

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ТЕПЛОТЫ В ОГNETЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

Д.И. Пащенко

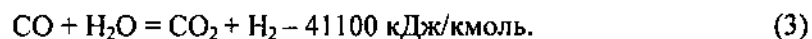
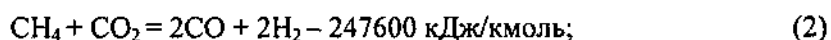
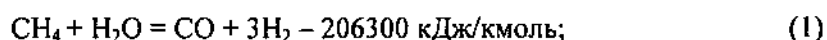
Рассмотрен механизм термохимической регенерации теплоты в промышленных огнетехнических установках. Проведен анализ условий протекания процесса. Выполнен сравнительный анализ применения термохимической регенерации теплоты на примере методической печи.

Ключевые слова: конвертированный газ, равновесный состав, реактор-реформер, термохимическая регенерация, энергосбережение

В соответствии с Указом Президента Российской Федерации «О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики» [1] необходимо осуществить снижение к 2020 году энергоёмкости валового внутреннего продукта Российской Федерации не менее чем на 40% по сравнению с 2007 годом, а также обеспечить рациональное и экологически ответственное использование энергии и ресурсов.

Прогнозные оценки специалистов показывают, что расчетная потребность в энергоресурсах в 2020 году достигнет значения 2,67 млрд т.у.т. Предполагаемые объемы добываемых энергоресурсов значительно меньше – всего около 1,265 млрд т.у.т. Выходом из ситуации является активное проведение энергосберегающей политики [2]. Наиболее быстро возрастают объемы потребления газового топлива. Его преимуществами являются высокие энергетические характеристики, доступность и экологическая чистота. Этот вид используется практически во всех огнетехнических промышленных установках, КПД которых зачастую не превышает 30-40%, в то время как КПД современных паровых и водогрейных котлов близок к своему максимуму.

Для большого числа огнетехнических установок представляет интерес утилизация теплоты высокотемпературных отходящих дымовых газов за счет термохимической регенерации (ТХР). Сущность ТХР тепла отходящих дымовых газов, как показал Семененко [3], заключается в использовании их физического тепла для предварительной эндотермической переработки исходного топлива, которое при этом получает больший запас химически связанного тепла. Процесс сопровождается реакциями парового (1) и углекислотного (2) риформинга метана, а также реакцией водяного газа (3).



В общем виде протекающие в реакторе реакции описываются уравнением $\text{CH}_4 + k(\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + 7,52\text{N}_2) = \alpha\text{CO} + \beta\text{H}_2 + \gamma\text{N}_2 + \varepsilon\text{CH}_4 - (1-\varepsilon)220300 \text{ кДж/кмоль}. \quad (4)$

Пащенко Дмитрий Иванович – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика»

При условии полного окисления метана и стехиометрического расхода дымовых газов коэффициенты перед соответствующими компонентами реакции запишутся в виде

$$k=1/3; \alpha=4/3; \beta=8/3; \gamma=2,51; \varepsilon=0. \quad (5)$$

За счет использования термохимической регенерации теплоты предполагается увеличение КПД промышленных огнетехнических установок до 90-95%. Необходимым условием осуществимости процесса ТХР – температура отходящих дымовых газов должна быть не менее 700-800 °С. Продукты риформинга природного газа содержат горючие компоненты (СО, Н₂, СН₄), которые могут быть использованы как энергетическое топливо этой ОТУ, снижая при этом потребление исходного топлива. Кроме того, горючие компоненты могут быть использованы в химической технологии для производства аммония, метанола и других веществ органического синтеза, а также водорода.

Общая реакция риформинга природного газа (4) протекает с увеличением объема продуктов реакции, поэтому в соответствии с принципом Ле-Шателье увеличение давления снижает степень конверсии природного газа. Увеличение температуры реакции приводит к увеличению значений констант равновесия реакции паровой (1) и углекислотной (2) конверсии метана и снижению константы равновесия реакции водяного газа (3), что приводит к увеличению степени конверсии природного газа. Реакция (4) сильно эндотермична, температура на выходе из реактора-риформера обычно на 25-30 °С выше, чем равновесная. Анализ значений констант равновесия для реакций (1)-(3) показывает, что для обеспечения приемлемой степени конверсии природного газа в реакторе необходимо, чтобы температура дымовых газов была выше 700 °С.

В табл. 1 показан состав конвертированного газа (синтез-газа), полученного в реакторе-риформере при подаче в реактор 1 кмоль СН₄ при стехиометрическом расходе дымовых газов ($\beta = 1,0$) и при количестве дымовых газов, в два раза большем стехиометрического ($\beta = 2,0$), давление в реакторе считаем постоянным ($p=0,098$ МПа). Общая масса входящей в риформер компонентной смеси равна $G_{вх1}=66,1$ кг при $\beta = 1,0$ и $G_{вх2}=116,2$ кг при $\beta = 2,0$. В табл. 1 также представлены полная теплота сгорания $\sum Q$ конвертированного газа и коэффициент трансформации теплоты η_q .

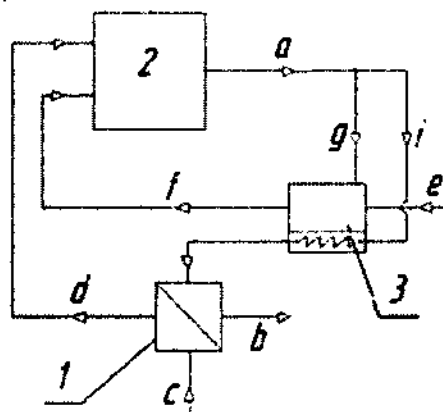
Таблица 1

Равновесный состав конвертированного газа

Т, °С	β	Состав продуктов риформинга, %						$\sum Q$, МДж	η_q
		H ₂	СО	СН ₄	H ₂ O	СО ₂	N ₂		
527	1,0	17,97	4,84	13,96	6,49	7,41	49,34	860,55	1,0726
	2,0	14,57	3,21	6,92	9,48	8,81	57,00	878,54	1,0950
727	1,0	36,69	18,05	2,42	1,42	1,00	40,43	988,76	1,2324
	2,0	26,72	12,36	0,27	6,20	4,11	50,34	1013,69	1,2634
927	1,0	40,43	20,24	0,28	0,20	0,08	38,78	1018,34	1,2692
	2,0	26,07	13,84	0,01	7,20	2,80	50,08	1024,36	1,2768
1127	1,00	40,87	20,45	0,05	0,03	0,02	38,59	1022,01	1,2738
	2,00	25,36	14,55	0,01	7,91	2,09	50,08	1027,29	1,2804

При риформинге природного газа, проводимом с участием пара и диоксида углерода, водорода образуется больше, чем монооксида углерода, поэтому при сжигании конвертированного газа снижаются выбросы диоксида углерода, в результате чего уменьшается загрязнение окружающей среды. Для численного определения снижения выбросов диоксида углерода необходимо провести анализ равновесного состава конвертированного газа и его энергетических характеристик, приведенных в табл. 1. Количество тепла, полученного при сжигании 1 кмоль метана, равно 802,33 МДж, при этом в атмосферу выбрасывается 44 кг диоксида углерода. При сжигании конвертированного газа с равновесным составом, полученным риформингом метана при $T=1127^{\circ}\text{C}$, 44 кг диоксида образуются при сгорании 6,50 кмоль конвертированного газа, при этом выделяется 1027,29 МДж тепла. Таким образом, при сжигании реформированного газа при равном количестве выбрасываемого диоксида углерода возможно получение большего количества полезной теплоты. Другими словами, сжигание продуктов реакции, полученных при риформинге метана, снижает выбросы диоксида углерода в окружающую среду в сравнении со сжиганием метана на 19-21%.

Принципиальная схема использования термохимической регенерации для утилизации теплоты отходящих дымовых газов за методической нагревательной печью представлена на рисунке.



После методической нагревательной печи 2 дымовые газы a разделяют на два потока, первый поток g подают в термохимический реактор-реформер 3, активированный никельсодержащим катализатором, в который также подается природный газ e , где в результате протекания реакции (4) образуется конвертированный газ f с общим газовым составом CO , H_2 , CO_2 , H_2O , CH_4 . Второй поток дымовых газов i направляют на поверхностный обогрев реактора. Остаточную теплоту второго потока дымовых газов утилизируют в воздухоподогревателе 1, в котором происходит нагрев холодного дутьевого воздуха c до температуры горячего воздуха d , в результате чего дымовые газы охлаждаются до температуры потока b .

В табл. 2 приведены результаты расчета технологических и энергетических параметров работы методической нагревательной печи с утилизацией теплоты: а) за счет использования термохимической регенерации; б) за счет физической утилизации теплоты (подогрев дутьевого воздуха до 500°C); в) без утилизации. Здесь $t_{\text{отх}}$ — температура отходящих дымовых газов; $Q_{\text{печи}}$ — тепловая нагрузка печи; $V_{\text{отх}}$ — объем отходящих дымовых газов; $H_{\text{отх}}$ — энтальпия отходящих дымовых газов; $Q_{\text{физ}}$ — физическое тепло дутьевого воздуха; $t_{\text{гв}}$ — температура дутьевого воздуха; $Q_{\text{хим}}$ — химически связанное тепло;

$Q_{рек}$ – общее количество рекуперированной теплоты; $t_{ух}$ – температура уходящих дымовых газов; $H_{ух}$ – энтальпия уходящих дымовых газов; P – коэффициент рекуперации теплоты; η – КПД методической нагревательной печи.

Таблица 2

Энергетические параметры методической нагревательной печи

	Термохимическая регенерация		Подогрев воздуха		Без утилизации	
Вид топлива	Синтез-газ		Природный газ		Природный газ	
$t_{отх}, ^\circ\text{C}$	800	1000	800	1000	800	1000
$Q_{печи}, \text{кДж/м}^3$	50611,3 3	52076,1 7	42341,2 0	42341,2 0	35820,0 0	35820,0 0
$V_{отх}, \text{м}^3/\text{м}^3$	14,03	14,03	10,52	10,52	10,52	10,52
$H_{отх}, \text{кДж/м}^3$	16180,7 4	21479,7 3	12590,3 0	15616,2 0	12590,3 0	15616,2 0
$Q_{физ}, \text{кДж/м}^3$	5941,36	6521,20	6521,20	6521,20	0,00	0,00
$t_{гв}, ^\circ\text{C}$	500	500	500	500	20	20
$Q_{хим}, \text{кДж/м}^3$	8849,97	9734,97	0,00	0,00	0,00	0,00
$Q_{рек}, \text{кДж/м}^3$	15253,3 3	16756,1 7	7021,20	7021,20	0,00	0,00
$t_{ух}, ^\circ\text{C}$	91	353	411	593	800	1000
$H_{ух}, \text{кДж/м}^3$	1288,64	5223,76	6096,10	9095,00	12590,3 0	15616,2 0
P	0,943	0,780	0,511	0,417	0,000	0,000
η	0,961	0,854	0,830	0,746	0,649	0,564

Присутствие водорода в конвертированном газе способствует обеспечению гомогенности топливной смеси, в результате чего увеличивается эффективность рабочих процессов, протекающих в камере сгорания. Связано это, главным образом, с очень высокой скоростью распространения фронта горения этого газа. Низкая скорость распространения фронта горения угарного газа (41 см/с) компенсируется высоким значением этого параметра для водорода (250 см/с), тем самым обеспечивается устойчивое и полное сгорание конвертированного газа.

Внедрение систем утилизации теплоты отходящих дымовых газов на действующих огнетехнических установках будет сопровождаться увеличением объема дымовых газов, поступающих в газоход после рабочей камеры (см. табл. 2). Таким образом, при внедрении описанного способа утилизации необходимо предварительно произвести аэродинамический расчет газодымового тракта. Данный способ на вновь сооружаемых ОТУ следует также использовать после уточненного аэродинамического расчета. Это связано с тем, что объем дымовых газов в случае термохимической регенерации теплоты превышает аналогичный показатель для случая термической регенерации на ~40%.

Как видно из табл. 2, при использовании утилизации теплоты за счет термохимической регенерации значение КПД методической нагревательной печи значительно возрастает, что приводит к большей экономии топлива. Снижение выбросов диоксида углерода на 19-21% существенно улучшает экологические характеристики

печи. Как показал Тапинасси [4], при сжигании конвертированного газа происходит существенное снижение выбросов оксидов азота NO_x в атмосферу. Таким образом, применение термохимической регенерации не только приводит к увеличению энергетической эффективности работы печи, но и обеспечивает улучшение экологических показателей работы печи.

В заключение необходимо отметить следующие преимущества использования термохимической регенерации теплоты:

- этот метод обеспечивает значительную экономию топлива в промышленных огнетехнических установках и позволяет получать практически полную рекуперацию теплоты отходящих дымовых газов;
- для обеспечения приемлемой степени конверсии природного газа в реакторе-риформере необходимо, чтобы температура дымовых газов была выше 700°C ;
- выбросы диоксида углерода снижаются на 19-21%, а также происходит значительное снижение выбросов NO_x ;
- предложенный способ включения углекислого газа в технологический топливный цикл является перспективным направлением развития этого подхода, с которым связана возможность существенного расширения сырьевых ресурсов и значительного возврата CO_2 , в том числе и в горючую массу топлива;
- реактор-риформер выполняет роль «химического трансформатора», т.е. обеспечивает трансформацию физической теплоты дымовых газов в химическую энергию конвертированного газа (синтез-газа).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Указ Президента Российской Федерации №889 от 4 июня 2008 года.
2. Данилов О.Л. Энергосбережение в теплотехнике и теплотехнологиях. – М.: МЭИ, 2004. – 64 с.
3. Семенов Н.А. Вторичные энергоресурсы промышленности и энерготехнологическое комбинирование. – М.: Энергия, 1983. – 278 с.
4. Tapinassi L. Exergy analysis of the recuperative auto thermal reforming (R-ATR) and recuperative reforming (R-REF) power cycles with CO_2 removal // Energy. – 2004. – №29. – P. 2003-2024.

Статья поступила в редакцию 30 июня 2009 г.

UDC 620.97

THE USE OF THERMOCHEMICAL REGENERATION OF HEAT IN FIRE INSTALLATIONS

D.I. Paschenko

The mechanism of thermochemical regeneration of heat in industrial fire installations was examined. The process conditions analysis was carried out. A comparative analysis of the thermochemical heat regeneration usage by the example of the methodical furnace was represented.

Keywords: *converted gas, equilibrium composition, reactor-reformer, thermochemical regeneration, energy conservation.*