

УДК 620.9

А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ ТУРБОДЕТАНДЕРНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИЛОВОГО ПОТЕНЦИАЛА ТОПЛИВНОГО ГАЗА

Рассчитана энергетическая эффективность использования силового потенциала топливного газа при применении двухпоточной схемы детандер-генераторного агрегата (ДГА) с параллельным распределением газового потока между цилиндрами агрегата в составе утилизационной турбодетандерной установки (УТДУ). Показано, что с учетом принятых допущений обеспечивается как прирост мощности ДГА и, соответственно, выработки им электроэнергии, так и некоторое снижение удельных затрат топлива.

Ключевые слова: турбодетандерный агрегат, двухцилиндровая УТДУ, переменный режим работы, энергетическая эффективность, топливный газ, удельный расход теплоты, производство электроэнергии.

На эффективность работы ДГА турбинного типа существенное влияние оказывает режим функционирования системы газоснабжения крупного промышленного предприятия [1]. При наличии значительной сезонной неравномерности потребления газа на технологические нужды приходится использовать ДГА для производства электроэнергии на неоптимальных режимах, отличающихся снижением КПД агрегата и падением выработки электроэнергии, что увеличивает срок окупаемости модернизированной ГРС.

Для условий работы завода по производству цемента (табл. 1) негативное влияние падения потребления газа в зимний период года может компенсироваться изменением конфигурации детандерного оборудования путем включения дополнительной приводной УТДУ в нижний каскад редуцирования давления газа [2]. Приводная УТДУ в этой схеме используется для привода нагнетательного оборудования и может работать без существенной потери эффективности на переменных режимах. Производимый УТДУ сжатый воздух используется для частичного замещения производства сжатого воздуха в заводской компрессорной станции, чем и обеспечивается в итоге экономия электроэнергии, приобретаемой от энергосистемы.

Таблица 1

Режим работы цементного завода

Месяц	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
Среднечасовой расход газа, $\text{нм}^3/\text{ч}$	21013	23404	25796	30579	38267	46638	50738	51079	47321	38267	25625	21183

Поиск оптимальной конфигурации детандерного оборудования логично продолжить. В литературе [3-7] рассматриваются различные схемы компоновки ДГА. В настоящей работе предлагается способ распределения годовой выработки электроэнергии между двумя параллельно действующими цилиндрами одновальной УТДУ, работающей на один электрогенератор (рис. 1).

На номинальном режиме потребления газа в летний период через каждый цилиндр УТДУ проходит расход газа, равный половине полного расхода газа на заводской ГРС, т. е. $G_{1H} = G_{2H} = 0,5G_H = 25625 \text{ м}^3/\text{ч}$. При падении потребления газа один из цилиндров продолжает работу с постоянным расходом (базовый цилиндр), а подача газа во второй (регулирующий) цилиндр снижается. Таким образом, при уменьшении потребления газа удастся сохранить оптимальный режим производства более половины производимой электроэнергии до того момента, когда расход газа через регулирующий цилиндр снизится до уровня $0,4G_{1H}$. Такое ограничение связано прежде всего с необходимостью вентиляции цилиндра и недопущения перегрева элементов его конструкции. Потребление газа заводом в этом случае составит 70% от летнего максимума. Длительность периода, когда потребление газа заводом не опускается ниже 70%, составляет в нашем случае 160 суток за год. Дальнейшее снижение потребления газа приводит к необходимости сокращать его пропуск через базовый цилиндр УТДУ до тех пор, пока не будет достигнут уровень зимнего минимума. Использованный здесь принцип работы цилиндров турбины с переменным расходом рабочего тела в течение эксплуатационной кампании характерен для теплофикационных паротурбинных установок и хорошо апробирован.

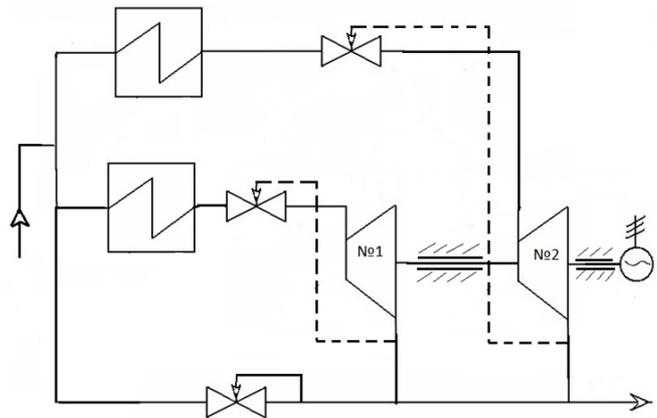


Рис. 1. Принципиальная схема двухцилиндровой одновальной УТДУ

На рис. 2 показаны графики зависимости электрической мощности УТДУ, сконфигурированной по базовой [1] и предлагаемой модернизированной двухцилиндровой компоновке, от относительного расхода газа через ГРС.

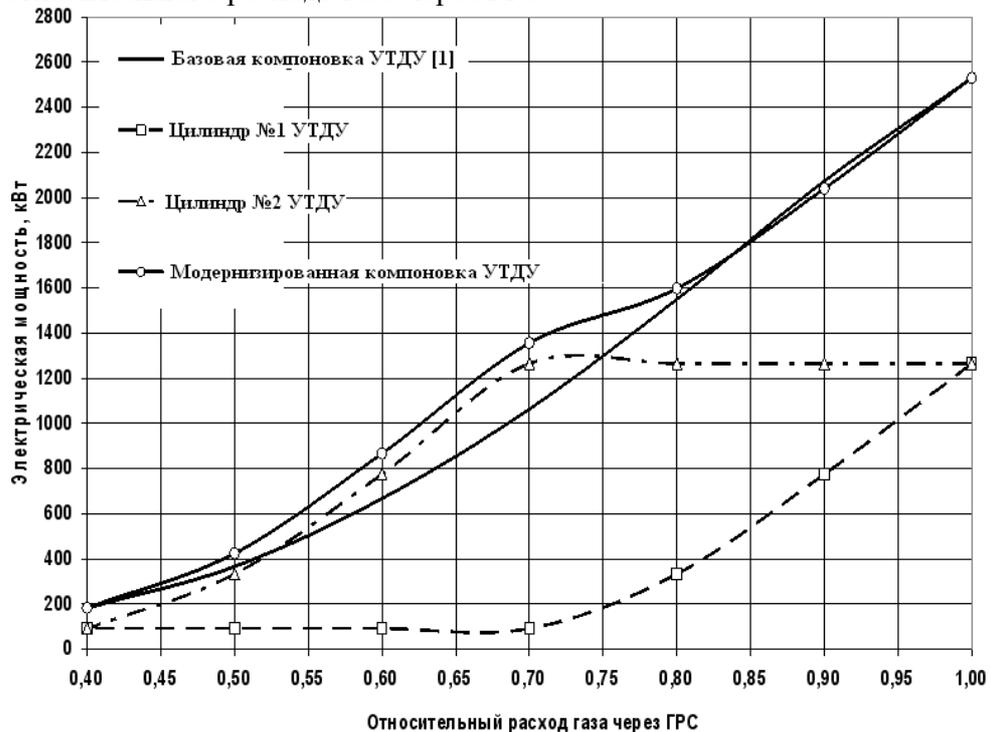


Рис. 2. Электрические мощности УТДУ базовой и модернизированной компоновки

Принято, что цилиндр №1 работает в регулирующем режиме, а цилиндр №2 – в базовом (рис. 1). Как показывает рис. 2, при рассмотренной конфигурации УТДУ достигается ощутимое повышение суммарной мощности установки на режимах газопотребления 0,5...0,8 от номинального уровня. На режиме относительного расхода газа через ГРС, равного 0,5, получаем дополнительную мощность около 60 кВт, на режиме 0,6 – 200 кВт, на режиме 0,7 – 290 кВт, на режиме 0,8 – около 40 кВт. Некоторое снижение мощности двухцилиндровой УТДУ на режимах, близких к номинальному, по-видимому, объясняется тем, что при уменьшении общего расхода газа падение мощности в регулирующем цилиндре №1 происходит быстрее, чем в единственном цилиндре УТДУ базовой компоновки [1]. Особенно значительное повышение мощности наблюдается, когда относительный расход газа составляет от 0,55 до 0,75. Эти режимы газопотребления удерживались на протяжении около 70-80 суток за год.

На основе режима потребления газа в течение года, характерного для предприятий цементной промышленности (табл. 1), был построен график выработки электроэнергии УТДУ базовой и модернизированной компоновки (рис. 3).

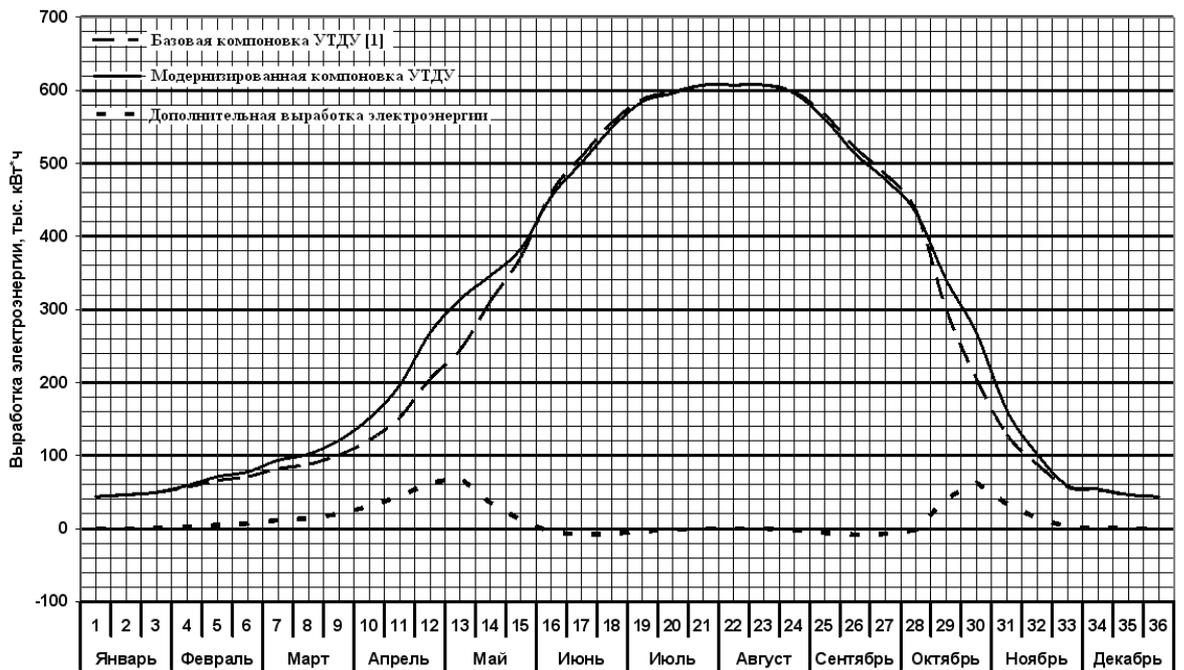


Рис. 3. Выработка электроэнергии УТДУ базовой и модернизированной компоновки

Из рис. 3 видно, что наибольший прирост выработки электроэнергии приходится на те периоды, для которых относительный расход газа по заводу составляет 0,5 – 0,8; на временном интервале, соответствующем расходам газа, близким к номинальному значению (с 16 до 28 декады), наблюдается незначительное снижение выработки электроэнергии, что согласуется с данными на рис. 2.

График изменения удельного расхода топлива на производство электроэнергии в УТДУ в течение года увязан с графиком выработки электроэнергии УТДУ и содержит ту же характерную особенность (рис. 4). Наблюдается полностью симметричная картина: с 16 по 28 декаду удельный расход условного топлива практически не изменился, а в остальное время снижение данного показателя составило до 6 г у.т./(кВт·ч), или около 3% (относительно декады).

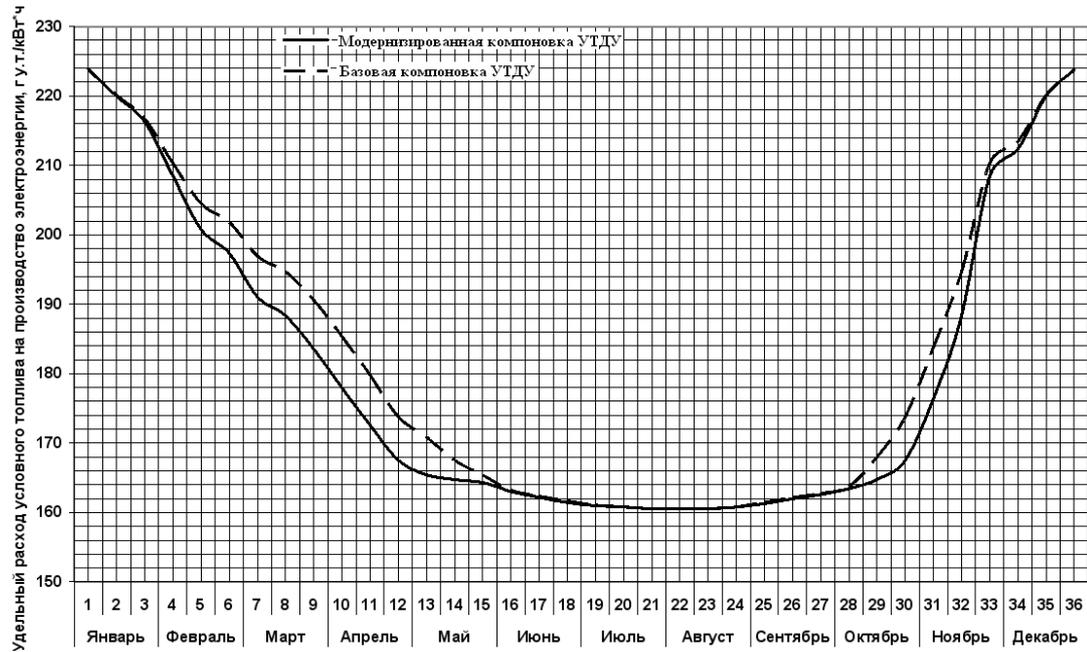


Рис. 4. Удельный расход топлива на производство электроэнергии УТДУ

В табл. 2 показано, как изменяются выработка электроэнергии и потребление топлива УТДУ на протяжении года.

Таблица 2

Сравнительные показатели УТДУ базовой и модернизированной компоновки

Месяц	Базовая компоновка			Модернизированная компоновка			Дополнительные выработка электроэнергии и затраты топлива	
	W _I , тыс. кВт·ч	Π _I , т у.т.	Q _I , Г у.т./кВт·ч	W _{II} , тыс. кВт·ч	Π _{II} , т у.т.	Q _{II} , Г у.т./кВт·ч	ΔW, тыс. кВт·ч	ΔΠ, т у.т.
Январь	139,33	30,65	219,99	139,79	30,73	219,84	0,46	0,08
Февраль	193,34	39,68	205,23	207,45	41,84	201,68	14,11	2,16
Март	270,12	52,35	193,80	315,47	59,09	187,31	45,35	6,74
Апрель	477,76	85,34	178,63	614,55	105,53	171,72	136,79	20,19
Май	928,14	155,52	167,56	1043,88	172,03	164,80	115,75	16,51
Июнь	1526,11	247,79	162,37	1505,21	244,09	162,16	-20,91	-3,70
Июль	1792,80	288,30	160,81	1787,26	287,34	160,77	-5,54	-0,96
Август	1812,13	291,11	160,65	1809,97	290,73	160,63	-2,16	-0,38
Сентябрь	1573,96	255,14	162,10	1551,93	251,28	161,91	-22,03	-3,86
Октябрь	939,58	157,20	167,31	1040,77	171,65	164,93	101,19	14,45
Ноябрь	273,00	52,63	192,78	322,72	60,04	186,04	49,72	7,41
Декабрь	142,83	31,24	218,72	143,99	31,43	218,28	1,16	0,19
Итого за год	10069,09	1686,95	167,54	10482,98	1745,78	166,53	413,89	58,83

В итоге за год достигаются следующие интегральные показатели:

- относительное увеличение выработки электроэнергии УТДУ:

$$\Delta W = \frac{W_{II} - W_I}{W_I} \cdot 100\% = \frac{10482,98 - 10069,09}{10069,09} \cdot 100\% = \frac{413,89}{10069,09} \cdot 100\% \approx 4,11\%.$$

- относительное увеличение потребления топлива УТДУ:

$$\Delta\Pi = \frac{\Pi_{II} - \Pi_I}{\Pi_I} 100\% = \frac{1745,78 - 1686,95}{1686,95} 100\% = \frac{58,83}{1686,95} 100\% \approx 3,49\%;$$

- относительное снижение удельного расхода условного топлива УТДУ:

$$\Delta q = \frac{q_{II} - q_I}{q_I} 100\% = \frac{166,53 - 167,54}{167,54} 100\% = -\frac{1,01}{167,54} 100\% \approx -0,6\%.$$

Данные были получены в результате расчета по методике, изложенной в [1; 2], основные положения которой сводятся к следующему: 1) условие полной экологичности работы установки – за УТДУ температура газа на всех переменных режимах составляет $T_2 = 5^\circ\text{C}$; 2) основные номинальные параметры ДГА: начальное давление $P_{1H} = 35$ бар; конечное давление $P_{2H} = 5$ бар; начальная температура $T_{1H} = 391,4$ К; номинальный внутренний относительный КПД $\eta_{oi}^H = 0,8$; номинальный электромеханический КПД $\eta_{yi} = 0,97$. В основу математической модели были положены уравнение Стодолы-Флюгеля для расчета относительного расхода газа через турбодетандер $\bar{G} = \sqrt{\frac{T_{1H}}{T_1}} \sqrt{\frac{P_1^2 - P_2^2}{P_{1H}^2 - P_{2H}^2}}$, а также уравнения $N_M = \frac{\rho \bar{G} G_H \Delta h_i}{3600}$ и $N_{\mathcal{E}} = N_M \eta_{EM}$ для расчета механической и электрической мощностей агрегата соответственно.

В заключение необходимо сделать следующие выводы. Конфигурация УТДУ оказывает влияние на энергетическую эффективность установки. Двухцилиндровая компоновка УТДУ более эффективна как с точки зрения получения большей выработки электроэнергии, так и с точки зрения относительного снижения удельных затрат топлива. Так, по результатам расчетов выработка электроэнергии увеличилась примерно на 4% при отсутствии роста удельных затрат топлива. Предложенная схема УТДУ дает положительный эффект в виде дополнительной мощности установки на переменных режимах работы. Нужно иметь в виду, что расчеты были выполнены в предположении достаточной стабильности параметров газа в магистральном газопроводе, что в целом больше характерно для газопровода сниженного давления за детандерным агрегатом. Поэтому поиск оптимальной конфигурации оборудования и номинального режима его работы, обеспечивающего максимальную годовую выработку электроэнергии, следует продолжить.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стребков, А.С. Оценка эффективности производства электрической энергии при использовании силового потенциала топливного газа / А.С. Стребков, С.В. Жавроцкий // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2013. – №4. – С. 77-86.
2. Стребков, А.С. Повышение эффективности использования силового потенциала топливного газа при установке детандерных агрегатов перед горелочными устройствами вращающихся цементобжигательных печей / А.С. Стребков, А.В. Осипов, С.В. Жавроцкий // Вестн. Брян. гос. техн. ун-та. – 2014. – №2. – С. 69-74.
3. Детандер-генераторная установка: пат. на полез. мод. 43630 РФ: МПК F25B11/02 / Агабабов В.С., Корягин А.В., Архарова А.Ю., Андреев А.Р., Фролов Р.И., Малафеева Н.В., Гаряев А.А., Соловьева Е.С. – Заявл. 06.10.04; опубл. 27.01.05.
4. Детандер-генераторный агрегат с двухступенчатым промежуточным подогревом газа: пат. на полез. мод. 85614 РФ: МПК F01K27/00 / Корягин А.В., Соловьев Р.В. – Заявл. 07.04.09; опубл. 10.08.09.
5. Детандер-генераторный агрегат: пат. на полез. мод. 87751 РФ: МПК F01D15/10 / Хромченков В.Г., Жигулина Е.В., Жаркова М.В., Яворский Ю.В., Калинин Н.В. – Заявл. 14.05.09; опубл. 20.10.09.
6. Установка для получения электроэнергии, теплоты и холода: пат. на полез. мод. 46565 РФ: МПК F01K27/00 / Агабабов В.С., Архарова А.Ю., Малафеева Н.В. – Заявл. 03.02.05; опубл. 10.07.05.
7. Детандер-генераторная установка: пат. на полез. мод. 49199 РФ: МПК F01K27/00 / Архаров Ю.М., Агабабов В.С., Архарова А.Ю. – Заявл. 24.05.05; опубл. 10.11.05.

Материал поступил в редколлегию 9.10.14.