергосберегающий эффект по сравнению с термической рекуперацией. Это позволяет отнести термохимическую рекуперацию тепловых отходов к числу перспективных направлений энергосбережения в высокотемпературных печах и объясняет интерес к ТХР многих исследователей.

Анализ патентных и литературных источников [2—41], непосредственно или косвенно относящихся к исследованию процессов и установок термохимической рекуперации тепловых потоков на основе конверсии природного газа, позволил впервые выполнить их многомерную классификацию, представленную в табл. 3. Для этого использованы семь классификационных параметров, каждый из которых может принимать несколько дискретных значений.

В качестве основного классификационного параметра А выбран вид окислителя для процесса конверсии природного газа. Массив значений параметра А включает в себя пять элементов: водяной пар (А1), газовые отходы топливной теплотехнологической установки (А2), смесь водяного пара и газовых отходов (А3), диоксид углерода (А4), кислород (А5).

Дополнительными классификационными параметрами являются:

- назначение синтез-газа (параметр В): использование как источника энергии (В1) либо одновременно в качестве источника энергии и технологического сырья (В2);
- назначение дополнительных (наряду с элементами ТХР) теплообменников в схеме установки (параметр С): реализация термической рекуперации (С1) либо внешнего дополнительного использования тепловых отходов (С2), либо их сочетания (С3), либо отсутствие дополнительных элементов (С4);
- применение катализатора в процессе конверсии природного газа (параметр D): каталитическая конверсия (D1) либо некаталитическая (D2);

Классификация исследований в области термохимической рекуперации

Дополнительные классификационные параметры		А. Вид окислителя для конверсии				
		А1. Водяной пар	А2. Газовые отходы (г.о)	А3. Водяной пар и г.о	А4. Диоксид углерода	А5. Кислород
В. Назначение синтез-газа	В1. Источник энергии	[2,4–24]	[2, 3], [12], [15,16], [26–35]	[25]	[38–41]	[37]
	В2. Источник энергии и технологическое сырье			[3]	[36], [38]	
С. Назначение дополнительных (наряду с элементами ТХР) теплообменников в схеме установки	С1. Реализация термической рекуперация	[2], [5–13], [15,16], [19–24]	[2, 3], [12], [15], [16], [26–35]		[36], [40]	
	С2. Реализация внешнего дополнительного теплоиспользования					
	С3. Сочетание С1 и С2			[3], [25]		
	С4. Отсутствие дополнительных элементов					
D. Применение катализатора	D1. Каталитическая конверсия	[2], [5–11], [15, 16], [18–24]	[2], [15, 16], [34–35]	[3], [25]	[38–41]	
	D2. Некаталитическая конверсия	[4], [12–14], [17]	[12], [26–35]		[36]	[37]
Е. Виды тепловых отходов, используемых для ТХР	E1. Теплота газовых отходов	[2], [4–16], [19–24]	[2], [12], [15, 16], [26–30]	[3], [25]	[36], [38]	
	E2. Теплота пара из системы испарительного охлаждения ТТР					
	E3. Прочие тепловые отходы	[14]				
F. Варианты использования синтез-газа как технологического сырья	F1. Производство водорода	[3]				
	F2. Производство метанола			[3]	[36]	
	F3. Производство других продуктов			[25]		
	F4. Варианты не реализуются					
G. Вид реактора конверсии	G1. Рекуператор	[2], [4–16], [18–24]	[2], [12], [15,16], [26–35]	[3], [25]	[36], [38–41]	
	G2. Регенератор	[17]				

• виды тепловых отходов, используемых для ТХР (параметр E): теплота газовых отходов (E1); теплота пара из системы испарительного охлаждения ТТР (E2); прочие тепловые отходы, в том числе теплота шлаковых отходов, тепловой поток, отводимый из рабочего пространства через ограждение ТТР, и другие (E3);

• варианты использования синтез-газа как технологического сырья (F): для производства водорода (F1), метанола (F2) или других продуктов (F3), либо синтез-газ не используется как технологическое сырье (F4);

• конструктивный тип реактора конверсии (параметр G): реактор-рекуператор (G1) или реактор-регенератор (G2).

Начало разработкам в области ТХР для высокотемпературных промышленных установок (ВТУ) было положено в СССР в 1961 г. Л.А. Шульцем [4], предложившим использовать паровую некаталитическую конверсию природного газа для рекуперации теплоты отходящих газов методической печи, при этом конверсия осуществляется в рекуперативном теплообменнике. Данная работа в сформированном многомерном пространстве имеет координаты (A2, B1, C1, D2, E1, F4, G1).

Развитие идеи ТХР, включающее ее промышленную реализацию, началось в 1968 г. доцентом И.И. Перелетовым в Московском энергетическом институте (МЭИ) [5, 6]. В работах [7–11] научной группой И.И. Перелетова разработано направление ТХР на основе паровой конверсии в применении к рекуперативным стекловаренным печам.

Сотрудниками МЭИ совместно с Научно-производственным объединением «Техэнергохимпром» (г. Москва) выполнен комплекс исследовательских и проектно-конструкторских работ, итогом которых стала опытно-промышленная стекловаренная печь с системой ТХР. Успешные испытания печи прошли в г. Гусь-Хрустальном в июне — июле 1978 г. [10]. Паровая каталитическая конверсия природного газа проведена в трубчатом радиационном рекуператоре.

Совокупность упомянутых работ позиционируется координатами (A1, B1, C1, D1, E1, F4, G1). Следует отметить, что информации о более ранней промышленной реализации ТХР как в нашей стране, так и за рубежом авторами не обнаружено.

Разработка технических решений по ТХР на основе некаталитической конверсии рециркулирующими уходящими газами в последнее время продвинулась до уровня промышленных экспериментов на регенеративной стекловаренной печи [31—34]. Данным работам соответствует «точка» в классификационном пространстве с координатами (A2, B1, C4, D2, E1, F4, G2).

Предложенная классификационная «система координат» позволила охватить и упорядочить значительный массив информации. Она может быть расширена как включением дополнительных уровней использованных параметров, так и добавлением новых.

Исследование позволяет сделать следующие выводы.

Показано, что переход от термической рекуперации теплоты высокотемпературных отходящих газов к термохимической рекуперации на основе конверсии природного газа может дать снижение расхода первичного топлива до 32 %, при этом коэффициент комплексной рекуперации теплоты газовых отходов увеличивается с 0,41 до 0,76. Анализ структуры коэффициента комплексной рекуперации теплоты газовых отходов приводит к выводу, что в схемах с ТХР столь существенный энергосберегающий эффект достигается в значительной мере приростом химической теплоты топлива в процессе его конверсии.

Впервые разработана классификация работ в области ТХР в высокотемпературной теплотехнологии, позволившая охватить значительный массив информации о выполненных разработках. В качестве классификационных параметров – своеобразной «системы координат» – в предложенной классификации выбраны: вид окислителя для процесса конверсии природного газа; назначение синтез-газа; назначение дополнительных (наряду с элементами ТХР) теплообменников в схеме установки; применение катализатора; виды тепловых отходов, используемых для ТХР; варианты использования синтез-газа как технологического сырья; конструктивный тип реактора конверсии. Эта «система координат» может быть расширена как включением дополнительных уровней использованных параметров, так и добавлением новых параметров, и может быть использована для выбора направлений дальнейших исследований.

Литература

1. **Попов С.К.** Разработка и расчет тепловых схем термодинамически идеальных установок. Теория и алгоритмы. М.: Изд-во МЭИ, 2005.
2. **Попов С.К., Свистунов И.Н., Конопелько Е.Д.** Анализ эффективности термохимической регенерации в высокотемпературных установках // Энергосбережение и водоподготовка. 2014. № 3. С. 52—56.
3. **Попов С.К., Свистунов И.Н., Ипполитов В.А.** Энергосбережение при утилизации тепловых отходов промышленных печей на основе конверсии природного газа // Тепловые процессы в технике. 2015. Т. 7. № 2. С. 80—86.
4. **А.с. СССР № 142669, МКИЗ, F 27B 7/02.** Методическая рекуперативная печь для нагрева металла / Л.А. Шульц. 728899/22; заявл. 25.04.61; опубл. 1961. Бюл № 22.
5. **А.с. СССР №228801, МПК Н 02 К 44/08.** Способ преобразования тепла в электрическую энергию / И.И. Перелетов. 854115/24-6; заявл. 26.08.63; опубл. 17.10.1968. Бюл. № 32.
6. **Перелетов И.И., Шумяцкий Б.Я., Чуланов Е.А.** Химическая регенерация теплоты отходящих газов в энергетическом МГД-цикле // Сб. статей «Магнитогидродинамический метод получения электроэнергии». / В.А. Кириллин, А.Е. Шейндлин, ред. М.: Энергия, 1968. С. 182—193.
7. **Новосельцев В.Н.** К вопросу о химической регенерации теплоты промышленных отгетехнических установок: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1971.
8. **Перелетов И.И., Шопшин М.Ф., Новосельцев В.Н. и др.** К вопросу об оптимальном проектировании реактора-теплообменника в системе регенеративного теплоиспользования // Сб. науч. трудов «Энергетика промышленных технологических процессов». М.: МЭИ, 1977. Вып. 332. С. 98—104.
9. **Шопшин М.Ф.** Исследование реактора-теплообменника паровой конверсии природного газа в системе регенеративного теплоиспользования топливных печей: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1979.
10. **Перелетов И.И., Новосельцев В.Н., Шопшин М.Ф. и др.** К опытно-промышленным испытаниям стекловаренной печи с химической регенерацией теплоты // Сб. науч. трудов «Энергетика высокотемпературной теплотехнологии». М.: МЭИ, 1980. Вып. 476. С. 26—32.
11. **Шопшин М.Ф., Новосельцев В.Н., Тюрин А.И. и др.** Химическая регенерация тепловых отходов топливных печей // Энерготехнологические процессы в химической промышленности. М.: НИИТЭХИМ, 1981.
12. **Sikirica S., Kurek H., Kozlov A., Khinkis M.** Thermo-Chemical Recuperation improves furnace thermal efficiency // Heat Treating Progress. 2007. V. 7(5). Pp. 28—31. Access mode: <http://www.asminternational.org/documents/10192/1917649/htp00705p028.pdf/9db475e5-b284-44d6-b373-d36879e8de60/HTP00705P028>
13. **Beerens R., Muysendberg H.** Comparative Study on Energy-Saving Technologies for Glass Furnaces // Glastechn. Ber. 1992. V. 65. No 8. Pp. 216—224.
14. **Maruoka N., Mizuochi T., Purwanto H., Akiyama T.** Feasibility Study for Recovering Waste Heat in the Steelmaking Industry Using a Chemical Recuperator // ISIJ International. 2004. V. 44. No 2. Pp. 257—262.
15. **Пашенко Д.И.** Повышение энергетической эффективности высокотемпературных теплотехно-

гических установок за счет термохимической регенерации теплоты: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2011.

16. **Пашенко Д.И.** Термохимическая регенерация теплоты дымовых газов путем конверсии биоэтанола // Теплоэнергетика. 2013. № 6. С. 59—64.

17. **Ситников М.В.** Исследование паровой некаталитической конверсии метана в теплообменнике регенеративного типа: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1983.

18. **Hoang D.L., Chan S.H., Ding O.L.** Kinetic and Modeling Study of Methane Steam Reforming over Sulfide Nickel Catalyst on a Gamma Alumina Support // Chemical Engineering Journal. 2005. V. 112. Pp. 1—11.

19. **Крылов А.Н., Попов С.К., Сергиевский Э.Д.** Моделирование процессов тепломассообмена при термохимической регенерации теплоты отходящих газов // Вестник МЭИ. 2008. № 4. С. 49—54.

20. **Крылов А.Н.** Повышение эффективности стекловаренных печей на основе комплексной регенерации тепловых отходов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2007.

21. **Рестрепо Г.А.** Повышение энергетической эффективности высокотемпературных установок посредством термохимической рекуперации тепловых отходов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 2011.

22. **Рестрепо Г.А., Глазов В.С., Сергиевский Э.Д., Белалькасар Л.К.** Повышение энергоэффективности системы термохимической рекуперации на основе численного моделирования тепломассообменных процессов в ее элементах // Тепловые процессы в технике. 2012. № 4. С. 165—171.

23. **Рестрепо Г.А., Крылов А.Н., Сергиевский Э.Д.** Моделирование тепломассообменных и кинетических процессов в установке паровой конверсии метана // Вестник МЭИ. 2009. № 6. С. 205—209.

24. **Restrepo G.A., Krylov A.N., Sergievsky E.D.** Heat and Mass Transfer and Kinetic Processes Modeling in a Methane Steam Conversion Facility // ASME 2009 Heat Transfer Summer Conference Collocated with the InterPACK09 and 3rd Energy Sustainability Conferences. San Francisco, California, USA. July 19—23. 2009. V. 3. Pp. 125—129.

25. **Shamkhali A., Omidkhah M.R., Towfighi J., Jafari Nasr M.R.** The Production of Synthesis Gas by a Combination of Steam and Dry Reforming Using GHR // Petroleum Science and Technology. 2012. V. 30. No 6. Pp. 594—604. Access mode: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2010.489094>

26. **А.с. СССР №303344, МКИ5 С 09 J 123/20.** Способ утилизации теплоты отходящих газов МГД-генератора / В.Г. Носач, В.Н. Козлюк, Р.В. Марченко. 960809/24-06; заявл. 21.09.64; опубл. 15.03.78. Бюл. № 10.

27. **Носач В.Г.** Методы повышения эффективности использования топлива в технологических процессах // Теплофизика и теплотехника. 1979. Вып. 37. С. 44—47.

28. **Носач В.Г.** Термохимическая регенерация теплоты в циклах тепловых установок // Промышленная теплотехника. 1981. Т. 3. № 6. С. 60—64.

29. **Носач В.Г.** Исследование и разработка термохимических методов повышения эффективности использования органического топлива: Автореф. дис. ... докт. техн. наук. Киев, 1983.

30. **Носач В.Г.** Энергия топлива. Киев: Наукова думка, 1989.

31. **Kobayashi H.** Thermochemical regenerative heat recovery process. US Pat. 6,113,874. Sep. 5. 2000.

32. **Kobayashi H., Wu K.T., Bell R.L.** Thermochemical Regenerator: A High Efficiency Heat Recovery System for Oxy-Fired Glass Furnaces // DGG/AcerS Conference. Aachen. May 28. 2014.

33. **Gonzalez A., Solorzano E.** OPTIMELT™ Regenerative Thermo-Chemical Heat Recovery for Oxy-Fuel Glass Furnaces // 75th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2015. 36(1):113—120.

34. **Iyoha U., Wu K., Laux S., Kobayashi H., de Diego J.** Improved Furnace Energy Efficiency with OPTIMELT™ Thermochemical Regenerator System. 2015. Access mode: http://www.glassmanevents.com/europe/content-images/misc/Praxair_v2.pdf

35. **Thermochemical** Recuperation for High Temperature Furnaces. 2011. Access mode: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/thermochemical_recuperation.pdf

36. **Giménez-López J., Millera A., Bilbao R., Alzuetta M.U.** Experimental and Kinetic Modeling Study of the Oxy-Fuel Oxidation of Natural Gas, CH₄ and C₂H₆ // Fuel. 2015. V. 160. Pp. 404—412.

37. **Jordal K., Gunnarsson J.** Process Configuration Options for Handling Incomplete Fuel Conversion in CO₂ Capture: Case Study on Natural Gas-Fired CLC // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2011. V. 5. Pp. 805—815.

38. **Крылов О.В.** Углекислотная конверсия метана в синтез-газ // Российский химический журнал. 2000. Т. XLIV. № 1. С. 19—33. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2000-1/19.pdf>

39. **Nandini A., Pant K.K., Dhingra S.C.** Kinetic Study of the Catalytic Carbon Dioxide Reforming of Methane to Synthesis Gas Over Ni-K/CeO₂-Al₂O₃ Catalyst // Applied Catalysis A: General. 2006. V. 308. Pp. 119—127. Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X06002948>

40. **Verykios X.E.** Catalytic Dry Reforming of Natural Gas for the Production of Chemicals and Hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2002. V. 28. No 10. Pp. 1045—1063. Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03603199020215X>

41. **Nikoo M.K., Amin N.A.S.** Thermodynamic Analysis of Carbon Dioxide Reforming of Methane in View

of Solid Carbon Formation // Fuel Processing Technology. 2011. V. 92. Pp. 678—691.

References

1. **Popov S.K.** Razrabotka i Raschet Teplovykh Skhem Termodinamicheskoi Ideal'nykh Ustanovok. Teoriya i Algoritmy. M.: Izd-Vo MPEI, 2005. (in Russian).
2. **Popov S.K., Svistunov I.N., Konopel'ko E.D.** Analiz Effektivnosti Termokhimicheskoy Regeneratsii v Vysokotemperaturnykh Ustanovkakh // Energoberezhenie i Vodopodgotovka. 2014;3:52—56. (in Russian).
3. **Popov S.K., Svistunov I.N., Ippolitov V.A.** Energoberezhenie pri Utilizatsii Teplovykh Otkhodov Promyshlennykh Pechey na Osnove Konversii Prirodnogo Gaza // Teplovye Protssy v Tekhnike. 2015;7:2:80—86. (in Russian).
4. **A.S. SSSR № 142669, MKI3, F 27V 7/02.** Metodicheskaya Rekupeativnaya Pech' dlya Nagreva Metalla / L.A. Shul'ts. 728899/22; Zayavl. 25.04.61; Opubl. 1961. Byul № 22. (in Russian).
5. **A.S. SSSR № 228801, MPK H 02 K 44/08.** Sposob Preobrazovaniya Tepla v Elektricheskuyu Energiyu / I.I. Pereletov. 854115/24-6; Zayavl. 26.08.63; Opubl. 17.10.1968. Byul. № 32. (in Russian).
6. **Pereletov I.I., Shumyatskiy B.Ya., Chulanov E.A.** Khimicheskaya Regeneratsiya Teploty Otkhodyashchikh Gazov v Energeticheskom MGD-Tsikle // Sb. Statey «Magnitogidrodinamicheskii Metod Polucheniya Elektroenergii». / V.A. Kirillin, A.E. Sheyndlin, Red. M.: Energiya, 1968:182—193. (in Russian).
7. **Novosel'tsev V.N.** K Voprosu o Khimicheskoy Regeneratsii Teploty Promyshlennykh Ognetekhnicheskikh Ustanovok: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. — M., 1971. (in Russian).
8. **Pereletov I.I., Shopshin M.F., Novosel'tsev V.N. i dr.** K Voprosu ob Optimal'nom Proektirovanii Reaktora-Teploobmennika v Sisteme Regenerativnogo Teploispol'zovaniya // Sb. Nauch. Trudov «Energetika Promyshlennykh Tekhnologicheskikh Protsssov». M.: MPEI, 1977;332:98—104. (in Russian).
9. **Shopshin M.F.** Issledovanie Reaktora-Teploobmennika Parovoy Konversii Prirodnogo Gaza v Sisteme Regenerativnogo Teploispol'zovaniya Toplivnykh Pechey: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 1979. (in Russian).
10. **Pereletov I.I., Novosel'tsev V.N., Shopshin M.F. i dr.** K Opytno-Promyshlennym Ispytaniyam Steklovarennoy Pechi s Khimicheskoy Regeneratsiey Teploty // Sb. Nauch. Trudov «Energetika Vysokotemperaturnoy Teplotekhnologii». M.: MPEI, 1980;476:26—32. (in Russian).
11. **Shopshin M.F., Novosel'tsev V.N., Tyurin A.I. i dr.** Khimicheskaya Regeneratsiya Teplovykh Otkhodov Toplivnykh Pechey // Energotekhnologicheskie Protssy v Khimicheskoy Promyshlennosti. M.: NIITEKHIM, 1981. (in Russian).
12. **Sikirica S., Kurek H., Kozlov A., Khinkis M.** Thermo-Chemical Recuperation improves furnace thermal efficiency // Heat Treating Progress. 2007;7(5):28—31. Access mode: <http://www.asminternational.org/documents/10192/1917649/http00705p028.pdf/9db475e5-b284-44d6-b373-d36879e8de60/HTP00705P028>
13. **Beerrens R., Muysenberg H.** Comparative Study on Energy-Saving Technologies for Glass Furnaces // Glastechn. Ber. 1992;65;8:216—224.
14. **Maruoka N., Mizuochi T., Purwanto H., Akiyama T.** Feasibility Study for Recovering Waste Heat in the Steelmaking Industry Using a Chemical Recuperator // ISIJ International. 2004;44;2:257—262.
15. **Pashchenko D.I.** Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Vysokotemperaturnykh Teplotekhnologicheskikh Ustanovok za Schet Termokhimicheskoy Regeneratsii Teploty: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Saratov, 2011. (in Russian).
16. **Pashchenko D.I.** Termokhimicheskaya Regeneratsiya Tepla Dymovykh Gazov Putem Konversii Bioetanol // Teploenergetika. 2013;6:59—64. (in Russian).
17. **Sitnikov M.V.** Issledovanie Parovoy Nekataliticheskoy Konversii Metana v Teploobmennike Regenerativnogo Tipa: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 1983. (in Russian).
18. **Hoang D.L., Chan S.H., Ding O.L.** Kinetic and Modeling Study of Methane Steam Reforming over Sulfide Nickel Catalyst on a Gamma Alumina Support // Chemical Engineering Journal. 2005;112:1—11.
19. **Krylov A.N., Popov S.K., Sergievskiy E.D.** Modelirovanie Protsssov Teplomassoobmena pri Termokhimicheskoy Regeneratsii Teploty Otkhodyashchikh Gazov // Vestnik MPEI. 2008;4:49—54. (in Russian).
20. **Krylov A.N.** Povyshenie Effektivnosti Steklovarennykh Pechey na Osnove Kompleksnoy Regeneratsii Teplovykh Otkhodov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2007. (in Russian).
21. **Restrepo G.A.** Povyshenie Energeticheskoy Effektivnosti Vysokotemperaturnykh Ustanovok Posredstvom Termokhimicheskoy Rekupeativsii Teplovykh Otkhodov: Avtoref. Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. M., 2011. (in Russian).
22. **Restrepo G.A., Glazov V.S., Sergievskiy E.D., Belal'kasar L.K.** Povyshenie Energoeffektivnosti Sistemy Termokhimicheskoy Rekupeativsii na Osnove Chislennogo Modelirovaniya Teplomassoobmennykh Protsssov v Ee Elementakh // Teplovye Protssy v Tekhnike. 2012;4:165—171. (in Russian).
23. **Restrepo G.A., Krylov A.N., Sergievskiy E.D.** Modelirovanie Teplomassoobmennykh I Kineticheskikh Protsssov V Ustanovke Parovoy Konversii Metana // Vestnik MPEI. 2009;6:205—209. (in Russian).
24. **Restrepo G.A., Krylov A.N., Sergievskiy E.D.** Heat and Mass Transfer and Kinetic Processes Modeling in a Methane Steam Conversion Facility // ASME 2009

Heat Transfer Summer Conference Collocated with the InterPACK09 and 3rd Energy Sustainability Conferences. San Francisco, California, USA. July 19–23. 2009;3:125–129.

25. **Shamkhali A., Omidkhah M.R., Towfighi J., Jafari Nasr M.R.** The Production of Synthesis Gas by a Combination of Steam and Dry Reforming Using GHR // Petroleum Science and Technology. 2012.;30;6:594–604. Access mode: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10916466.2010.489094>

26. **A.S. SSSR №303344, MKI5 S 09 J 123/20.** Sposob Utilizatsii Teplooty Otkhodyashchikh Gazov MGD-Generatora / V.G. Nosach, V.N. Kozlyuk, R.V. Marchenko. 960809/24-06; Zayavl. 21.09.64; Opubl. 15.03.78. Byul. № 10. (in Russian).

27. **Nosach V.G.** Metody Povysheniya Effektivnosti Ispol'zovaniya Topliva v Tekhnologicheskikh Protessakh // Teplofizika i Teplotekhnika. 1979;37:44–47. (in Russian).

28. **Nosach V.G.** Termokhimicheskaya Regeneratsiya Teplooty v Tsiklakh Teplovykh Ustanovok // Promyshlennaya Teplotekhnika. 1981;3;6:60–64. (in Russian).

29. **Nosach V.G.** Issledovanie i Razrabotka Termokhimicheskikh Metodov Povysheniya Effektivnosti Ispol'zovaniya Organicheskogo Topliva: Avtoref. Dis. ... Dokt. Tekhn. Nauk. Kiev, 1983. (in Russian).

30. **Nosach V.G.** Energiya Topliva. Kiev: Naukova Dumka, 1989. (in Russian).

31. **Kobayashi H.** Thermochemical regenerative heat recovery process. US Pat. 6,113,874. Sep. 5. 2000.

32. **Kobayashi H., Wu K.T., Bell R.L.** Thermochemical Regenerator: A High Efficiency Heat Recovery System for Oxy-Fired Glass Furnaces // DGG/AcerS Conference. Aachen. May 28. 2014.

33. **Gonzalez A., Solorzano E.** OPTIMELT™ Regenerative Thermo-Chemical Heat Recovery for Oxy-Fuel Glass Furnaces // 75th Conference on Glass Problems: Ceramic Engineering and Science Proceedings. 2015. 36(1):113–120.

34. **Iyoha U., Wu K., Laux S., Kobayashi H., de Diego J.** Improved Furnace Energy Efficiency with OPTIMELT™ Thermochemical Regenerator System. 2015. Access mode: http://www.glassmanevents.com/europe/content-images/misc/Praxair_v2.pdf

35. **Thermochemical** Recuperation for High Temperature Furnaces. 2011. Access mode: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/thermochemical_recuperation.pdf

36. **Giménez-López J., Millera A., Bilbao R., Alzuetta M.U.** Experimental and Kinetic Modeling Study of the Oxy-Fuel Oxidation of Natural Gas, CH₄ and C₂H₆ // Fuel. 2015;160:404–412.

37. **Jordal K., Gunnarsson J.** Process Configuration Options for Handling Incomplete Fuel Conversion in CO₂ Capture: Case Study on Natural Gas-Fired CLC // International Journal of Greenhouse Gas Control. 2011;5:805–815.

38. **Krylov O.V.** Uglekislotnaya Konversiya Metana v Sintez-Gaz // Rossiyskiy Khimicheskiy Zhurnal. 2000;XLIV;1:19–33. URL: <http://www.chem.msu.ru/rus/jvho/2000-1/19.pdf> (in Russian).

39. **Nandini A., Pant K.K., Dhingra S.C.** Kinetic Study of the Catalytic Carbon Dioxide Reforming of Methane to Synthesis Gas Over Ni-K/CeO₂-Al₂O₃ Catalyst // Applied Catalysis A: General. 2006.;308:119–127. Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926860X06002948>

40. **Verykios X.E.** Catalytic Dry Reforming of Natural Gas for the Production of Chemicals and Hydrogen // International Journal of Hydrogen Energy. 2002;28;10:1045–1063. Access mode: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S03603199020215X>

41. **Nikoo M.K., Amin N.A.S.** Thermodynamic Analysis of Carbon Dioxide Reforming of Methane in View of Solid Carbon Formation // Fuel Processing Technology. 2011; 92:678–691.

Сведения об авторах

Попов Станислав Константинович — доктор технических наук, профессор кафедры энергетики высокотемпературной технологии НИУ «МЭИ», e-mail: PopovSK@mpei.ru

Свистунов Илья Николаевич — аспирант НИУ «МЭИ», e-mail: ilya.svistunov@gmail.com

Information about authors

Popov Stanislav K. — Dr.Sci. (Techn.), professor of Energetic of High-Temperature Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: PopovSK@mpei.ru

Svistunov Ilya N. — Ph.D.-student of NRU MPEI, e-mail: ilya.svistunov@gmail.com

Статья поступила в редакцию 11.11.2016