



ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧЕЙ НА ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ПРЕДПРИЯТИИ

Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р., Ваньков Ю.В.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия

shz@list.ru, azagretdinov@yandex.ru, yvankov@mail.ru

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Газоперерабатывающая промышленность является довольно энергоемкой и требует значительных затрат энергии для осуществления своей деятельности. Поиск путей повышения энергоэффективности предприятий этой отрасли является необходимой и актуальной задачей. **ЦЕЛЬ.** Определение возможностей повышения энергоэффективности работы действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия с разработкой энергосберегающих мероприятий. **МЕТОДЫ.** Для реализации поставленной цели проведено исследование действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия на предмет возможности полезного использования низкопотенциального тепла уходящих дымовых газов. Проведено технико-экономическое обоснование предлагаемых энергосберегающих мероприятий. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Анализ предприятия выявил низкий коэффициент полезного действия технологических печей. Причинами низкого КПД является завышенный коэффициент избытка воздуха и высокая температура уходящих дымовых газов. Предложены следующие направления повышения эффективности печей: утилизация тепловой энергии дымовых газов и поддержание коэффициента избытка воздуха на нормативном уровне. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Рассчитанный потенциал энергосбережения при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С составил 82348,8 Гкал, а при снижении коэффициента избытка воздуха до нормативных 5 % - 8986 Гкал. В сумме эта величина составит около 23% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами. Предложенные энергосберегающие мероприятия позволят осуществить утилизацию тепловой энергии дымовых газов и снизить коэффициент избытка воздуха для достижения нормативного соотношения топливо/воздух. Эффект от предложенных мероприятий составит 79694 Гкал, что равно около 20% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

Ключевые слова: промышленные печи; эффективность; энергосбережение; дымовые газы; утилизация тепловой энергии.

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № 075-03-2024-226 от 15.02.2024 года.

Для цитирования: Зиганшин Ш.Г., Загретдинов А.Р., Ваньков Ю.В. Энергосберегающие мероприятия при эксплуатации промышленных печей на газоперерабатывающем предприятии // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2024. Т.26. № 3. С. 108-119. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-108-119.

ENERGY-SAVING MEASURES FOR THE OPERATION OF INDUSTRIAL FURNACES AT A GAS PROCESSING PLANT

Ziganshin Sh.G., Zagretdinov A.R., Vankov Y.V.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

shz@list.ru, azagretdinov@yandex.ru, yvankov@mail.ru

Abstract: **THE RELEVANCE.** The gas processing industry is quite energy intensive and requires significant energy costs to carry out its activities. Finding ways to improve the energy efficiency of enterprises in this industry is a necessary and urgent task. **THE PURPOSE.** Identification of opportunities to improve the energy efficiency of the operation of existing industrial furnaces of a gas processing enterprise with the development of energy-saving

measures. **METHODS.** To achieve this goal, a study of existing industrial furnaces of a gas processing enterprise was conducted for the possibility of useful use of low-potential heat of outgoing flue gases. A feasibility study of the proposed energy-saving measures has been carried out. **RESULTS.** The analysis of the enterprise revealed a low efficiency of technological furnaces. The reasons for the low efficiency are the overestimated excess air coefficient and the high temperature of the exhaust flue gases. The following directions for improving the efficiency of furnaces are proposed: utilization of the thermal energy of flue gases and maintenance of the excess air coefficient at the regulatory level. **CONCLUSION.** The calculated energy saving potential with a decrease in the temperature of outgoing flue gases to 160 ° C was 82348.8 Gcal, and with a decrease in the excess air coefficient to the standard 5% - 8986 Gcal. In total, this amount will amount to about 23% of the total heat generation by industrial furnaces. The proposed energy-saving measures will make it possible to utilize the thermal energy of flue gases and reduce the excess air coefficient in order to achieve a standard fuel/air ratio. The effect of the proposed measures will amount to 79694 Gcal, which is about 20% of the total heat generation by industrial furnaces.

Keywords: industrial furnaces, efficiency; energy saving; flue gases; heat energy utilization.

Acknowledgments: This research was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the state assignment No. 075-03-2024-226 from 15.02.2024.

For citation: Ziganshin Sh.G., Zagretidinov A.R., Vankov Y.V. Energy-saving measures for the operation of industrial furnaces at a gas processing plant. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2024; 26 (3): 108-119. doi:10.30724/1998-9903-2024-26-3-108-119.

Введение (Introduction)

Газоперерабатывающая промышленность является довольно энергоемкой и требует значительных затрат энергии для осуществления своей деятельности [1]. Поиск путей повышения энергоэффективности предприятий этой отрасли является необходимой и актуальной задачей. В настоящее время удельное потребление энергоресурсов в отечественных предприятиях подготовки и переработки газоконденсатного сырья (ППГКС) составляет в среднем 84...85 кг у. т./1000 м³, отличаясь для каждого производства в десятки раз. Такие различия объясняются разным составом и давлением углеводородного сырья, и, следовательно, разной технологией его подготовки и переработки. На рисунке 1 приведено удельное энергопотребление различных ППГКС [2].

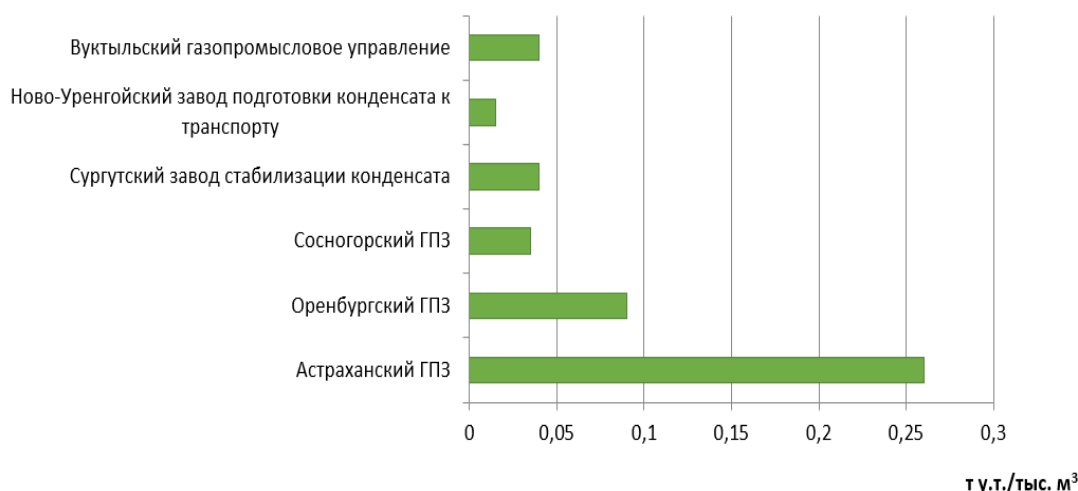


Рис. 1. Удельное энергопотребление предприятий подготовки и переработки газоконденсатного сырья

Fig. 1. Specific energy consumption of enterprises for the preparation and processing of gas condensate raw materials

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Снижения потребления энергоресурсов на ППГКС с максимальным эффектом

можно достичь при системном решении задач оптимизации энергокомплекса с учетом связи его с внешней системой энергоснабжения, влияния технико-экономических и эколого-климатических факторов. Следует стремиться к внедрению инновационных оборудования и технологий для производства энергоресурсов с утилизацией вторичных энергоресурсов, низконапорных газов, сточных вод, жидких и газофазных горючих отходов [2].

Одними из наиболее энергоемких устройств на ППГКС являются промышленные (технологические) печи. В основном они используются для подвода тепла в кубы ректификационных колонн либо дожига газообразных, жидких или твердых веществ. Тепловая эффективность промышленных печей играет важную роль в снижении энергозатрат всего предприятия и повышении качества выпускаемой продукции. Для поддержания эффективной работы печей необходимо своевременно выявлять негативные факторы, влияющие на расход топлива [3].

Целью данной работы является определение возможностей повышения энергоэффективности работы действующих промышленных печей газоперерабатывающего предприятия с разработкой энергосберегающих мероприятий.

Литературный обзор (Literature Review)

Вопросам снижения энергопотребления и повышения энергоэффективности печей посвящено большое количество исследований. В тепловом балансе печи потери тепла с уходящими дымовыми газами составляют 70-80% от общих потерь. Снижение температуры отходящих газов возможно с помощью рекуперации их тепла. При этом возникает проблема низкотемпературной коррозии теплопередающих поверхностей [4,5]. Поэтому теплообменная поверхность, контактирующая с дымовыми газами, должна обладать не только требуемыми теплообменными характеристиками, но и антикоррозионными свойствами [6]. Применение в конденсационных теплообменниках антикоррозионных материалов, таких как нержавеющая сталь, полимерные покрытия, керамика и т.п., позволяют решить эту проблему.

Исследователями [7] было доказано положительное влияние рекуперации отработанного тепла дымовых газов на энергоэффективность и снижение выбросов углерода из нагревательных печей нефтеперерабатывающих заводов. Показаны результаты теоретических расчетов при снижении температуры дымовых газов со 180 °С до 20-40 °С. В исследовании [8] показана возможность рекуперации воды и тепла из дымовых газов с помощью технологии транспортных мембранных конденсаторов. Общая теплопередача в мембранных конденсаторах, изготовленных из пучков нанопористых мембранных трубок, на 50-80% выше, чем в трубе из нержавеющей стали [9]. В статье [10] приводится сравнение конденсационных теплообменников на металлической и полимерной основе (из фторированного этиленпропилена). Показаны преимущества теплообменников на основе полимеров при рекуперации тепла из дымовых газов, проведен расчет их теплогидравлических характеристик. В статье [11] Ли и Джо используют утилизированные дымовые газы для повышения температуры предварительно нагретого поступающего воздуха для снижения потерь тепловой энергии и повышения КПД печи с целью экономии энергопотребления и снижения выбросов углекислого газа. Показано, что при снижении избыточной концентрации кислорода в воздухе с 4% до 3% эффективность печи повышается на 0,6%.

Другими составляющими теплового баланса печи, оказывающими влияние на КПД, являются потери через ограждающие поверхности и завышенный коэффициент избытка воздуха. Несмотря на широкий спектр видов теплоизоляции, для обмуровки печей до сих пор применяют надёжные, но малоэффективные материалы. Для повышения энергоэффективности печей важно использовать современные обмуровочные материалы и поддерживать обмуровку в надлежащем состоянии. В работе [12] показано негативное влияние подсосов воздуха через некачественную обмуровку, которое приводит к завышенным затратам топлива. В статье [13] показано влияние угла наклона заслонки дымохода печи на общую тепловую эффективность и расход топлива. Результаты показывают, что уменьшение угла наклона заслонки с 45 до 39 ° приводит к снижению избыточной концентрации кислорода в воздухе на 0,9%, увеличению средней эффективности печи на 2% при небольшом падении давления в топке. В работе [14] был произведен расчет показателей котла при замене обмуровки из шамотного кирпича на волокнистые теплоизоляционные материалы. Результаты показали снижение тепловых потерь через обмуровку на 15 %, расхода топлива на 4,5 %, массы котлов –в 7,8 раза.

Материалы и методы (Materials and methods)

В качестве объекта исследования выбран газоперерабатывающий комплекс.

Основными потребляемыми топливно-энергетическими ресурсами на предприятии являются электрическая энергия (на привод компрессоров, насосов, освещение и т.д.) и котельно-печное топливо (для работы промышленных печей и котельной) (таблица 1). Тепловая энергия в виде горячей воды на нужды отопления, вентиляции и горячего водоснабжения вырабатывается собственными источниками теплоты (в котельной и в экономайзерах промышленных печей). Закупка тепловой энергии от сторонних поставщиков не осуществляется.

Таблица 1
Table 1

Структура потребления ТЭР на предприятии*
The structure of fuel and energy consumption in the enterprise

Показатель	Единица измерения	Потребление в отчетный период
Электроэнергия	тыс.кВт*ч	378 112
	т.у.т.	46 445
Котельно-печное топливо	тыс. м ³	91 521
	т.у.т.	93 208

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors.

Рассмотрев структуру использования топливно-энергетических ресурсов на рассматриваемом предприятии, можно сделать вывод о преобладающем характере потребления котельно-печного топлива (рис. 2).

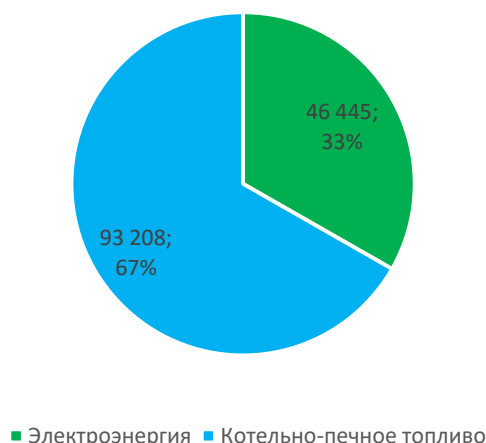


Рис. 2. Общее потребление по видам ТЭР, т.у.т. Fig. 2. Total consumption by type of fuel and energy complex

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Основным топливоиспользующим оборудованием на предприятии являются технологические печи трубчатого типа. В основном они предназначены для нагрева углеводородного сырья (керосина), направляемого для подогрева продукта в ректификационных колоннах. Для работы технологических печей на предприятии используется собственный топливный газ, образующийся в технологическом цикле переработки попутного газа.

Основные характеристики технологических печей предприятия, полученные по данным режимных карт, представлены в таблице 2.

Таблица 2
Table 2

Характеристики печей *
Characteristics of furnaces

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэффициент избытка воздуха	Температура уходящих газов, град. С	Дата ввода в эксплуатацию
1.	Печь № 1	0,05	67	6,55	325	1984

2.	Печь № 2	12,62	50	1,82	538	1964
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	356	1964
4.	Печь № 4	9,9	75	1,3	428	1964
5.	Печь № 5	0,528	64	2,14	365	1973
6.	Печь № 6	0,424	70	2,14	282	1973
7.	Печь № 7	23,3	72	1,24	445	1964
8.	Печь № 8	21,74	76	1,4	365	1964
9.	Печь № 9	0,049	63	1,94	484	1995
10.	Печь № 10	2,58	72	1,71	450	2007
11.	Печь № 11	0,22	81	1,3	290	2004
12.	Печь № 12	0,382	80	1,82	219	2004

**Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors*

Из анализа данных, представленных в таблице, видно, что коэффициент полезного действия почти всех печей имеет значение ниже 80%.

Главными причинами такого низкого КПД является:

- завышенный коэффициент избытка воздуха;
- высокая температура дымовых газов.

Повышение КПД технологических печей предлагается осуществлять по следующим двум направлениям:

- а) утилизация тепловой энергии дымовых газов;
- б) поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии для снижения коэффициента избытка воздуха и достижения нормативного соотношения топливо/воздух.

а) Утилизация тепловой энергии дымовых газов.

Обследование предприятия показало, что утилизация теплоты дымовых газов осуществляется лишь в печах №7 и №8. В них установлены экономайзеры для подогрева горячей воды. Однако экономайзеры работают не в круглогодичном режиме и используются в основном на покрытие отопительной нагрузки. Согласно представленным данным, в отчетном году с помощью экономайзеров было выработано 14280,6 Гкал тепловой энергии. Однако это составляет лишь около 50% от максимально возможного потенциала теплоты уходящих дымовых газов от этих печей.

Для более полного использования потенциала теплоты уходящих дымовых газов предлагается установка воздухоподогревателей за промышленными печами для подогрева воздуха, поступающего на горелки.

Предлагаемая модернизация будет включать:

- установку воздухоподогревателя для утилизации тепловой энергии уходящих дымовых газов. Современные воздухоподогреватели позволяют снизить температуру уходящих газов до 120-180 °С;
- установку дутьевого вентилятора и дымососа;
- замену горелочных устройств на горелочные устройства с принудительной подачи воздуха.

Расчет потенциала тепловой энергии при снижении температуры дымовых газов можно выполнить по следующей формуле:

$$Q_{\text{пот}} = V_{\text{дг}} \cdot (i_{\text{дгвых}} - i_{\text{дги}}), \text{ кДж/ч}$$

где

$V_{\text{дг}}$ – расход уходящих дымовых газов, кг/ч;

$i_{\text{дгвых}}$ – энтальпия уходящих дымовых газов при отсутствии воздухоподогревателя, кДж/кг;

$i_{\text{дги}}$ – энтальпия уходящих дымовых газов при снижении их температуры после установки воздухоподогревателя, кДж/кг.

Расход, массу и объем уходящих дымовых газов $G_{\text{дг}}$ можно найти по методике [15].

Масса дымовых газов при сжигании 1 м³ сухого газообразного топлива

определяется по формуле:

$$G_{\Gamma} = \rho_{\Gamma} + \frac{d_{\Gamma}}{1000} + 1.306 \alpha V_0^H, \text{ кг/м}^3$$

где ρ_{Γ} – плотность сухого газа при нормальных условиях, кг/м^3 ,
 d_{Γ} – влагосодержание газообразного топлива, г/м^3 ,
 V_0^H – объем воздуха при сжигании 1 м^3 сухого газообразного топлива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

$$\rho_{\Gamma} = 0,01(1,96CO_2 + 1,52H_2S + 1,25N_2 + 1,43O_2 + 1,25CO + 0,0899H_2 + \Sigma(0,536m + 0,045n)C_mH_n)$$

$$V_0^H = 0,0476(0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \Sigma(m + n/4)C_mH_n - O_2)$$

Объем дымовых газов:

$$V_{\Gamma}^H = V_{RO_2}^H + V_{ON_2}^H + V_{H_2O}^H + (\alpha - 1) V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Объем водяных паров:

$$V_{H_2O}^H = V_{oH_2O}^H + 0,0161(\alpha - 1)V_0^H, \text{ м}^3/\text{кг}$$

Теоретический (минимальный) объем азота, полученного при полном сгорании топлива с теоретически необходимым количеством воздуха:

$$V_{oN_2}^H = 0,79V_0^H + 0,01N_2, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический (минимальный) объем трехатомных газов:

$$V_{RO_2}^H = 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \Sigma m C_mH_n), \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Теоретический (минимальный) объем водяных паров:

$$V_{oH_2O}^H = 0,01(H_2S + H_2 + \Sigma 0,5n C_mH_n + 0,124 d_{\Gamma}) + 0,0161V_0^H, \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Энтальпии уходящих дымовых газов при различной температуре можно найти по методике, представленной в [15].

В таблице 3 показаны результаты расчета потенциала тепловой энергии уходящих дымовых газов для двух вариантов:

- при снижении температуры дымовых газов до 200°C,
- при снижении температуры дымовых газов до 160°C.

Таблица 3

Table 3

Результаты расчета потенциала тепловой энергии при снижении температуры дымовых газов до 200°C и 160°C *

The results of calculating the thermal energy potential when the flue gas temperature decreases to 200°C and 160°C

№ п.п.	Наименование	Тепло произв одитель ность, Гкал/ч	КПД, %	Q _{пот} при снижении температу ры дымовых газов до 160°C, Гкал/ч	Q _{пот} при снижени и темпера туры дымовы х газов до 160°C, %	Q _{пот} при снижени и темпера туры дымовы х газов до 200°C, Гкал/ч	Q _{пот} при снижении температу ры дымовых газов до 200°C, %
1.	Печь № 1	0,05	67	0,01	17,5	0,01	14,8
2.	Печь № 2	12,62	50	3,23	25,6	3,59	28,5
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	12,5	1,46	10,0

4.	Печь № 4	9,9	75	1,85	18,6	1,58	15,9
5.	Печь № 5	0,528	64	0,12	22,3	0,10	18,1
6.	Печь № 6	0,424	70	0,06	14,1	0,04	9,8
7.	Печь № 7	23,3	72	1,91	8,2	1,65	7,1
8.	Печь № 8	21,74	76	1,48	6,8	1,20	5,5
9.	Печь № 9	0,049	63	0,01	25,6	0,01	22,6
10.	Печь № 10	2,58	72	0,50	19,6	0,42	16,3
11.	Печь № 11	0,22	81	0,01	6,7	0,01	4,6
12.	Печь № 12	0,382	80	0,02	6,4	0,01	2,2
	ИТОГО			11,03		10,1	

**Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors*

Таким образом, при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С, при условии круглогодичной работы можно получить дополнительное количество тепловой энергии в количестве:

$$Q_{\text{пот}} = 11,03 \text{ Гкал/ч} \cdot 8760 \text{ ч} = 96628,8 \text{ Гкал}$$

С учетом того, что в печах №7 и №8 уже стоят экономайзеры и производится частичная утилизация теплоты дымовых газов (за отчетный год в количестве 14280 Гкал), итоговый потенциал составит:

$$Q_{\text{пот}} = 96628,8 - 14280 = 82348,8 \text{ Гкал.}$$

b) Поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии

В процессе эксплуатации печей в обмуровке возникают неплотности за счет трещин, разрывов обшивки, сжатия эластичных набивок в уплотнительных и расширительных швах, узлах прохода труб через обмуровку в нижней части топки, потолочном перекрытии, конвективной шахте. Кроме того, неплотности в обмуровке ведут к увеличению присосов воздуха в газоходы котла и снижению экономичности его работы. Нормативные потери тепла через обмуровку в трубчатых печах составляют 3 — 5 %. Нижний предел соответствует печам большой тепловой мощности, верхний — печам малой мощности [16].

При проведении энергетического обследования и анализе режимных карт промышленных печей было выявлено, что имеются завышенные коэффициенты избытка воздуха и потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности для печей №1-3, №5-8, №12 (табл. 4).

Таблица 4

Table 4

Потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности печей *

Heat loss to the environment through the enclosing surfaces of furnaces

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэф. избытка воздуха	Потери тепла в окружающую среду α, %
1.	Печь № 1	0,05	67	6,55	8,5
2.	Печь № 2	12,62	50	1,82	11,2
3.	Печь № 3	14,55	68	1,82	8,1
4.	Печь № 4	9,9	75	1,3	2,66
5.	Печь № 5	0,528	64	2,14	6,2
6.	Печь № 6	0,424	70	2,14	6,5
7.	Печь № 7	23,3	72	1,24	5,1
8.	Печь № 8	21,74	76	1,4	5,4
9.	Печь № 9	0,049	63	1,94	2,0
10.	Печь № 10	2,58	72	1,71	2,0
11.	Печь № 11	0,22	81	1,3	4,2

№ п.п.	Наименование	Теплопроизводительность, Гкал/ч	КПД, %	Коэф. избытка воздуха	Потери тепла в окружающую среду α , %
12.	Печь № 12	0,382	80	1,82	6,9

**Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors*

Рассчитаем экономию мероприятия при сокращении потерь тепла в окружающую среду до 5% (табл. 5).

Количество выработанной теплоты при круглогодичной работе печи:

$$Q_{\text{выр}} = Q \cdot n, \text{ Гкал},$$

где Q – теплопроизводительность печи, Гкал/ч,

n – фактическое время работы печи в году, час.

Количество теплоты, теряемой в окружающую среду при работе печи по фактическим долям потерь α , Гкал:

$$Q_{\alpha} = Q_{\text{выр}} \cdot \alpha / 100.$$

Количество теплоты, теряемой в окружающую среду при работе печи с нормативной долей потерь α , равной 5%, Гкал:

$$Q_{\text{норм}} = Q_{\text{выр}} \cdot 0,05.$$

Экономия тепловой энергии при внедрении мероприятия, Гкал:

$$\Xi = Q_{\alpha} - Q_{\text{норм}}$$

Таблица 5

Table 5

Расчет экономии при сокращении потерь тепла в окружающую среду до 5%*

Calculation of savings by reducing heat losses to the environment by up to 5%

№ п.п.	Наименование	Q , Гкал/ч	Время работы печи, час	α , %	$Q_{\text{выр}}$, Гкал	Q_{α} , Гкал	$Q_{\text{норм}}$, Гкал	Ξ , Гкал
1	Печь № 1	0,05	8760	8,5	438	37,2	21,9	15,3
2	Печь № 2	12,62	8136	11,2	102676,3	11499,7	5133,8	6365,9
3	Печь № 3	14,55	4104	8,1	59713,2	4836,8	2985,7	1851,1
4	Печь № 4	9,9	648	2,66	6415,2	170,6	320,8	
5	Печь № 5	0,528	8760	6,2	4625,28	286,8	231,3	55,5
6	Печь № 6	0,424	8760	6,5	3714,24	241,4	185,7	55,7
7	Печь № 7	23,3	2928	5,1	68222,4	3479,3	3411,1	68,2
8	Печь № 8	21,74	5872	5,4	127657,3	6893,5	6382,9	510,6
9	Печь № 9	0,049	8760	2	429,24	8,6	21,5	
10	Печь № 10	2,58	8760	2	22600,8	452,0	1130,0	
11	Печь № 11	0,22	8760	4,2	1927,2	80,9	96,4	
12	Печь № 12	0,382	8760	6,9	3346,32	230,9	167,3	63,6
	Итого				401765,5	28217,9	20088,3	8986,0

**Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors*

Как видно из таблицы, итоговый потенциал экономии тепловой энергии составляет 8986 Гкал.

Результаты (Results)

Для более полного использования потенциала теплоты уходящих дымовых газов

предлагается установка воздухоподогревателей за промышленными печами для подогрева воздуха, поступающего на горелки.

В качестве воздухоподогревателей используются статические рекуперативные теплообменники, работа которых основывается на передаче тепла от сжигания отходящих газов воздуху, который подается в горелки. Это помогает значительно уменьшить потребности в топливе для сжигания. Поверхность теплообмена, как правило, изготавливается из оребренных литых чугунных труб либо нержавеющей стали. Для промышленных печей предприятия предлагается установить воздухоподогреватели, сконструированные трубками из боросиликатного стекла. В таком случае теплообменник полностью устойчив к коррозии, т.к. входящий холодный воздух предварительно нагревается в стеклянном модуле до попадания в чугунную часть. Конструкция защищает чугунные трубы от конденсата и кислотного воздействия и позволяет снизить температуру уходящих дымовых газов до 160 °С.

В таблице 6 представлен расчет экономического эффекта при внедрении воздухоподогревателей и снижении температуры дымовых газов до 160°С. При этом установку воздухоподогревателей предполагаем только в печах с наибольшим потенциалом использования теплоты уходящих газов.

Экономия в денежном выражении ΔS , тыс. руб. рассчитывалась исходя из теплотворной способности топливного газа $Q_n = 7900$ ккал/м³ и его стоимости, равной 6,1 руб/м³. Потенциал теплоты уходящих газов $Q_{пот}$, Гкал определялся при круглогодичном режиме работы печей ($n=8760$ ч). Также учитывалась выработка тепловой энергии в экономайзерах печей №7 (равна 6157 Гкал за отчетный год) и печей №8 (равна 8123 Гкал за отчетный год). Инвестиционные затраты на установку воздухоподогревателей включают в себя стоимость установки дымососа и замены горелок. Затраты на проектно-изыскательские и строительно-монтажные работы приняты равными 20% и 30% от стоимости оборудования соответственно.

Таблица 6

Table 6

Расчет экономического эффекта при внедрении воздухоподогревателей*

Calculation of the economic effect of the introduction of air heaters

Наименование печи	$Q_{пот}$, Гкал	ΔS , тыс. руб./год	Необходимые инвестиции, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
Печь № 2	22103,38	17067	45000	2,64
Печь № 3	15952,84	12318	45000	3,65
Печь № 4	16195,16	12505	45000	3,60
Печь № 7	16715,44	12907	75000	5,81
Печь № 8	4876,357	3765	75000	19,92
Итого, без учета печи № 8	70967	54797	210000	3,8

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Так как срок окупаемости установки воздухоподогревателя для печи №8 составляет около 20 лет, предлагается ее оставить без изменений и включать только в отопительный сезон совместно с экономайзером. На оставшиеся печи рекомендуется установить воздухоподогреватели. Учитывая сроки окупаемости, рассматриваемое мероприятие рекомендуется к внедрению.

Поддержание обмуровки печей в надлежащем состоянии предполагает своевременный ремонт и использование современных обмуровочных материалов при этом. В таблице 7 представлен расчет экономического эффекта этого мероприятия. Рассмотрены печи с наибольшим энергопотреблением.

Расчет экономического эффекта при поддержании обмуровки печей в надлежащем состоянии*

Calculation of the economic effect of maintaining the lining of the furnaces in proper condition

Наименование печи	Э, Гкал	ΔS , тыс. руб./год	Необходимые инвестиции, тыс. руб.	Срок окупаемости, лет
Печь № 2	6365,9	4915	2500	0,5
Печь № 3	1851,1	1429	2500	1,7
Печь № 7	68,2	53	2500	47,5
Печь № 8	510,6	394	2500	6,3
Итого, без печи № 7	8727	6739	7500	1,1

*Источник: составлено авторами. *Source: compiled by authors

Учитывая сроки окупаемости, рассматриваемые мероприятия рекомендуются к внедрению для всех печей, указанных в табл. 7, кроме печи №7.

Закключение

В работе был произведен подбор и расчет энергосберегающих мероприятий для промышленных печей газоперерабатывающего комплекса. Было выявлены завышенные коэффициент избытка воздуха и потери тепла в окружающую среду через ограждающие поверхности для печей. Эти факторы негативно влияют на коэффициент полезного действия промышленных печей и энергоэффективность предприятия в целом. Рассчитанный потенциал энергосбережения при снижении температуры уходящих дымовых газов до 160 °С составил 82348,8 Гкал, а при снижении коэффициента избытка воздуха до нормативных 5 % - 8986 Гкал. В сумме эта величина составит около 23% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

Предложены энергосберегающие мероприятия, позволяющие осуществить утилизацию тепловой энергии дымовых газов и снизить коэффициент избытка воздуха с целью достижения нормативного соотношения топливо/воздух. Эффект от предложенных мероприятий составил 79694 Гкал, что составляет около 20% от общей выработки тепловой энергии промышленными печами.

Литература

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.
2. Долотовский, И. В. Повышение системной эффективности энергетического комплекса предприятий подготовки и переработки газоконденсатного сырья: специальность 05.14.01 "Энергетические системы и комплексы": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Долотовский Игорь Владимирович. – Саратов, 2018. – 439 с.
3. Mahinroosta, Mostafa. (2013). A Review on Energy Efficiency Improvement methods for Oil and Gas Industries. 2nd Conference on Emerging Trends in Energy Conservation. Tehran
4. P. Wang, C.F. Xie, S.M. Xu, Y.L. Ge. Application of energy-saving technology on furnaces of oil refining units. Proc. Environ Sci, 12 (2012), pp. 387-393, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.294>
5. A.M. Paramonov. Heating Furnaces Efficiency Improvement. Procedia Engineering, Volume 113, 2015, Pages 181-185, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.315>.
6. L. Mu, G. Liu, S. Wang, L. Wang, W. Sun, Z. Yang. Multi-layered composite coatings with enhanced corrosion and abrasion resistance for industrial flue gas waste heat recovery. Materials Letters, Volume 364, 2024, 136366, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136366>.
7. L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, Y. Lan. Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace. Energy, Volume 279, 2023, 128081, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128081>.
8. J. Huang, H. Chen, J. Yang, Z. Du, H. Zhang, Z. Li. Enhancing performance of ceramic membranes for recovering water and heat from flue gas. Chemical Engineering Research and Design. Volume 192. 2023. Pages 208-222, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.028>.
9. A. Bao, D. Wang, C. Lin. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study. Int. J. Heat Mass Trans., 84 (2015), pp. 456-462.

10. N. Mohammadaliha, M. Amani, M. Bahrami. A Thermal-hydraulic assessment of condensing tube bank heat exchangers for heat and water recovery from flue gas. *Applied Thermal Engineering*. Volume 215, 2022, 118976, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118976>.

11. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace. *Fuel Process Technol*, 92 (2011), pp. 2335-2340. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.08.005

12. Бадьин, Ю. А. Повышение эффективности технологических нагревательных печей НПЗ / Ю. А. Бадьин, В. Ф. Решетов, В. М. Ящук // *Химическая техника*. – 2016. – № 3. – С. 10

13. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Improving furnace and boiler cost-effectiveness and CO₂ emission by adjusting excess air. *Environ Prog*, 31 (2012), pp. 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.043>

14. Никифоров А.С., Приходько Е. В., Карманов А.Е. Модернизация обмуровки водогрейных котлов малой мощности с целью снижения тепловых потерь. *Вестник ПГУ им. Торайгырова, серия Энергетическая*, 2013 г. № 2. С. 222-228.

15. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). – Издание 3, перераб. и доп. – СПб. : Изд. НПОЦКИ, 1998. – 256 с.

16. Процессы и аппараты нефтегазопереработки и нефтехимии: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: ООО "Недра-Бизнесцентр", 2000, с. 514

Авторы публикации

Шамиль Гаязович Зиганишин – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Айрат Рифкатович Загретдинов – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

Ваньков Юрий Витальевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения» (ПТЭ) Казанского государственного энергетического университета (КГЭУ).

References

1. A. R. Trott, and T. Welch, "Refrigeration and air conditioning," Butterworth-Heinemann, Third edition, 2000.

2. Dolotovskiy, I. V. Improving the systemic efficiency of the energy complex of enterprises for the preparation and processing of gas condensate raw materials: specialty 05.14.01 "Energy systems and complexes": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Dolotovskiy Igor Vladimirovich. – Saratov, 2018. – 439 p.

3. Mahinroosta, Mostafa. (2013). A Review on Energy Efficiency Improvement methods for Oil and Gas Industries. 2nd Conference on Emerging Trends in Energy Conservation. Tehran

4. P. Wang, C.F. Xie, S.M. Xu, Y.L. Ge. Application of energy-saving technology on furnaces of oil refining units. *Proc. Environ Sci*, 12 (2012), pp. 387-393, <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2012.01.294>

5. A.M. Paramonov. Heating Furnaces Efficiency Improvement. *Procedia Engineering*, Volume 113, 2015, Pages 181-185, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.315>.

6. L. Mu, G. Liu, S. Wang, L. Wang, W. Sun, Z. Yang. Multi-layered composite coatings with enhanced corrosion and abrasion resistance for industrial flue gas waste heat recovery. *Materials Letters*, Volume 364, 2024, 136366, <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.136366>.

7. L. Mu, S. Wang, J. Lu, G. Liu, L. Zhao, Y. Lan. Effect of flue gas condensing waste heat recovery and its pressure drop on energy saving and carbon reduction for refinery heating furnace. *Energy*, Volume 279, 2023, 128081, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128081>.

8. J. Huang, H. Chen, J. Yang, Z. Du, H. Zhang, Z. Li. Enhancing performance of ceramic membranes for recovering water and heat from flue gas. *Chemical Engineering Research and Design*. Volume 192. 2023. Pages 208-222, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.02.028>.

9. A. Bao, D. Wang, C. Lin. Nanoporous membrane tube condensing heat transfer enhancement study. *Int. J. Heat Mass Trans.*, 84 (2015), pp. 456-462.

10. N. Mohammadaliha, M. Amani, M. Bahrami. A Thermal-hydraulic assessment of condensing tube bank heat exchangers for heat and water recovery from flue gas. *Applied*

Thermal Engineering. Volume 215, 2022, 118976,
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118976>.

11. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Saving fuel consumption and reducing pollution emissions for industrial furnace. *Fuel Process Technol*, 92 (2011), pp. 2335-2340. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.08.005

12. Badin, Yu. A. Improving the efficiency of technological heating furnaces of refineries / Yu. A. Badin, V. F. Reshetov, V. M. Yaschuk // *Chemical engineering*. – 2016. – No. 3. – p. 10

13. C.L. Lee, C.J.G. Jou. Improving furnace and boiler cost-effectiveness and CO₂ emission by adjusting excess air. *Environ Prog*, 31 (2012), pp. 157-163. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.043>

14. Nikiforov A.S., Prikhodko E. V., Karmanov A.E. Modernization of the lining of low-power hot water boilers in order to reduce heat losses. *Bulletin of the PSU named after Toraighyrova, Energy series*, 2013 No. 2. pp. 222-228.

15. *Thermal calculation of boilers (Normative method)*. – Edition 3, revised. and additional – St. Petersburg : Ed. NPO CCTI, 1998. – 256 p.

16. *Processes and devices of oil and gas processing and petrochemistry: Textbook for universities*. — 3rd ed., reprint. and additional — M.: Nedra-Businesscenter LLC, 2000, p. 514.

Authors of the publication

Shamil G. Ziganshin –Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Ayrat R. Zagretdinov –Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Yury V. Vankov – of Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Получено

23.04.2024 г.

Отредактировано

27.04.2024 г.

Принято

03.05.2024 г.