

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,  
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА  
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПЕРЕВОДА  
КОТЛОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ  
НА СЖИГАНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО УГЛЯ**

© 2021 г. М. Н. Майданик<sup>а</sup>, \*, Э. Х. Вербовецкий<sup>а</sup>, А. Н. Тугов<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

\*e-mail: MNMaydanik@vti.ru

Поступила в редакцию 09.11.2020 г.

После доработки 25.11.2020 г.

Принята к публикации 23.12.2020 г.

Приведены методы и система оценок технической возможности перевода котлов тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, на сжигание альтернативного угля. Предложена принципиальная схема проведения работ на предварительном этапе, включающая в себя анализ опыта сжигания альтернативного угля на других ТЭС и характеристик (свойств) сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей. По опыту эксплуатации определено соответствие марок углей друг другу по устойчивости горения. При сравнительном анализе характеристик сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей выполнены оценки теплотехнических показателей топлив, их характеристик, влияющих на выбросы вредных веществ и золошлакоудаление, шлакующих и загрязняющих свойств, абразивных свойств топлива и золы, взрывоопасных свойств, показателей склонности к окислению и самовозгоранию, сыпучих свойств и смерзаемости топлив. Рассмотрены особенности проведения оценок при сжигании смесей твердых топлив. Представлены условия, определяющие техническую возможность использования альтернативного топлива без обязательного проведения опытного сжигания. Приведены программы организационно-технических мероприятий по подготовке и проведению опытного сжигания альтернативного угля. По результатам работ на предварительном этапе уточняются условия получения обоснованных оценок технической возможности и целесообразности использования альтернативного угля, в том числе необходимость опытного сжигания альтернативного угля и требуемого объема реконструкции оборудования.

*Ключевые слова:* тепловая электростанция, твердое топливо, котел, альтернативный уголь, физико-химические характеристики топлива, свойства топлива, сравнительная оценка топлив, опытное сжигание

**DOI:** 10.1134/S0040363621080051

Необходимость изменения топливного режима тепловых электростанций, работающих на твердом топливе (угле), с переводом их на сжигание альтернативного угля<sup>1</sup> возникает в настоящее время вследствие сокращения и необеспеченности поставок угля на ТЭС, ухудшения его качества, предложений по использованию более дешевого угля, ужесточения экологических требований.

Организация изменения топливного режима должна представлять собой процесс последовательных и взаимосвязанных работ, в результате которых получают расчетно-аналитические и экс-

пертные оценки технической возможности и целесообразности использования альтернативного угля (предварительный этап) и подготовку и проведение его опытного сжигания.

В статье рассматриваются методика и система оценок, выполняемых на предварительном этапе, по результатам которых делаются следующие выводы:

перевод на альтернативный уголь возможен без необходимости опытного сжигания, без каких-либо изменений действующего оборудования или только с незначительными и технически обоснованными реконструктивными работами;

для определения возможности и условий перевода на альтернативный уголь, уточнения и окончательной оценки объема реконструкции требуется проведение его опытного сжигания;

<sup>1</sup> Топливо (уголь), на использование которого не были рассчитаны котлы ТЭС при их проектировании или реконструкции, а также ранее не использовавшийся на ТЭС уголь и уголь, не прошедший на ТЭС опытное сжигание.

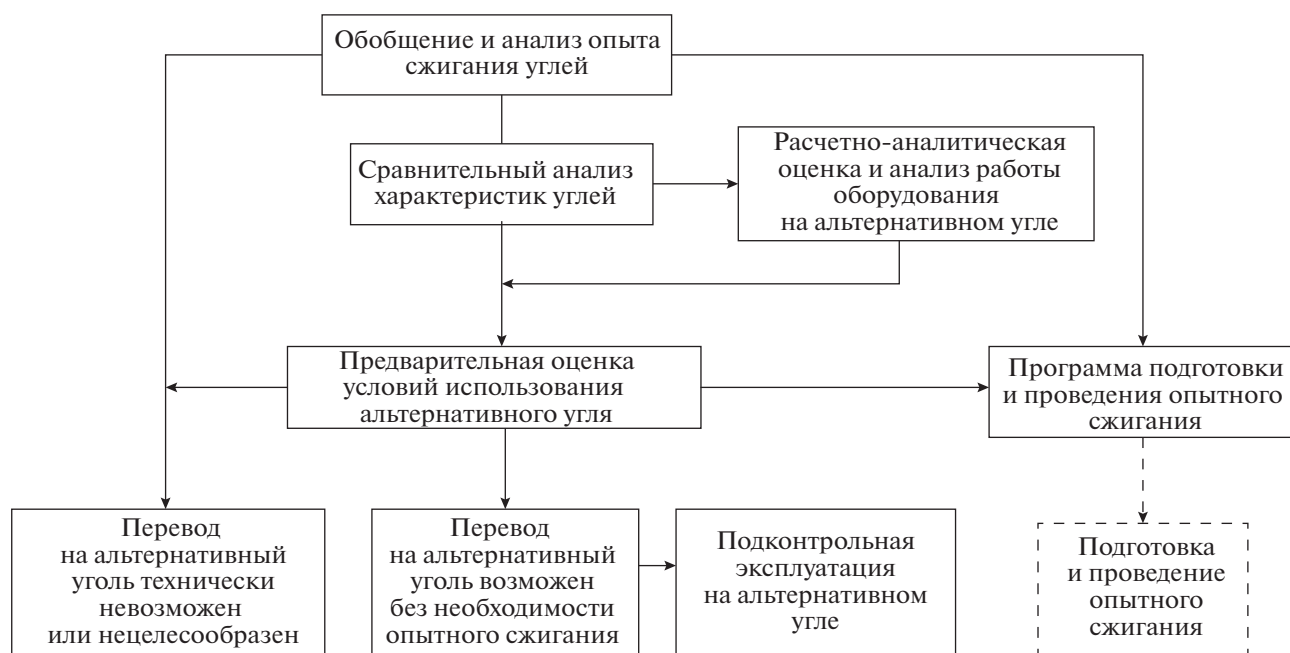


Рис. 1. Общий алгоритм проведения работ на предварительном этапе

перевод на альтернативный уголь технически невозможен или нецелесообразен, так как требует многозатратной реконструкции или замены оборудования без перспектив окупаемости затрат.

В состав работ на предварительном этапе должны входить:

обобщение и анализ опыта сжигания альтернативного угля на других ТЭС (при его наличии) или углей, имеющих близкие к нему характеристики;

сравнительный анализ характеристик сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей;

расчетно-аналитическая оценка и анализ работы оборудования ТЭС при сжигании альтернативного топлива (при необходимости их проведения);

предварительная оценка возможности и условий перевода на альтернативный уголь, необходимости проведения опытного сжигания и требуемого объема реконструкции оборудования;

разработка программ организационно-технических мероприятий по подготовке и проведению опытного сжигания альтернативного угля (при необходимости опытного сжигания).

Принципиальная схема проведения работ на предварительном этапе показана на рис. 1.

### АНАЛИЗ ОПЫТА СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ

При анализе опыта сжигания альтернативного угля на других ТЭС или углей, имеющих близкие к нему характеристики, выявляются основные

проблемы использования таких углей, оцениваются технические возможности устранения проблем, возникающих при применении таких углей на рассматриваемом объекте. На этой стадии работ и без проведения дополнительных анализов могут быть определены угли, которые не пригодны для использования в качестве альтернативных без серьезной реконструкции или замены оборудования ТЭС, а также угли, возможность использования которых может быть окончательно установлена только после проведения опытного сжигания. Типичные примеры несоответствия углей установленному на ТЭС оборудованию и возникающие проблемы при их использовании даны в табл. 1.

Необходимость опытного сжигания, а также в большинстве случаев реконструкции котельного оборудования по условиям топочного процесса (устойчивости горения) будет возникать, если альтернативный и сжигаемый на ТЭС угли по маркам не совпадают или не будут соответствовать один другому по маркам, приведенным далее:

Сжигаемый на ТЭС уголь	Альтернативный уголь
1Б	2Б
2Б, 3Б	Г, Д, ДГ
Д	Г, ДГ
Г	Д, ДГ, Ж
Ж	Г, К
СС	К
Т	А, СС

**Таблица 1.** Проблемы, возникающие при использовании углей

Котел	Уголь	Основные проблемы
С низкотемпературной топкой и твердым шлакоудалением, в особенности с пылесистемой, оборудованной мельницами-вентиляторами	Низкорреакционный (АШ, тощий)	Неустойчивость воспламенения, повышенные потери от механического недожога
Для сжигания маловлажных каменных углей	Высоковлажный бурый с низкой теплотой сгорания	Трудности обеспечения достаточной производительности пылесистем
С мокрыми золоуловителями	С большим содержанием оксида кальция	Отложения в мокрых золоуловителях, каналах гидрозолоудаления и золопроводах
С жидким шлакоудалением	С тугоплавкой золой	Нарушение выхода жидкого шлака
Для сжигания экибастузского угля	С легкоплавкой золой, шлакующей	Шлакование и загрязнение поверхностей нагрева

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УГЛЕЙ

Для выполнения сравнительного анализа сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей характеристики каждого из них должны содержать элементный состав, влагу общую, влагу гигроскопическую, зольность, теплоту сгорания, выход летучих веществ, коэффициент размолоспособности, химический состав минеральной части, гранулометрический состав. При оценке представительности и достоверности результатов анализов топлив по теплоте сгорания и составу следует руководствоваться требованиями норм [1].

При сравнительном анализе характеристик сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей проводят сопоставительные расчетно-аналитические и экспертные оценки следующих показателей и свойств топлив:

- теплотехнических показателей;
- характеристик топлива и золы, влияющих на выбросы вредных веществ, золоулавливание и золошлакоудаление;
- шлакующих и загрязняющих свойств;
- абразивных свойств топлива и его золы;
- взрывоопасных свойств;
- показателей склонности к окислению и самовозгоранию;
- сыпучих свойств;
- смерзаемости.

*Теплотехнические показатели топлив.* По этим показателям, рассчитываемым по физико-хими-

ческим, техническим и коррозионно-активным характеристикам, при использовании альтернативного угля оценивается вероятность изменения теплотехнических и аэродинамических параметров котла и вспомогательного оборудования, в том числе требуемой производительности тягодутьевых машин, размольной и сушильной производительности системы пылеприготовления, других теплотехнических параметров котельной установки.

Теплотехнические показатели разделяются на следующие группы:

I – теоретическое количество (объем) сухого воздуха для полного сгорания топлива  $V^0$ , теоретический объем дымовых газов  $V_r^0$ , низшая теплота сгорания  $Q_i^r$  и зольность  $A^r$  в рабочем состоянии топлива;

II – коэффициент размолоспособности  $K_{ло}$ , поправочные коэффициенты  $\Pi_{вл}$ , учитывающие влияние влажности топлива на производительность мельниц;

III – температура точки росы продуктов сгорания  $t_p$ .

Теоретические объемы  $V^0$  и  $V_r^0$  вычисляют в соответствии с элементным составом топлива по нормам [1]. Значение коэффициента размолоспособности  $K_{ло}$  принимают по шкале ВТИ [2, 3]. Поправочные коэффициенты  $\Pi_{вл}$  рассчитывают в зависимости от гигроскопической и общей влаги топлива в рабочем состоянии по нормам [2].

При сравнительном анализе характеристик топлив температуру точки росы дымовых газов определяют по температуре водяной точки росы с учетом ее повышения вследствие присутствия свободного серного ангидрида в топливах с относительно большим содержанием серы и незначительной доли оксида серы, связываемого летучей золой, и наличия хлористого водорода в дымовых газах (в хлорсодержащих топливах).

Температуру водяной точки росы определяют по термодинамическим свойствам воды и водяного пара в состоянии насыщения по парциальному давлению водяного пара, численно равного его объемной доле в продуктах сгорания анализируемых топлив.

Предельные отклонения значений теплотехнических показателей сжигаемого на ТЭС угля  $\delta$  от значений таких показателей альтернативных углей, которые могут считаться незначительными для изменения теплотехнических и аэродинамических параметров котельной установки и не требуют проведения дополнительных расчетно-аналитических анализов и оценок, даны в табл. 2.

*Характеристики топлива, влияющие на выбросы вредных веществ и золоулавливание.* В число характеристик альтернативного угля, влияющих на выбросы вредных веществ в атмосферу, включаются расчетные выбросы оксидов азота и серы и возможное снижение эффективности золоулавливающих установок. Сравнительную оценку влияния характеристик топлив на изменение выбросов оксидов азота  $\text{NO}_x$  выполняют по коэффициенту  $\xi_{\text{NO}_x}$ , учитывающему топливную составляющую эмиссии  $\text{NO}$  [4]:

$$\xi_{\text{NO}_x} = \left[ \frac{(100 - W_i^r - A^r - V^r)}{V^r} \right]^{0.6} + (1 + N^d),$$

где  $W_i^r, V^r$  – влага общая и выход летучих веществ топлива в рабочем состоянии, %;  $N^d$  – содержание азота в топливе в сухом состоянии, %.

При значении коэффициента  $\xi_{\text{NO}_x}$  для альтернативного угля меньше, чем для сжигаемого на ТЭС, вероятность увеличения выбросов  $\text{NO}_x$  вследствие изменения характеристик топлива не учитывают. В противном случае необходимо выполнить расчетную оценку выбросов оксидов азота по методике [4] с экспертной оценкой возможности их снижения технологическими (топочными) методами. Расчетное значение выбросов оксидов серы определяют по элементному составу топлива с

**Таблица 2.** Предельные отклонения значений теплотехнических показателей сжигаемого на ТЭС угля от значений показателей альтернативного топлива

Группа показателей	Показатель	$\delta$ , % (отн.)
I	$V^0$ , м <sup>3</sup> /кг	±10
	$V_r^0$ , м <sup>3</sup> /кг	
	$Q_i^r$ , МДж/кг	±5
	$A^r$ , %	30
II	$K_{\text{ло}}$	10
	$P_{\text{вл}}$	
III	$t_p$ , °С	5

Примечание. Для  $A^r$  и  $t_p$  оценка предельных отклонений в сторону увеличения при сжигании альтернативного топлива, для показателей группы II – в сторону уменьшения.

учетом доли оксидов серы, связываемых летучей золой, оцениваемой по методике [5].

Предварительную оценку изменения эффективности золоулавливающих установок при переходе на сжигание альтернативного угля осуществляют по изменению:

теплотехнических показателей группы I (см. табл. 2);

комплекса  $K_{\text{эл}}$  для электрофильтров [6]

$$K_{\text{эл}} = (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3) A^r / [(W_i^r + 9N^r) S^r],$$

где  $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3$  – содержание оксидов кремния и алюминия, % (элементы химического состава минеральной части топлива);  $N^r, S^r$  – содержание водорода и серы общей, % (элементы состава топлива в рабочем состоянии).

Пределы допускаемых отклонений значений теплотехнических показателей группы I, при которых можно не учитывать их влияние на эффективность существующих золоулавливающих установок, такие же, как в табл. 2.

При  $K_{\text{эл}} > 50$  и значении этого комплекса для альтернативного угля больше, чем для сжигаемого на ТЭС угля, необходимо рассчитать эффективность золоулавливающих устройств и оценить необходимость проведения их испытаний при опытной сжигании альтернативного угля.

*Шлакующие и загрязняющие свойства топлив.* Для сравнительного анализа наиболее пригодны оценки по нормированным показателям, опреде-

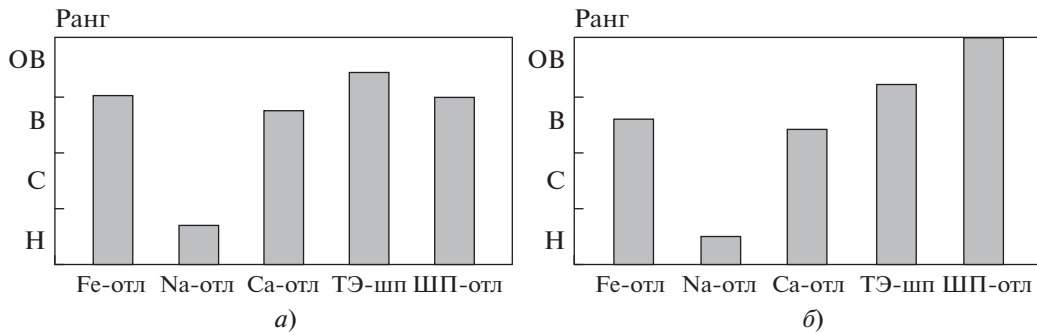


Рис. 2. Пример оценки шлакующих и загрязняющих свойств сжигаемого на ТЭС (а) и альтернативного (б) углей

ляющим склонность к образованию на поверхностях нагрева котлов золовых отложений, в соответствии с относительной шкалой значений (от 0 до 1) [7]. По этой шкале топливо классифицируется по рангам склонности к образованию отложений, общему шлакованию и загрязнению поверхностей нагрева: низкий (Н), средний (С), высокий (В) и очень высокий (ОВ), которые дают общую качественную оценку шлакующих и загрязняющих свойств топлива. Ранги склонности определяют в зависимости от значений индексов загрязнения и шлакования  $R$ , расчет которых производится по физико-химическим характеристикам топлива.

При оценках рассматриваются склонность к образованию прочных (плотных) связанных золовых отложений (железистых Fe-отл по индексу  $R_{Fe}$ ), на базе активных щелочей (Na-отл по индексу  $R_{Na}$ ), сульфатно-кальциевых (Ca-отл по индексу  $R_{Ca}$ ) и склонность к общему шлакованию и загрязнению топочных экранов (ТЭ-шп по индексу  $R_{Т.э}$ ) и полурадационных (ширмовых) поверхностей нагрева (ШП-шп по индексу  $R_{ш.п}$ ). Пример оценки шлакующих и загрязняющих свойств бурых углей Канско-Ачинского бассейна показан на рис. 2, значения индексов загрязнения и шлакования для этого примера приведены в табл. 3.

При сжигании альтернативного угля предельные отклонения (в сторону увеличения) индексов загрязнения ( $R_{Fe}$ ,  $R_{Na}$ ,  $R_{Ca}$ ) составляют 30% (отн.), индексов шлакования ( $R_{Т.э}$ ,  $R_{ш.п}$ ) – 20% (отн.).

Повышение загрязнения и шлакования при переходе на сжигание альтернативного угля учитывается при следующих условиях:

относительное изменение индексов превосходит предельные отклонения;

значение анализируемого индекса находится в области высокого или очень высокого ранга склон-

ности к образованию отложений или склонности к общему шлакованию и загрязнению.

При этих условиях требуется оценить возможность обеспечения бесшлаковочной кампании котла и необходимость при этом применения специально проработанных конструктивных и режимных мероприятий, направленных на предотвращение шлакования и интенсивного загрязнения, в том числе эффективных средств очистки поверхностей нагрева.

*Абразивные свойства золы топлива.* При переходе на сжигание альтернативного угля возможно усиление износа поверхностей нагрева при следующих условиях:

значение коэффициента абразивности золы  $a_3$  при остатке на сите 90 мкм, равном 20%, превышает  $10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$ ;

относительное изменение комплекса  $K_3 = a_3 A^r / V_r^0$  превышает 30%.

При указанных условиях необходима оценка абразивного износа поверхностей нагрева после проведения теплового расчета котла. Коэффициент абразивности золы  $a_3$  рекомендуется опреде-

Таблица 3. Индексы загрязнения и шлакования для сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей (пример оценки)

Индекс	Уголь	
	сжигаемый на ТЭС	альтернативный
$R_{Fe}$	0.73	0.62
$R_{Na}$	0.29	0.20
$R_{Ca}$	0.89	0.74
$R_{Т.э}$	0.86	0.79
$R_{ш.п}$	0.70	1.0

лять экспериментально в лабораторных испытаниях (по стандарту [8]) или рассчитать его значение в соответствии с химическим составом минеральной части топлива (по нормам [1]).

*Абразивные свойства (стирающая способность) топлива* зависят, в основном, от зольности и наличия в топливе примесей твердой породы. По ориентировочным оценкам существенное повышение износа мелющих элементов, пылепроводов и другого оборудования системы пылеприготовления при переходе на сжигание альтернативного угля может происходить при относительном увеличении зольности топлива (в сухом состоянии) или содержания  $\text{SiO}_2$  не менее чем на 30%. Для уточненной оценки абразивных свойств топлива необходимо их экспериментальное определение по стандарту [9].

*Взрывоопасные свойства топлива* оцениваются по критерию взрываемости  $K_r$ , который характеризует потенциальную склонность к взрыву и степень взрывоопасности размолотого топлива (пыли топлива) и определяется экспериментально. При отсутствии экспериментальных данных можно рассчитать  $K_r$ , используя физико-химические характеристики топлива [10]. Оценку взрывоопасных свойств топлив выполняют по инструкции [11]. Взрывобезопасность топливоподачи и систем пылеприготовления может не обеспечиваться, если переход на альтернативный уголь сопровождается повышением группы взрывоопасности, оцениваемой по значению  $K_r$ .

Если при переходе на сжигание альтернативного угля взрывобезопасность топливоподачи и систем пылеприготовления не может обеспечиваться, необходимо выполнить анализ конструкции, технологических схем и параметров пылеприготовительных установок на соответствие требованиям инструкции [11].

*Показатели склонности к окислению и самовозгоранию топлив* определяют условия хранения и надежность складов топлив и могут быть оценены по классификационным группам для углей, указанных в инструкции [12]. При отсутствии в этих группах анализируемых углей показатели определяются экспериментально при лабораторных испытаниях, например по рекомендациям [7], или в период проведения опытного сжигания в соответствии со стандартом [13].

Анализ условий хранения топлива и надежности склада следует проводить в тех случаях, когда переход на сжигание альтернативного угля повышает группу склонности к окислению топлива с меньшей устойчивостью к окислению и самовозгоранию.

*Сыпучие свойства топлив.* Ухудшение сыпучих свойств топлива при переходе на сжигание альтернативного угля может происходить в основном из-за его большей влажности. Степень ухудшения сыпучести топлива определяется опытным путем в процессе эксплуатации либо экспериментально при лабораторных испытаниях.

По приближенным оценкам ухудшения сыпучих свойств альтернативного угля можно ожидать, если значение общей влаги топлива  $W_t^r$  превышает предельное значение сыпучести  $W_c$ , %, рассчитываемое по формуле [14]

$$W_c = 0.8W_t^r + 0.62W_{гн} + 1.76,$$

где  $W_{гн}$  – влага гигроскопическая, %.

*Смерзаемость топлива* в большей степени зависит от разности между общей влажностью и безопасной влажностью  $W_6$ . Для сравнительного анализа значение безопасной влаги, %, можно рассчитать по выражению [15]

$$W_6 = 2.81W_{гн} - 0.4.$$

Изменение степени смерзаемости топлива при переходе на сжигание альтернативного угля, при которой может повышаться прочность примерзания топлива к стенкам вагона, учитывается при  $W_t^r > W_6$  и превышении  $W_t^r - W_6$  в альтернативном угле разности значений этих же показателей в сжигаемом на ТЭС угле.

#### РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА И АНАЛИЗ РАБОТЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС ПРИ СЖИГАНИИ АЛЬТЕРНАТИВНОГО УГЛЯ

Необходимость оценки определяется по результатам сравнительного анализа характеристик сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей.

При больших, чем указано в табл. 2, отличиях любого или всех теплотехнических показателей в состав оценок в общем случае включаются:

для показателей группы I – теплогидравлический расчет котла и аэродинамический расчет котельной установки, тепловой расчет системы пылеприготовления;

для показателей группы II – размольная производительность, дополнительно – возможность размолы при изменении коэффициента размольности за пределами допустимого диапазона для установленного типа мельницы;

для показателей группы III – температурный режим низкотемпературных поверхностей нагрева по условиям коррозии и образования золовых отложений.

Кроме того, оцениваются:

выбросы оксидов азота по методике [4] и возможность их снижения технологическими (топочными) методами, а также выбросы оксидов серы и соответствие их нормативам;

эффективность золоулавливающих устройств и необходимость проведения их испытаний при опытном сжигании альтернативного угля;

параметры основного оборудования топливно-транспортного хозяйства: производительность вагоноопрокидывателей, эстакады, конвейеров и дробилок, вместимость склада и другие параметры механизмов.

*Оценки при использовании смеси углей.* При использовании альтернативного угля в смеси со сжигаемым на ТЭС углем большинство оценок свойств топлив и расчетов оборудования выполняются по средневзвешенному составу смеси, рассчитываемому, в зависимости от способа задания, в долях тепловыделения или массовых долей углей в смеси [1]. Исключением будут являться следующие оценки:

выбросы вредных веществ в атмосферу, производительность мельниц и оборудования топливно-транспортного хозяйства – отдельно для каждого из углей в смеси, результаты суммируются по заданным массовым долям углей в смеси;

взрывоопасные свойства, размолоспособность, сыпучие свойства и смерзаемость топлива – по тому углю в смеси, использование которого может приводить к наибольшим проблемам в эксплуатации, при условии, что содержание его в смеси составляет не менее 5%.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ И УСЛОВИЙ ПЕРЕВОДА НА АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ УГОЛЬ

При оценке возможности перевода оборудования ТЭС на сжигание альтернативных углей учитываются следующие параметры и показатели:

критерий взрываемости топлива, возможность обеспечения условий его безопасного сжигания, предупредительные меры для обеспечения пожаровзрывобезопасности при эксплуатации пылеприготовительного оборудования;

возможность обеспечения номинальных паропроизводительности и параметров пара, расчетный диапазон изменения нагрузки котла, КПД котла и расход топлива, температурный режим

поверхностей нагрева, работающих в области ползучести, и низкотемпературных поверхностей нагрева по условиям коррозии и образования золовых отложений и работы золоулавливающих установок;

производительность и другие параметры тягодутьевых машин в условиях работы котла на альтернативном угле;

свойства золы и шлака альтернативного угля, влияющие на интенсивность шлакования и загрязнение поверхностей нагрева, степень цементации золы, вероятность заносов оборудования золоулавливания и золоудаления, газоходов и дымососов;

экологические показатели в части выбросов оксидов азота, оксидов серы (при необходимости их оценки), эффективность золоулавливающих устройств;

параметры сушки топлива, транспортировки пыли и сушильного агента по условиям взрывобезопасности, размольная производительность мельниц;

параметры оборудования топливно-транспортного хозяйства, включая возможность раздельной подачи сжигаемого на ТЭС и альтернативного углей в бункеры котлов;

техническая пригодность оборудования ТЭС для сжигания альтернативного угля.

По результатам оценки составляется предварительное технико-экономическое обоснование условий использования альтернативного угля, включая необходимость и предварительную оценку объема реконструкции оборудования и проведения опытного сжигания альтернативного топлива.

### ТЕХНИЧЕСКАЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТОПЛИВА БЕЗ НЕОБХОДИМОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНОГО СЖИГАНИЯ

Использование альтернативного угля при изменении топливного режима ТЭС без необходимости проведения опытного сжигания и реконструкции (модернизации) оборудования технически возможно, если теплотехнические показатели не выйдут за пределы, указанные в табл. 2. В противном случае, согласно расчетно-аналитическим оценкам, при применении альтернативного угля обеспечиваются:

номинальные паропроизводительность и параметры пара, расчетный диапазон изменения нагрузки котла;

допустимый температурный режим работы поверхностей нагрева, работающих в области ползучести;

допустимый по условиям коррозии и образования золотых отложений температурный режим низкотемпературных поверхностей нагрева;

требуемые производительность и другие параметры тягодутьевых машин, параметры сушки топлива и транспортировки пыли, размольная производительность мельниц, допустимые параметры сушильного агента по условиям взрывобезопасности.

При этом необходимо выполнение следующих условий:

по расчетным оценкам индексов загрязнения и шлакования переход на сжигание альтернативного угля не должен приводить к интенсификации шлакования и загрязнения поверхностей нагрева котла;

по предварительной оценке изменение эффективности золоулавливающих установок при переходе на сжигание альтернативного угля не приведет к ухудшению существующего экологического состояния ТЭС;

по расчетным и экспертным оценкам выбросы оксидов азота при сжигании альтернативного угля не будут превосходить нормативов удельных выбросов или не изменят существующее экологическое состояние ТЭС;

показатели склонности к окислению и самовозгоранию топлив не требуют проведения дополнительных экспериментальных исследований;

по экспертным оценкам степень ухудшения сыпучести топлива не будет приводить к затруднениям топливоподачи;

по условиям топочного процесса (устойчивости горения) марка альтернативного угля должна совпадать с маркой сжигаемого на ТЭС угля либо соответствовать ей по устойчивости горения и выход летучих веществ углей не должен различаться больше чем на  $\pm 10\%$  (абс.).

При положительных расчетно-аналитической и экспертной оценках технической возможности и целесообразности использования альтернативного угля окончательные условия его применимости должны уточняться по результатам подконтрольной эксплуатации. Последняя проводится для подтверждения фактических показателей надежности и эффективности оборудования после ввода его в эксплуатацию в течение не менее 30 сут непрерывной работы. При этом подконтрольная эксплуатация, в отличие от опытного сжигания, может выполняться эксплуатационным персоналом при осуществлении контроля показателей оборудова-

ния по специальной программе, в том числе показателей, указанных в программе проведения опытного сжигания.

### ПРОГРАММА ОРГАНИЗАЦИОННО-ТЕХНИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИЮ ОПЫТНОГО СЖИГАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО УГЛЯ

Для организации подготовки к опытному сжиганию должна быть разработана программа организационно-технических мероприятий, предусматривающая:

сроки проведения опытного сжигания;

длительность сжигания альтернативного угля и объем его поставки;

оценку возможности топливно-транспортного хозяйства по приему, выгрузке, складированию и подаче альтернативного угля к котлу, выделенному для проведения опытного сжигания;

оценку возможности топливно-транспортного хозяйства для одновременного сжигания альтернативного угля в котле, выделенном для проведения опытного сжигания, и углей, сжигаемых на ТЭС в остальных котлах;

определение места складирования альтернативного угля;

обследование состояния основного и вспомогательного оборудования котельной установки;

состав необходимых реконструктивных или иных технических мероприятий по обеспечению пожаро- и взрывобезопасности тракта топливоподачи, системы пылеприготовления и котла;

реконструкцию оборудования котельной установки и топливно-транспортного хозяйства (при необходимости);

наладку оборудования после реконструкции (при необходимости);

корректировку действующей или разработку временной эксплуатационной документации;

разработку технической и рабочей программ подготовки к опытному сжиганию.

Программа и методика проведения опытного сжигания должны предусматривать проведение работ, в результате которых определяются:

техничко-экономические показатели котла, включая обеспечение номинальных параметров в диапазоне рабочих нагрузок и параметров среды по пароводяному тракту в допустимых пределах;



диапазон обеспечиваемых нагрузок котла и причины их ограничения;

выбросы вредных веществ и возможности обеспечения соответствия их действующим нормативам, оптимальные режимы работы котла по условиям минимальных выбросов оксидов азота;

эффективность и надежность работы систем золоулавливания;

возможность получения рекомендуемой тонины помола пыли для альтернативного угля;

условия обеспечения устойчивости горения без подсветки, возможность устойчивого выхода шлака при жидком шлакоудалении;

бесшлаковочная нагрузка котла, интенсивность шлакования и загрязнения, высоко- и низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева котла в диапазоне рабочих нагрузок;

ограничения по производительности тягодутьевых машин;

условия работы тракта топливоподачи, систем пылеприготовления и золошлакоудаления;

ограничения по сушильной и размольной производительности мельниц, возможность обеспечения взрывобезопасности систем топливоподачи и пылеприготовления и поддержания температуры сушильного агента за мельницами в допустимых пределах;

возможность использования альтернативного угля по условиям топливно-транспортного хозяйства и угольного склада.

предельно допустимая доля альтернативного угля при его опытном сжигании в смеси со сжигаемым на ТЭС углем.

## ВЫВОДЫ

1. Предложенная методика и система оценок технической возможности перевода котлов тепловых электростанций, работающих на твердом топливе, на сжигание альтернативного угля основана на сравнительном анализе характеристик (свойств) углей и расчетно-аналитических оценках и анализе работы оборудования ТЭС на альтернативном угле. Такие работы выполняются на предварительном этапе организации изменения топливного режима ТЭС.

2. По результатам работ на предварительном этапе (этапе предварительных оценок) определяются условия, необходимые для получения обоснованных оценок технической возможности и целесообразности использования альтернативного угля, в том числе обязательность проведения

его опытного сжигания и требуемого объема реконструкции оборудования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Тепловой** расчет котлов. Нормативный метод. СПб.: НПО ЦКТИ, 1998.
2. **Расчет** и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов. Нормативные материалы. Л.: ЦКТИ, 1971.
3. **ГОСТ 15489.1-93**. Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Метод определения коэффициента размолоспособности по ВТИ. М.: Изд-во стандартов, 1995.
4. **СО 153-34.02.304-2003**. Методические указания по расчету выбросов оксидов азота с дымовыми газами котлов тепловых электростанций. М.: ОАО ВТИ, 2005.
5. **РД 34.02.305-98**. Методика определения валовых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных установок ТЭС. М.: ООО ВТИ, 1998.
6. **Энергетика** и охрана окружающей среды / под ред. Н.Г. Залогина, Л.И. Кроппа, Ю.М. Кострикина. М.: Энергия, 1979.
7. **Энергетические** угли восточной части России и Казахстана: справ. Челябинск: УралВТИ, 2004.
8. **ГОСТ 21708-96**. Топливо твердое минеральное. Метод определения коэффициента абразивности золы. М.: Изд-во стандартов, 1997.
9. **ГОСТ 30827-2002 (ИСО 12900-97)**. Топливо твердое минеральное. Определение истирающей способности (абразивности). М.: Изд-во стандартов, 2003.
10. **Толчинский Е.Н., Колбасников В.А.** Инженерный метод оценки взрывоопасных свойств пыли энергетических топлив // Электрические станции. 1999. № 3. С. 2–9.
11. **СО 153-34.03.352-2003**. Инструкция по обеспечению взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. М.: ЦПТИ ОРГРЭС, 2004.
12. **РД 34.44.101-96**. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 1997.
13. **ГОСТ Р 57012-2016**. Стандартная практика по определению признаков окисления и самовозгорания углей. М.: Стандартинформ, 2016.
14. **Алехнович А.Н.** Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицero, 2012.
15. **Михайлов Н.М., Шарков А.Т.** Физические свойства топлива и борьба с затруднениями на топливоподаче электростанций. М.: Энергия, 1972.

## Preliminary Assessment of the Possibility to Shift Thermal Power Plant Boilers for Burning Alternative Coal

M. N. Maidanik<sup>a, \*</sup>, E. Kh. Verbovetskii<sup>a</sup>, and A. N. Tugov<sup>a</sup>

<sup>a</sup> All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: MNMaydanik@vti.ru

**Abstract**—The article presents methods and a system of assessments for estimating the technical feasibility of shifting the boilers of thermal power plants (TPPs) operating on solid fuel for burning alternative coal. A basic arrangement of carrying out works at the preliminary stage is proposed, which includes an analysis of experience gained from combustion of alternative coal at other TPPs and the characteristics (properties) of the design and alternative coals burned at a TPP. Based on field experience, the correspondence of coal grades to each other in regard to combustion stability is determined. In the course of a comparative analysis into the characteristics of the design coal burned at a TPP and alternative coal, the thermal performance indicators of the fuels, their characteristics influencing the harmful emissions and ash and slag removal, slagging and fouling properties, fuel and ash abrasive properties, explosion hazard properties, indicators characterizing the proneness to oxidation and self-ignition, and fuel flowability and congelation are estimated. The specific features of carrying out assessments in burning mixtures of solid fuels are considered. The conditions determining the technical feasibility of using alternative fuel without performing its mandatory experimental combustion are presented. Programs of organizational and technical measures for preparing and performing experimental combustion of alternative coal are given. Based on the results of works carried out at the preliminary stage, the conditions for obtaining substantiated assessments of technical feasibility and advisability of using alternative coal are determined more exactly, including the need to perform experimental combustion of alternative coal and the required scope of equipment's modifications.

**Keywords:** thermal power plant, solid fuel, boiler, alternative coal, fuel physicochemical characteristics, fuel properties, comparative assessment of fuels, experimental combustion