

УДК 621.18

А.А. КАПУСТЯНСКИЙ

Национальный университет «Львовская политехника», г. Львов

МЕТОД АНАЛИТИЧЕСКОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРЕРАСХОДА ТОПЛИВА НА ПЫЛЕУГОЛЬНЫХ КОТЛАХ

В данной статье представлены результаты испытаний пылеугольного котла ТПП-210А Трипольской ТЭС с исследованием влияния теплотехнических характеристик твердого топлива и режимных факторов на эффективность его работы. Доказано, что ущерб, причиненный снижением качества топлива от проектного значения, оценивается по уменьшению таких показателей угля как зольность, влажность и низшая рабочая теплота сгорания. Также получены аналитические зависимости влияния вышеуказанных показателей на перерасход топлива, связанный с увеличением потерь тепла с механическим недожогом и потерями тепла с уходящими газами. На основе аналитических и экспериментальных исследований построены соответствующие расчетные номограммы, разработан метод оценки ущерба нанесенного электростанции из-за ухудшения теплотехнических характеристик топлива и, как следствие, повышения тепловых потерь с уходящими газами, механическим недожогом и увеличением перерасхода условного топлива.

Ключевые слова: паровой котел, твердое топливо, механический недожог.

У даній статті представлені результати випробувань пилувугільного котла ТПП-210А Трипільської ТЕС з дослідженням впливу теплотехнічних характеристик твердого палива та режимних факторів на ефективність його роботи. Доведено, що збиток, заподіяний зниженням якості палива від проектного значення, оцінюється по зменшенню таких показників вугілля як зольність, вологість і нижча робоча теплота згорання. Також отримано аналітичні залежності впливу вищевказаних показників на перевитрату палива, пов'язану із збільшенням втрат тепла з механічним недопалом і втратами тепла з відхідними газами. На основі аналітичних та експериментальних досліджень побудовані відповідні розрахункові номограми, розроблено метод оцінки збитку нанесеного електростанції через погіршення теплотехнічних характеристик палива і, як наслідок, підвищення теплових втрат з відхідними газами, механічним недопалом і збільшенням перевитрати умовного палива.

Ключові слова: паровий котел, тверде паливо, механічний недпал.

Введение

Исследование интенсификации теплообмена в котельных установках неразрывно связано с изучением организации процесса горения в камерных топках при сжигании проектного и непроектного угля. Именно поэтому актуален вопрос по определению влияния сжигания низкосортного угля на экономичность работы паровых энергетических котлов с жидким шлакоудалением и перерасход угля вследствие ухудшения теплотехнических характеристик сжигаемого топлива [1, 2].

Эксперименты проводились на котлах ТПП-210А Трипольской ТЭС, где сжигают уголь марки АШ. По реакционными свойствами антрацит относится к категориям наиболее инертных твердых видов топлива, тяжелых для сжигания в связи со слабым развитием пористой структуры, малым содержанием летучих и низкой реакционной способностью.

Маневренные возможности котлов при изменении качества и вида топлива снижаются. Опыт эксплуатации показывает, что это приводит к снижению экономичности работы котлов и повышению расхода природного газа на подсветку факела. При малых нагрузках котлов ТПП-210А потери теплоты с механическим недожогом превышают 12%, а доля газа, необходимого для обеспечения устойчивого горения и шлакоудаления достигает 20% [3, 4]. Именно на изучение такого рода проблем, и направлена данная работа.

Аналитическое определение перерасхода топлива

В энергетические характеристики котельных установок вводятся основные и промежуточные показатели экономичности их работы, которые зависят как от режима работы самого котла так и от теплотехнических характеристик топлива.

ККД котла брутто η_k^{bp} за обратным балансом определяется по формуле [5, 6]:

$$\eta_k^{bp} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \% \quad (1)$$

где q_2 – потеря тепла с уходящими газами; q_3 – потеря тепла с химическим недожогом; q_4 – потеря тепла с механическим недожогом; q_5 – потеря тепла в окружающую среду; q_6 – потеря тепла с физическим теплом шлака.

Возможность корректировки значений КПД распределяется между отдельными составляющими тепловых потерь пропорционально их влиянию на его общее значение.

В данной работе автором изучалось влияние потерь тепла от механической неполноты сгорания угля q_4 , которые составляют [5, 6]:

$$q_4 = \alpha_{yn} \cdot \frac{\Gamma_{yn}}{100 - \Gamma_{yn}} \cdot \frac{q_{гор} \cdot A^r \cdot K_Q}{Q_i^r}, \% \quad (2)$$

где Γ_{yn} – содержание горючих в золе уноса, %;

A^r – зольность угля на рабочую массу, %; α_{yn} – доля золы уноса из топки;

$q_{гор}$ – средняя теплота сгорания 1 кг горючих, содержащихся в золе уноса, равна 32660 кДж/кг (7800 ккал/кг);

K_Q – поправочный коэффициент, равен 1;

Q_i^r – низшая рабочая теплота сгорания угля, кДж/кг.

Подставив в (2) вместо зольности на рабочую массу топлива приведенную зольность, при $A^n = A^r \cdot 10^3 / Q_i^r$ (%·10³·кДж/кг), становится очевидным, что потеря тепла q_4 при неизменных значениях α_{yn} и Γ_{yn} прямо пропорциональна приведенной зольности топлива.

Главную формулу (2) можно превратить в более удобный вид для составления номограмм. После подстановки нормативных значений [5] рабочей влажности $W^r = 8,5$ % и теплоты сгорания АШ на горючую массу $Q_i^{daf} = 7940$ кДж/кг и учитывая соотношение $A^d = 100 / (100 - W^r) \cdot A^r$, из формулы (2) автором выведено следующее равенство:

$$q_4 = \alpha_{yn} \cdot \frac{\Gamma_{yn}}{100 - \Gamma_{yn}} \cdot \frac{98,23 \cdot A^d}{97,33 - A^d}, \% \quad (3)$$

Рассчитаем степень точности формул (2 и 3) на примере АШ ($W^r = 8,5$ %, $Q_i^{daf} = 7940$ кДж/кг, $\Gamma_{yn} = 30$ %, $\alpha_{yn} = 0,9$) при $q_4 \approx 5 \div 15$ %:

Таблица 1

Степень точности аналитических формул

Зольность	d	%	10	20	30
Калорийность	r i	кДж/кг	26573	22911	19253
формула (2)	d	%	4,36	10,12	18,06
формула (3)	d	%	4,39	9,91	17,07
Погрешность абсолютная	$бс.$	%	1	2	6

Таким образом, проведенные расчеты показали, что существенные колебания в составе балласта и горючей массы угля (в эксплуатационных пределах изменения q_4) приводят к незначительным относительным погрешностям $\pm 1 \div 2 \%$.

Выведенная автором формула дает возможность оперативного прогнозирования тепловых потерь с механическим недожогом в условиях реальной эксплуатации паровых котельных агрегатов и корректировки ведения режима горения в топке в соответствии со значением горючих в золе уноса.

Для графического определения потери тепла q_4 по формуле (3) для АШ повышенной зольности в зависимости от двух переменных Γ_{yn} и A^d построим следующую номограмму:

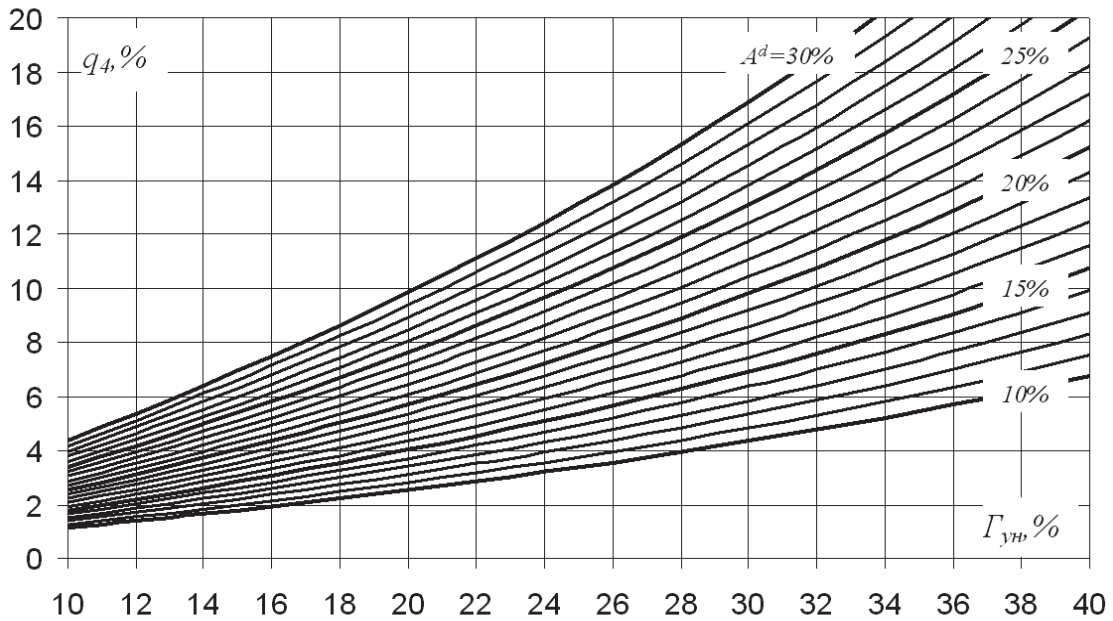


Рис. 1. Номограмма для определения потери тепла с механическим недожогом q_4 при $\alpha_{yn}=0,9$ и $\Gamma_{yn} \leq 40\%$ для Донецкого АШ повышенной зольности

Дать оценку снижению экономичности работы котельного оборудования от роста зольности и влажности и, как следствие, снижения калорийности позволяет анализ экспериментальных данных проведенных опытов на электростанциях, сжигающих АШ. Для графической интерпретации полученных результатов построим график зависимости потери тепла с механическим недожогом, от зольности на рабочую массу при сжигании Донецкого антрацита повышенной зольности на котле ТПП-210А.

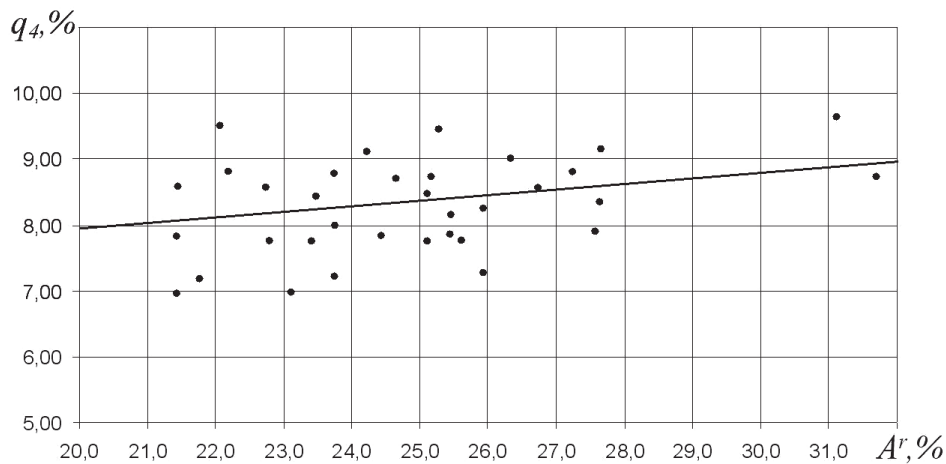


Рис. 2. Зависимость изменения q_4 от зольности A^r АШ для котла ТПП-210А

Анализируя полученный график зависимости можно сказать, что увеличение зольности АШ на рабочую массу на 1% приводит к увеличению потерь тепла с механическим недожогом на $0,09 \div 0,11\%$. Описать это можно аналитическим уравнением зависимости изменения потери тепла с мехнедожогом от изменения зольности ΔA^r :

$$\Delta q_4 = K_A \cdot \Delta A^r, \% \tag{4}$$

где K_A – коэффициент пропорциональности.

Рассчитанные поправки к потере тепла q_4 на смену теплотехнических характеристик некоторых марок украинского угля приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка влияния зольности и влажности на потери тепла с мехнедожогом

Топливо	Поправка на $\pm 1\%$ смены характеристики угля на рабочую массу, $\% (\pm)$		Приведенная характеристика топлива, $\text{кг} \cdot \% \cdot 10^3 / \text{ккал}$		Нормативные потери тепла с механическим недожогом q_4
	A^r	W^r	A^{np}	W^{np}	
Донецкий АШ	0,09-0,11	0,07-0,09	4,2	1,6	4-6
Донецкий ТР	0,03-0,09	0,02-0,02	4,1	0,9	0,5-1,5
Донецкий Д	0,03-0,09	0,04-0,05	6,1	3,3	0,5-1,5
Львовско-Волынский Г	0,04-0,07	0,03	3,8	1,9	0,5-1,0

В сумме изменение A^r и W^r будет соответствовать изменению Q_i^r . Обобщив сказанное, построим график зависимости потери тепла с механическим недожогом от низшей рабочей теплоты сгорания при сжигании Донецкого АШ на котле ТПП-210А.

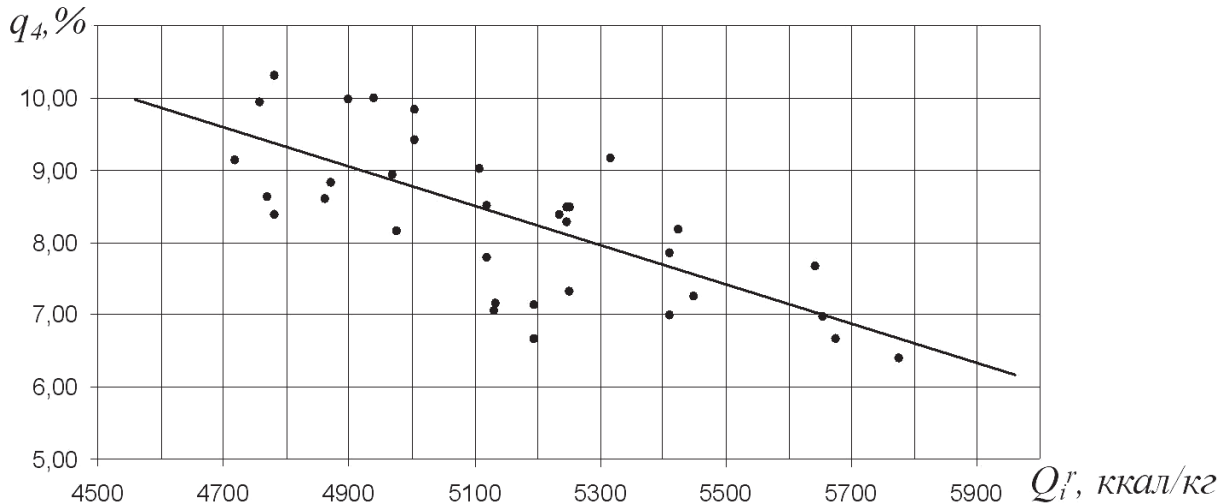


Рис. 3. Зависимость изменения q_4 от калорийности Q_i^r АШ для котла ТПП-210А

Анализируя данный рисунок можно сказать, что снижение низших рабочей теплоты сгорания АШ на каждые 100 ккал/кг (419 кДж/кг) приводит к увеличению потерь тепла с механическим недожогом на $0,27 \div 0,29\%$.

Описать все вышесказанное можно аналитическим уравнением зависимости изменения потери тепла с механическим недожогом Δq_4 от изменения калорийности ΔQ_i^r :

$$\Delta q_4 = K_Q^{q_4} \cdot 4,19 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta Q_i^r, \% \tag{5}$$

где $K_Q^{q_4}$ – коэффициент пропорциональности, $\% / (\text{кДж}/\text{кг})$.

На практике помимо потерь тепла с механическим недожогом весомы также потери с уходящими газами q_2 . Именно эти два вида теплотерь составляют основную часть потерь

теплоты при расчете КПД брутто котельной установки. К внешним факторам и показателям, отклонение которых приводит к изменению значения q_2 , можно отнести температуру холодного воздуха, зольность твердого топлива и потери тепла с механическим недожогом.

Исследования, проведенные на котлах ТПП-210А Трипольской ТЭС свидетельствует о том, что с уменьшением Q_i^r АШ потери q_2 возрастают (рис. 4).

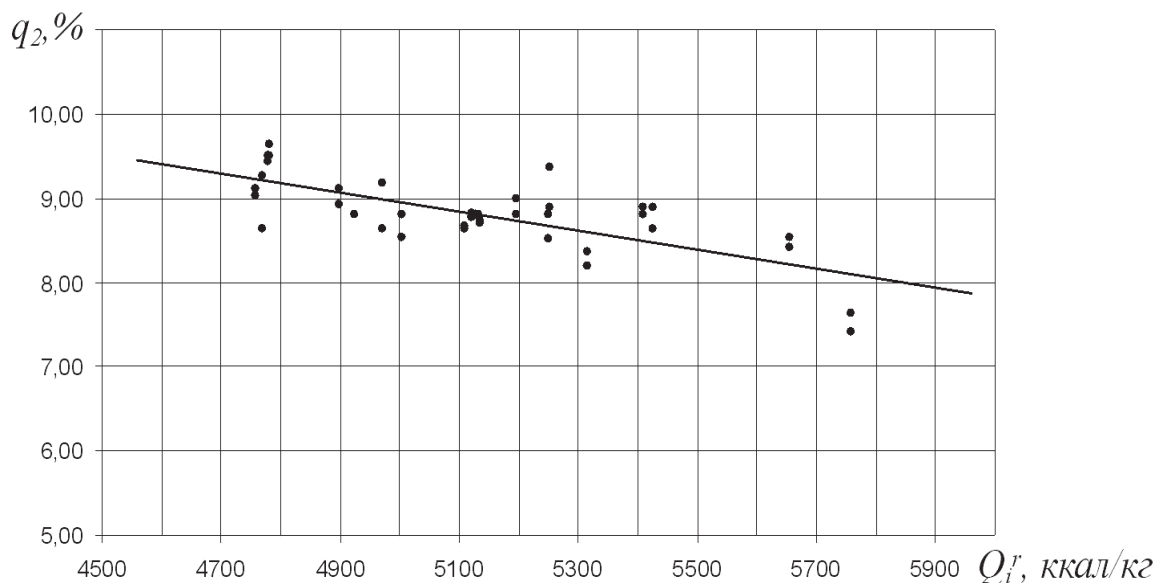


Рис. 4. Зависимость изменения q_2 от калорийности Q_i^r АШ для котла ТПП-210А

Анализируя данный рисунок можно сказать, что снижение низших рабочей теплоты сгорания АШ на каждые 100 ккал/кг (419 кДж/кг) приводит к увеличению потерь тепла с уходящими газами на $0,09 \div 0,11$ %.

Аппроксимировав экспериментальные данные, изменение потерь тепла с уходящими газами Δq_2 , можно записать в следующем виде:

$$\Delta q_2 = K_Q^{q_2} \cdot 4,19 \cdot 10^{-2} \cdot \Delta Q_i^r, \% \tag{6}$$

где $K_Q^{q_2}$ – коэффициент пропорциональности, $\%/(кДж/кг)$.

Таким образом автором выведены и рассчитаны числовые значение коэффициентов пропорциональности, полученные из формул (4-6) для котельной установки ТПП-210А (табл. 3). Важность этих коэффициентов состоит в возможности прогнозирования значений тепловых потерь q_4 и q_2 , имея только данные теплотехнических характеристик угля. Оперативное прогнозирование тепловых потерь в условиях эксплуатации предоставит возможность определять наиболее эффективные режимы протекания процесса горения для снижения удельного расхода топлива и повышения экономичности работы котла.

Таблица 3

Коэффициенты пропорциональности $K_A, K_Q^{q_2}, K_Q^{q_4}$

Тип оборудования	Коэффициенты пропорциональности		
	K_A	$K_Q^{q_2}$	$K_Q^{q_4}$
Котел ТПП-210А	0,09	0,12	0,28

На рис. 5 приведена зависимость удельного расхода топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии для котла ТПП-210А от калорийности сжигаемого АШ.

Из рис. 5 следует, что уменьшение Q_i^r АШ на каждые 100 ккал/кг (419 кДж/кг) приводит к возрастанию удельного расход натурального топлива на $\sim 8-9$ г/(кВт·ч).

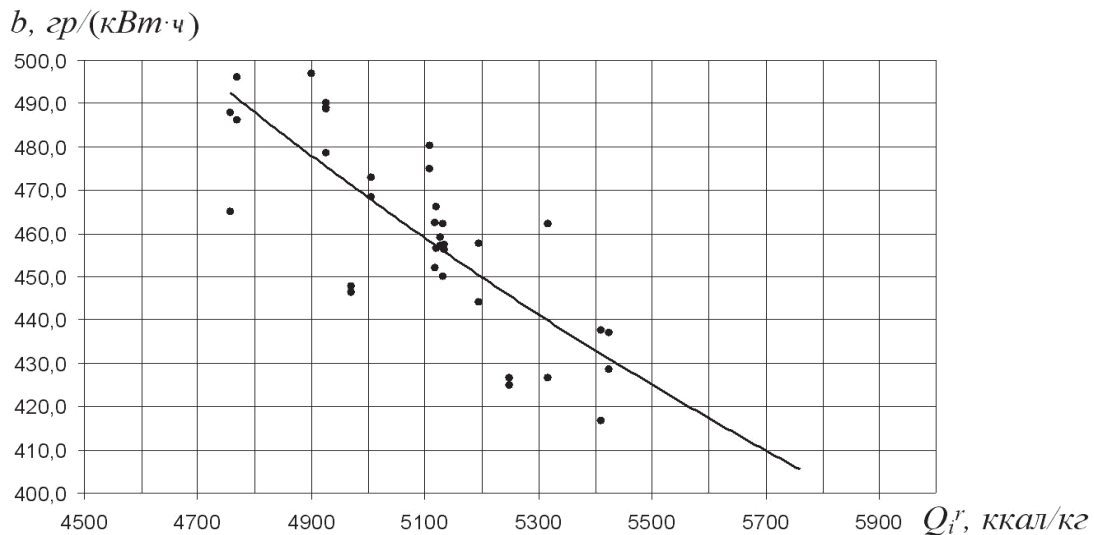


Рис. 5. Зависимость удельного расхода натурального топлива для котла ТПП-210А от рабочей низшей теплоты сгорания АШ

Для обобщения характеристик работы котельного оборудования на определенном виде (марке) угля используют удельный расход условного топлива на выработку 1 кВт·ч электроэнергии, изменение которого можно записать, как:

$$\Delta b_{y.m.} = b_{y.m.(н)} \cdot \frac{\Delta \eta_{\kappa}^{\text{бp}}}{\eta_{\kappa(н)}^{\text{бp}}}, \text{ г у.т./кВт}\cdot\text{ч} \quad (7)$$

где $b_{y.m.(н)}$ – удельный нормативный расход условного топлива, г у.т./кВт·ч;

$\eta_{\kappa(н)}^{\text{бp}}$ – КПД котельной установки (нормативный) брутто, %;

$\Delta \eta_{\kappa}^{\text{бp}} = \eta_{\kappa(н)}^{\text{бp}} - \eta_{\kappa(\text{HTП})}^{\text{бp}}$ – разница между нормативным КПД и КПД котла при работе на непроектном твердом топливе (НТП), %.

По своей сути изменение КПД брутто $\Delta \eta_{\kappa}^{\text{бp}}$ котельной установки, в основном, состоит из суммы изменения потерь тепла с механическим недожогом и уходящими газами.

Так как выше уже была доказана зависимость потерь q_2 и q_4 (с выводом соответствующих коэффициентов пропорциональности) от теплоты сгорания Q_i^r то очевидно, что удельный расход условного топлива тоже напрямую зависит от калорийности угля и (после некоторых математических преобразований) может быть определен как:

$$\Delta b_{y.m.} = b_{y.m.(н)} \cdot \frac{\Delta Q_i^r \cdot (K_Q^{q_4} + K_Q^{q_2}) \cdot 10^{-2}}{\eta_{\kappa(н)}^{\text{бp}}}, \text{ г у.т./кВт}\cdot\text{ч} \quad (8)$$

где $K_Q^{q_4}$, $K_Q^{q_2}$ – коэффициенты пропорциональности потери тепла с механическим недожогом и уходящими газами соответственно, что для АШ, взяты из табл. 3 %/(кДж/кг).

Так для блоков 300 МВт с котлами ТПП-210А перерасход АШ из-за снижения его проектной низшей рабочей теплоты сгорания от 5790 до 4790 ккал/кг при нормативном $\eta_{\kappa(н)}^{\text{бp}} = 91,7$ % и нормативном расходе условного топлива 240 г у.т./кВт·ч составит:

$$\Delta b_{y.m.} = 240 \cdot \frac{1000 \cdot (0,28 + 0,12) \cdot 10^{-2}}{91,7} = 10,47, \text{ г у.т./кВт}\cdot\text{ч}$$

В денежном эквиваленте перерасход условного топлива запишется так:

$$\Gamma = \Delta b_{y.m.} \cdot K_{y.m.}, \text{ дол./кВт}\cdot\text{ч} \quad (9)$$

где $K_{y.m.}$ – цена тонны условного топлива, дол./кВт·ч.

При известной (100 дол./т у.т.) средней стоимости АШ в эквиваленте условного топлива ущерб в денежном выражении составит 1,047 дол./кВт·ч.

Выводы

1. Исследовано влияние качества непроектного топлива и режимных факторов на показатели надежности и экономичности работы котельного оборудования с составлением соответствующих номограмм для расчетов;

2. Обосновано, что ущерб, причиненный снижением качества топлива от проектного значения, оценивается по уменьшению таких показателей угля как зольность, влажность и калорийность. Получены аналитические зависимости влияния вышеуказанных показателей на перерасход топлива, связанный с увеличением потерь тепла с механическим недожогом и потерями тепла с уходящими газами;

3. Впервые получены аналитические зависимости и поправочные коэффициенты для определения изменения потери тепла с механическим недожогом НТП, сжигаемого в камерных топках котлов с жидким шлакоудалением, как функция от его калорийности и зольности. Обосновано вероятность ущерба вызванного недовыработкой электроэнергии из-за увеличения тепловых потерь;

4. Впервые, на основе аналитических и экспериментальных исследований, разработан метод оценки ущерба нанесенного электростанции из-за ухудшения теплотехнических характеристик топлива и, как следствие, повышения тепловых потерь с уходящими газами, механическим недожогом и увеличением перерасхода условного топлива.

Список литературы

1. Майстренко О. Ю., Топал О. І., Гапонич Л. С. Сучасний стан вугільної енергетики України та перспективи її оновлення і розвитку // Наук. пр. Нац. ун-ту харч. Технологій. – 2010. – № 32. – С. 43–47
2. Borisov N. A. Experiences from operation of boilers feeded with low volatility coals // Proc. of Intern. Conf. "Improvement of Energy Efficiency and Environmental Performance of Coal Fired Power Plants including Aspects of Low Reactivity Coals". – Warsaw. 16–17 June 2004. – 3 p.
3. Др'омін В. П., Костенко Г. П., Згуровець О. В. Аналіз витрат палива блоками // Проблеми загальної енергетики. – 2008. – № 18. – С. 7–15.
4. Капельсон Л. М. Организация и проведение опитного сжигания непроектного топлива // Электрические станции. – 2001. – № 5. – С. 16–21.
5. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод. НПО ЦКТИ, СПб:1998 г.
6. Равич М. Б. Эффективность использования топлива. Изд-во «Наука», 1977, 344 с.

METHOD FOR ANALYTICAL DETERMINATION OF EXCESS FUEL FLOW IN PULVERIZED-COAL FIRED BOILERS

A. A. KAPUSTYANSKY,
«Lviv Polytechnic» National University

This paper presents the results of tests of the TPP-210A pulverized-coal fired boiler at Trypillya TPP with investigation into the effect of burning characteristics of solid fuel and operation conditions on the effectiveness of its operation. It was proved that the damage caused by deterioration in quality of fuel as compared to the design values is evaluated by reduction of such coal parameters as ash content, humidity and lower working heat value. It also derives analytical dependencies of impact of the above parameters on excess fuel flow due to heat losses resulting from unburned carbon and loss of heat with exhaust gases. Based on analytical and experimental research respective calculation charts were built, the method for evaluation of damage caused by deterioration of burning characteristics of fuel, and as a result, increase of heat losses with exhaust gases, unburned carbon and increased excess fuel flow of standard fuel was developed.

Key words: steam boiler, solid fuel, unburned carbon.

Поступила в редакцию 12.04 2013 г.