

Согласно этим схемам предлагается организовать отбор продуктов сгорания в первой отапливаемой зоне печи по обеим сторонам конвейерной ленты (с увеличением сечения каналов на противоположной от отверстия дымоотбора стороне), что позволит увеличить конвективную составляющую теплообмена нагреваемых изделий с печной средой (продуктами сгорания) за счет повышения скорости их движения вблизи заготовок. Одновременно необходимо снизить температуру в первой зоне печи (по показаниям рабочих термопар) на 15–20 % и обеспечить максимальную герметичность нижней камеры печи, в которой конвейерная лента совершает обратный ход. Данное усовершенствование позволит эффективнее использовать теплоту продуктов сгорания внутри печного пространства при сохранении необходимой производительности, а также повысить эффективность работы системы рекуперации.

Литература

1. Промышленные теплотехнологии: Печи и сушила машиностроительного и металлургического производства: учеб. / А.П. Несенчук [и др.]. – Минск: Выш. шк., 1999. – 238 с.

УДК 66.013.6

**П.Э. РАТНИКОВ, канд. техн. наук,
Д.В. МЕНДЕЛЕВ (БНТУ)**

ОПТИМИЗАЦИЯ ТОПЛИВНО-КИСЛОРОДНЫХ РЕЖИМОВ СЖИГАНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВКАХ

В настоящее время к числу альтернативных источников энергии в теплотехнике следует отнести топливно-кислородные, а также комбинированные топливно-электрический и электрический источники энергии. Топливоно-кислородный источник энергии открывает следующие возможности:

- снижение выноса технологических материалов и загрязнения окружающей среды, снижение общих габаритов и конструктивных схем установок;
- резкое снижение удельного выхода продуктов сгорания;
- уменьшение расхода топлива.

В данной работе анализируется применение топливно-кислородных режимов сжигания топлива на примере теплогенераторов небольшой мощности, применяемых в системах жилищно-коммунальных хозяйств.

Топливо-воздушный. Это практически единственный режим при сжигании топлива, применяемый в настоящее время, как в теплоэнергетике, так и в других отраслях промышленности. В качестве окислителя для сжигания используется воздух, в состав которого входят основные компоненты: 21 % кислорода и 79 % азота. Если кислород участвует в реакции окисления, то азот является балластом, на подогрев и транспортировку которого в тепловой энергоустановке расходуется определенное количество энергии. Наряду с энергетической составляющей (балласта), у азота имеются еще и экологические аспекты. Азот, содержащийся в воздухе, совместно с азотом топлива являются источниками появления в продуктах сгорания топлива опасных азотистых соединений. Следует отметить, что если в сжигаемом топливе азот не содержится, то воздух является единственным источником азотистых соединений.

Топливо-воздушно-кислородный режим (50 % кислорода и 50 % азота). Топливо-воздушно-кислородный режим сжигания топлива выбран для теоретических расчетов с целью выявления зависимостей между топливно-воздушным и топливно-кислородным режимом. Т.е. в воздух, используемый в качестве окислителя, для сжигания топлива подавать кислород и довести его содержание в воздухе до 50 %.

Топливо-кислородный источник энергии (100 % кислорода в качестве окислителя). Топливо-кислородный режим предполагает вместо воздуха-окислителя при сжигании топлива подачу чистого кислорода. Практическое использование этого способа сжигания топлива возможно только там, где имеется производство кислорода в достаточном количестве. Таким источником кислорода может быть либо завод по производству кислорода, либо предприятие, где кислород является побочным продуктом, например, предприятия газовой промышленности, где имеются установки по отделению азота из воздуха, для получения инертного газа и использования его для вытеснения газа из газопровода

(продувки). Этому условию соответствуют практически все современные компрессорные станции.

Себестоимость кислорода в настоящее время достаточно высока, но развитие современных технологий позволяет прогнозировать существенное снижение затрат на производство кислорода, а открывающиеся возможности применения топливно-кислородного способа сжигания топлива с точки зрения экономии энергоресурсов делают этот способ довольно перспективным (особенно если учитывать мировые тенденции повышения цен на природный газ).

Произведем расчет теплогенерирующих установок при различном процентном содержании кислорода в воздухе:

- 1). топливно-воздушный способ (21 % кислорода и 79 % азота);
- 2). топливно-кислородный (100 % кислорода);
- 3). топливно-воздушно-кислородный (50 % кислорода и 50 % азота).

Для теоретического сравнения вариантов горения топлива приняты следующие начальные условия и допущения:

- в процессе прохождения по газовому тракту теплогенератора коэффициент избытка воздуха не изменяется;
- количество воздуха и кислорода, требуемого для горения, соответствует теоретически необходимому (соответственно объемы продуктов сгорания также равны теоретически необходимым).

Энтальпия трехатомных газов I_{RO_x} , азота I_{N_2} , водяных паров I_{H_2O} и воздуха I_v при избыточной температуре T определяются по формулам

$$I_{RO_x} = V_{RO_x} (cT)_{RO_x};$$

$$I_{N_2} = V_{N_2} (cT)_{N_2};$$

$$I_{H_2O} = V_{H_2O} (cT)_{H_2O};$$

$$I_v = V_v (cT)_v,$$

где c – теплоемкости соответствующих компонентов продуктов сгорания, Дж/м³; V_{RO_x} , V_{N_2} , V_{H_2O} – теоретические объемы продуктов сгорания соответствующих трехатомных газов, м³/м³.

Суммарная энтальпия продуктов сгорания при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 1$ вычисляется путем суммирования

$$I_{\Gamma} = I_{\text{RO}_x} + I_{\text{N}_2} + I_{\text{H}_2\text{O}} + I_{\text{B}}.$$

Для численного эксперимента (при $\alpha = 1$) приняты следующие теоретические объемы природного газа:

$$V^0 = 9,91; V_{\text{RO}_x}^0 = 1,06; V_{\text{N}_2}^0 = 7,84; V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 2,2.$$

Расчет энтальпий продуктов сгорания I_{Γ} для топливно-воздушного, топливно-кислородного и топливно-воздушно-кислородного режима сведены соответственно в таблицы 1–3.

Таблица 1 – Энтальпии продуктов сгорания при топливно-воздушном режиме

Поверхность нагрева	Температура газов	Энтальпия газов			
		I_{RO_x}	I_{N_2}	$I_{\text{H}_2\text{O}}$	I_{Γ}
Топка $\alpha = 1$ Газоход $\alpha = 1$	2000	5141	23284	8646	37072
	1600	3996	18189	6608	29793
	1200	2883	13328	4697	20908
	800	1807	8561	2937	13305
	400	819	4131	1379	6330
	200	378	2038	671	3087

Таблица 2 – Энтальпия продуктов сгорания при топливно-кислородном режиме

Поверхность нагрева	Температура газов	Энтальпия газов		
		I_{RO_x}	$I_{\text{H}_2\text{O}}$	I_{B}
Топка $\alpha = 1$ Газоход $\alpha = 1$	2000	5141	8646	13787
	1600	3996	6608	10605
	1200	2883	4697	7580
	800	1807	2937	4744
	400	819	1379	2128
	200	378	671	1049

Таблица 3 – Температура продуктов сгорания при топливно-кислородно-воздушном режиме (50 % кислорода и 50 % азота)

Поверхность нагрева	Температура газов	Энтальпия газов			
		I_{RO_x}	I_{N_2}	I_{H_2O}	I_r
Топка $\alpha = 1$	2000	5141	11642	8646	25429
	1600	3996	9094	6608	19669
	1200	2883	6664	4697	14244
Газоход $\alpha = 1$	800	1807	4280	2937	9024
	400	819	2065	1379	4264
	200	378	1019	671	2068

По результатам расчетов таблиц 1–3 определена зависимость значений энтальпии I_r от температуры T для различных режимов сжигания (рисунок 1).

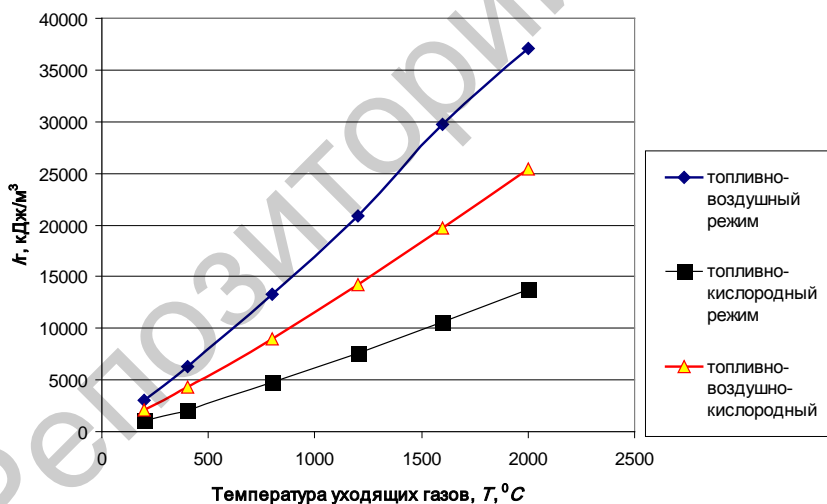


Рисунок 1 – Изменение энтальпии продуктов сгорания I_r для топливно-воздушного, топливно-кислородного и топливно-воздушно-кислородного режима

Изменение доли энтальпии азота $I_{N_2} (\beta)$ в энтальпии уходящих топочных газов I_r определяется по приведенной ниже формуле, а

характер изменения β в зависимости от температуры приведен на рисунке 2

$$\beta = (I_{N_2} / I_r) 100 \%$$

При варьировании различным процентным содержанием кислорода в воздухе, подаваемом на горение, получены зависимости, приведенные на рисунках 1 и 2.

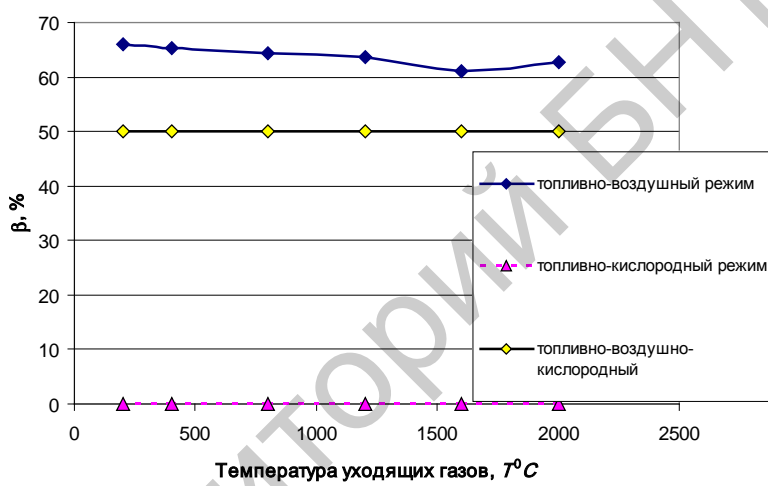
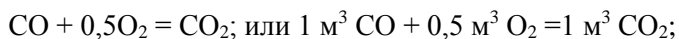


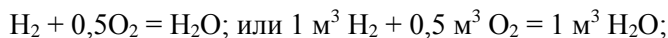
Рисунок 2 – Изменение доли β энthalпии азота в энthalпии уходящих газов в зависимости от температуры при различных режимах сжигания

При сжигании газообразного топлива количество теоретически необходимого воздуха находят из стехиометрических уравнений реакций всех компонентов газообразного топлива. Уравнения горения имеют вид:

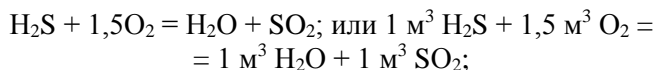
– для оксида углерода:



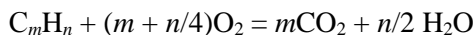
– водорода:



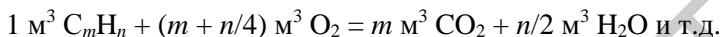
– сероводорода:



– углеводородов:



или



Аналогично для всех составляющих газообразного топлива определяется количество теоретически необходимого кислорода для горения

$$\text{O}_2^0 = 0,01 \left[0,5(\text{CO} + \text{H}_2 + 3\text{H}_2\text{S}) + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 \right], \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Для удобства расчетов выражение в фигурных скобках обозначим через $\hat{\Phi}$ – коэффициент теоретически необходимого кислорода для горения топлива

$$0,5(\text{CO} + \text{H}_2 + 3\text{H}_2\text{S}) + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) \cdot \text{C}_m\text{H}_n - \text{O}_2 = \hat{\Phi},$$

тогда количество теоретически необходимого воздуха для горения топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$, составит для:

1) топливно-воздушного режима

$$V_1^0 = (0,01/0,21)\hat{\Phi} = 0,0476\hat{\Phi};$$

2) топливно-кислородного режима

$$V_2^0 = 0,01\hat{\Phi};$$

3) топливно-воздушно-кислородного режима

$$V_3^0 = 0,5\hat{\Phi} \cdot (0,0476 + 0,01) = 0,0288\hat{\Phi}.$$

Следовательно, в формулах расчета объемов продуктов сгорания вместо теоретически необходимого количества воздуха V^0 , следует принимать следующие соотношения:

1) топливно-воздушный режим $V_1^0 = V^0$;

2) топливно-кислородный режим $V_2^0 = 0,21V^0$;

3) топливно-воздушно-кислородный режим (смесь 50 % азота и 50 % кислорода) $V_2^0 = 0,605V^0$.

Так как процессы горения в теплогенерирующих установках систем теплоснабжения протекают не идеально, то в топку необходимо подавать большее количество воздуха (кислорода), чем теоретически необходимо.

Величина превышения над теоретически необходимым объемом воздуха зависит от конструктивных особенностей газогорелочных устройств (одной из функций которых является подготовка газозоудушной смеси для сжигания). Соответственно избыточное количество подаваемого воздуха уменьшает тепловой коэффициент полезного действия теплогенерирующих установок. Чем лучше организован процесс перемешивания, тем меньше должен быть избыток воздуха (кислорода) по сравнению с теоретически необходимым. Для теоретических расчетов примем параметры, близкие к практическим (коэффициент избытка воздуха равен 1,1 и не изменяется в процессе прохождения топочных газов по газовому тракту). Подсосами воздуха пренебрегаем, так как теплогенерирующие установки полностью обшиты металлом. Этим ограничениям с большой степенью достоверности удовлетворяют все современные котлы теплогенерирующих установок систем жилищно-коммунальных хозяйств.

Вместе с расчетом объемов продуктов сгорания и последующим их сравнением выполним расчет температуры точки росы – как важнейшей характеристики систем теплоснабжения. По рекомендациям зарубежных и отечественных производителей котлов величину температуры точки росы +5 °С считают минимально допустимой температурой обратной сетевой воды в системах теплоснабжения.

Объем продуктов сгорания является важной теплотехнической характеристикой теплогенерирующей установки. Увеличение или уменьшение этой величины связано с размерами газозоудушного тракта, высотой дымовой трубы. Результаты расчетов объемов продуктов сгорания для топливно-воздушного, топливно-кислородного и топливно-воздушно-кислородного режима приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Объемы продуктов сгорания газообразного топлива при различных режимах сжигания

Величина и размерность	Расчетная формула	Теоретические объемы, м ³ /м ³		
		Топливо-воздушный режим $V_1^0 = V^0 = 9,91$ $V_{ROX} = 1,06$ $V_{N_2} = 7,84$ $V_{H_2O} = 2,2$	Топливо-воздушно-кислородный режим $V_3^0 = 0,605V^0 = 5,99$ $V_{ROX} = 1,06$ $V_{N_2} = 3,92$ $V_{H_2O} = 2,2$	Топливо-кислородный режим $V_2^0 = 0,21V^0 = 2,08$ $V_{ROX} = 1,06$ $V_{N_2} = 0$ $V_{H_2O} = 2,2$
		$V_1^0 = V^0$	$V_2^0 = 0,605V^0$	$V_3^0 = 0,21V^0$
1	2	3	4	5
Коэффициент избытка	α_r	1,1	1,1	1,1
Действительный объем водяных паров, м ³ /м ³	$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,0161(\alpha_{\bar{a}} - 1)$	2,2159	2,2096	2,2033

Окончание таблицы 4

1	2	3	4	5
Действительный суммарный объем продуктов сгорания, м ³ /м ³	$V_{\bar{a}} = V_{\text{H}_2\text{O}} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{ROX}} + (\alpha - 1)V^0$	12,1229	7,7886	3,4713
Объемная доля трехатомных газов	$\rho_{\text{RO}\bar{o}} = \frac{V_{\text{RO}\bar{o}}}{V_{\bar{a}}}$	0,0874	0,1361	0,3054
Объемная доля водяных паров	$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{V_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\bar{a}}}$	0,1828	0,2837	0,6347
Суммарная объемная доля	$\rho_{\bar{i}} = \rho_{\text{ROX}} + \rho_{\text{H}_2\text{O}}$	0,2702	0,4198	0,9401
Температура точки росы, °С	$t_{\text{т.р}}$	58,4	67,4	86,7

Из проведенного расчета объемов продуктов сгорания (таблица 4) установлено, что при топливно-кислородном режиме сжигания газообразного топлива температура точки росы $t_{т.р} = 86,7 \text{ }^\circ\text{C}$, а при топливно-воздушно-кислородном – $t_{т.р} = 67,4 \text{ }^\circ\text{C}$. Исходя из требования работы современных тепловых сетей и эксплуатационных характеристик котельных агрегатов можно заключить, что для паровых котельных возможно использование любого из трех режимов работы, а для водогрейных котлов – только топливно-воздушный или топливно-воздушно-кислородный.

Расчет энтальпий продуктов сгорания I_T для топливно-воздушного, топливно-кислородного и топливно-воздушно-кислородного режима выполнены для температур топочных газов от 2000 до 100 $^\circ\text{C}$. На рисунке 3 представлен график, показывающий изменение энтальпии уходящих топочных газов в трех режимах сжигания газообразного топлива.

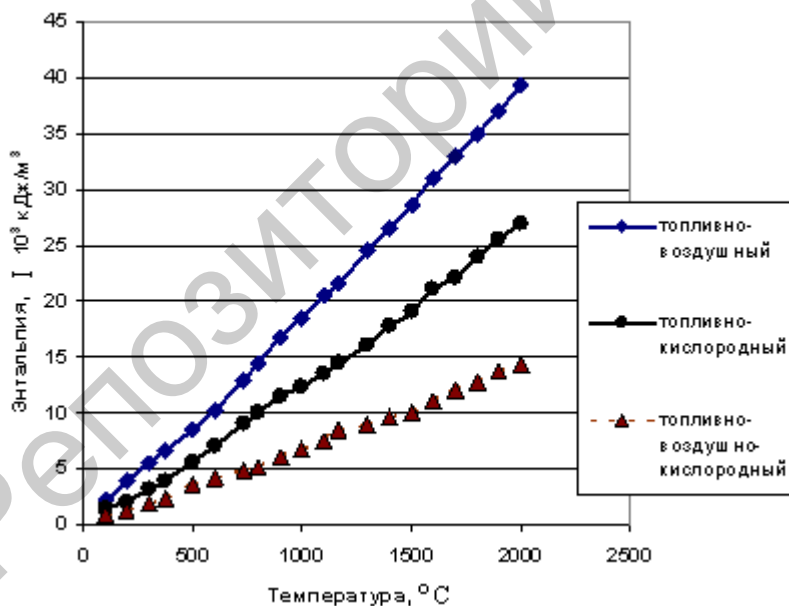


Рисунок 3 – Диаграмма «энтальпия – температура продуктов сгорания» при различных режимах сжигания топлива

Для более четкого определения эффективности замены воздуха, участвующего в горении, на кислород приведем расчет теплового баланса водогрейного теплогенератора при различных температурах уходящих газов: 100, 150, 200 и 250 °С. Результаты расчета теплового баланса приведены в таблице 5.

По результатам расчета теплового баланса, приведенного в таблице 5, можно проследить степень изменения коэффициента полезного действия теплогенерирующей установки в зависимости от температуры уходящих топочных газов при трех возможных режимах сжигания газообразного топлива.

На основании приведенных расчетов можно сделать вывод, что для современных водогрейных теплогенерирующих установок можно применять топливно-воздушно-кислородный режим сжигания газообразного топлива с заменой 50 % необходимого воздуха на кислород.

Изменение коэффициента полезного действия в трех режимах сжигания в зависимости от температуры уходящих продуктов сгорания приведено на рисунке 4.

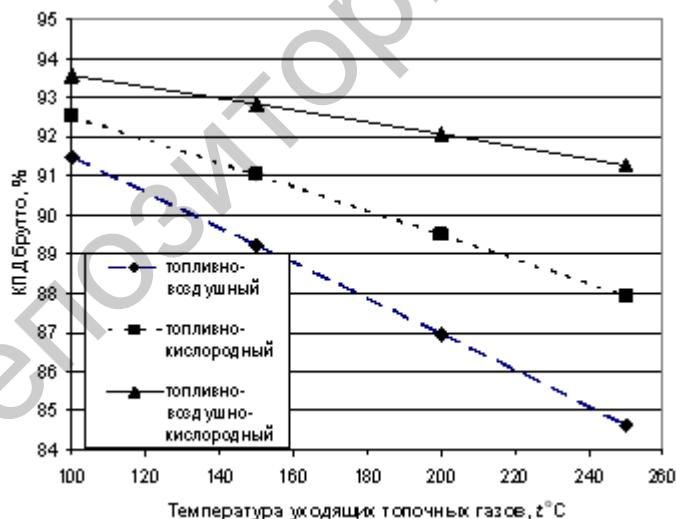


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента полезного действия теплогенерирующей установки от температуры уходящих газов при трех режимах сжигания газообразного топлива

Таблица 5 – Тепловой баланс теплогенератора

Наименование параметра и размерность	Обозначение	Расчетная формула или способ определения	Топливо-воздушный	Топливо-воздушно-кислородный	Топливо-кислородный
1	2	3	4	5	6
Расход воды номинальный, кг/ч	$G_{\text{ном}}$	заданные условия	34000	34000	34000
Мощность номинальная, МВт	$Q_{\text{ном}}$	заданные условия	1	1	1
Темп-ра воды, °С: на входе на выходе	t' t''	$t' = 70$ $t'' = 95$	70 95	70 95	70 95
Энтальпия воды, кДж/кг: на входе на выходе	i' i''	$i' \cdot 4,19$ $i'' \cdot 4,19$	293 398	293 398	293 398
Расход воды, кг/с	$G_{\text{вк}}$	$G_{\text{ном}} = G_{\text{вк}}$	9,44	9,44	9,44
Расчетная полезная мощность котла, кВт	$Q_{\text{вк}}$	$G_{\text{вк}}(i'' - i')$	988,8	988,8	988,8
Низшая теплота сгорания топлива, кДж/м ³	Q_i^{δ}	для газа	37310	37310	37310
Располагаемая теплота, кДж/м ³	Q_{δ}^{δ}	для газа $Q_{\delta}^{\delta} = Q_i^{\delta}$	37310	37310	37310
Температура воздуха, °С	$t_{\text{в}}$	20–30 °С	20	20	20
Коэффициент избытка воздуха уходящих газов	$\alpha_{\text{ух}}$	для водогрейного котла $\alpha_{\text{ух}} = \alpha_{\text{г}}$	1,1	1,1	1,1
Энтальпия холодного воздуха, кДж/кг	$I_{\text{х.в}}$	$39,8 \cdot V^0$	394,4	238,4	82,8

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6
Температура уходящих топочных газов, °С	t_{yx}	принята	100	100	100
			150	150	150
			200	200	200
			250	250	250
Энтальпия уходящих топочных газов, кДж/кг	I_{yx}	из рисунка 3	1666	1103	541
			2511	1667	823
			3357	2231	1106
			4226	2814	1403
Потеря теплоты с уходящими топочными газами, %	q_2	$(I_{yx} - I_{x,в} \cdot \alpha_{yx}) / Q_0^{\delta}$	3,302	2,254	1,205
			5,569	3,766	1,962
			7,835	5,278	2,720
			10,160	6,841	3,516
Потеря теплоты от химического недожога, %	q_3	по характеристике топки	0,5	0,5	0,5
Потеря теплоты от наружного охлаждения, %	q_5	по пром. данным	5,21	5,21	5,21
Сумма потерь теплоты, %	Σq	$q_2 + q_3 + q_5$	8,512	7,464	6,415
			10,78	8,976	7,172
			13,05	10,49	7,930
			15,37	12,05	8,726
Коэффициент полезного действия брутто, %	$\eta_{бр}$	$100 - \Sigma q$	91,49	92,54	93,59
			89,22	91,02	92,83
			86,95	89,51	92,07
			84,63	87,95	91,27
Полный расход топлива, м ³ /с	B	для водогрейного котла $100 \cdot Q_{вк} / Q_0^{\delta} \cdot \eta_{бр}$	0,029	0,029	0,028
			0,030	0,0295	0,0285
			0,0305	0,031	0,029
			0,031	0,033	0,029
Расчетный расход топлива, м ³ /ч	B_p	для газа $B \cdot 3600$	104,3	103,1	101,9
			106,9	104,8	102,8
			109,7	106,6	103,6
			112,8	108,5	104,5

Из расчетов объемов и энтальпий продуктов сгорания, а также теплового баланса водогрейного теплогенератора следует, что при топливно-воздушно-кислородном режиме сжигания газообразного топлива точка росы не превышает 70 °С, т.е. нижнего предела расчетного температурного графика тепловых сетей и водогрейных котлов, что полностью исключает низкотемпературную коррозию поверхностей нагрева. Кроме того, при температуре уходящих дымовых газов 100 °С коэффициент полезного действия теплогенератора при топливно-воздушно-кислородном режиме сжигания топлива на 1,05 % больше, чем при топливно-воздушном режиме, что экономит топливо. Как видно из рисунка 4, разница в КПД при топливно-воздушном и топливно-кислородном режимах при температуре уходящих газов 100 °С составляет 2 %, а при температуре 250 °С – 7 %.

УДК 621.762

Д.А. ОЛЕШКЕВИЧ
(ИНСТИТУТ СВАРКИ И
ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НАНБ)

ИЗУЧЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ЛЕГИРОВАНИЯ НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА ПРИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ НАПЛАВКЕ ПОКРЫТЫМИ ЭЛЕКТРОДАМИ

Совершенствование специальных износостойких сплавов, повышение их технико-экономических показателей по-прежнему является актуальной проблемой, привлекающей пристальное внимание исследователей [1]. Существующая ситуация настоятельно требует создания отечественных высокоэффективных наплавочных электродов. Разработка подобных многокомпонентных сплавов является сложной задачей со многими неизвестными. Решение задачи по повышению абразивной износостойкости наплавленного металла возможно как путем изучения основных физико-химических взаимодействий основных легирующих элементов с использованием