Оригинальная статья

УДК 621.181.018:620.09 © Ф.М. Векслер[1], Р.Е. Алешинский✉[2], С.В. Васильев[2], 2026

[1] АО «Фирма ОРГРЭС», 107023, г. Москва, Россия
[2] ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 127083, г. Москва, Россия
✉ e-mail: Aleshinskiy@rosenergo.gov.ru

Original Paper

UDC 621.181.018:620.09 © F.M. Veksler[1], R.E. Aleshinsky✉[2], S.V. Vasilyev[2], 2026

[1] ORGRES JSC, Moscow, 107023, Russian Federation
[2] Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 127083, Russian Federation
✉ e-mail: Aleshinskiy@rosenergo.gov.ru

Влияние изменения теплотехнических характеристик сжигаемых углей на функционирование котельного оборудования пылеугольных ТЭС России

Impact of changes in thermal and technical characteristics of combusted coals on the operation of boiler equipment at coal-fired thermal power plants in Russia

DOI: http://dx.doi.org/10.18796/0041-5790-2026-10-37-44

Целью настоящей статьи является определение технологических факторов проектных ограничений сжигания угля на российских тепловых электростанциях (далее ТЭС), обусловленных его специфическими теплотехническими характеристиками. Анализируется влияние изменения основных теплотехнических характеристик угля, критически важных для сжигания, на функционирование конкретных узлов и агрегатов пылеугольных ТЭС. Принципиально важно, что проектные показатели эффективности и безопасности производства энергии на ТЭС достигаются только при сжигании проектного угля (с проектными теплотехническими характеристиками).

Ключевые слова: *пылеугольная тепловая электростанция, котельное оборудование, проектный уголь, теплотехнические характеристики угля, угольная смесь.*

Для цитирования: Векслер Ф.М., Алешинский Р.Е., Васильев С.В. Влияние изменения теплотехнических характеристик сжигаемых углей на функционирование котельного оборудования пылеугольных ТЭС России // Уголь. 2026;(10):37-44. DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-37-44.

Abstract

The purpose of this article is to determine the technological factors of the project limitations of coal combustion at the Russian thermal power plants (TPPs) due to its specific thermal and technical characteristics. It is analyzed the impact of changes in the key thermal and technical characteristics of coal, which are critical for combustion, on the operation of specific components and units of coal-fired TPPs. It is fundamentally important that the project indicators of efficiency and safety of power generation at TPPs are achieved only by combustion of project coal (with project thermal and technical characteristics).

Keywords

Coal-fired thermal power plant, boiler equipment, project coal, thermal and technical characteristics of coal, coal mixture.

ВЕКСЛЕР Ф.М.
Старший бригадный инженер АО «Фирма ОРГРЭС», 107023, г. Москва, Россия

АЛЕШИНСКИЙ Р.Е.
Доктор экон. наук, заместитель руководителя департамента ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 127083, г. Москва, Россия, e-mail: Aleshinskiy@rosenergo.gov.ru

ВАСИЛЬЕВ С.В.
Начальник отдела ФГБУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России, 127083, г. Москва, Россия, e-mail: Vasilev@rosenergo.gov.ru

For citation
Veksler F.M., Aleshinsky R.E., Vasilyev S.V. Impact of changes in thermal and technical characteristics of combusted coals on the operation of boiler equipment at coal-fired thermal power plants in Russia. *Ugol'*. 2026;(10):37-44. (In Russ.). DOI: 10.18796/0041-5790-2026-10-37-44.

ВВЕДЕНИЕ

Особую актуальность данная проблематика приобретает, конечно, во время ухудшения экспортной конъюнктуры – периодически встречаются мнения, что экспортные энергетические угли могут быть перенаправлены на отечественные ТЭС, попутно принеся им благо в виде повышения их технико-экономических показателей. Единственным преткновением при этом считается доступность цены экспортного угля для внутреннего потребителя. Естественно, аналогичное видение простоты замещения на ТЭС России проектных углей, сводимого только к ценовым аспектам, распространяется его сторонниками на любые поставляемые на ТЭС российские угли.

В качестве примера такой позиции достаточно привести оценки специалистов АО «СУЭК», полученные ими на основе апробации разработанной оригинальной имитационной модели подбора для ТЭС оптимальной угольной смеси и изложенные в статье в журнале «Уголь» в 2010 г.: «Модель позволяет найти экономически оптимальные качественные характеристики топлива, которые будут меняться от года к году, следуя за динамикой изменения таких факторов, как цены на уголь и электроэнергию, спрос на тепло и энергию, цены на материалы и услуги производственного характера и т.п …. Можно ответить на вопрос, топливо какого качества необходимо использовать для максимизации NPV. Если компания планирует отказаться от энергетического актива в краткосрочном периоде, то модель покажет, что выгоднее использовать менее качественное топливо, которое стоит дешевле. В этом случае все негативное воздействие на техническое состояние оборудования не успеет проявиться за короткий период, а экономия на закупках более дешевого угля окажется значительной… В последнее время на внешнем рынке стоимость угля значительно понизилась, и на внутренний рынок попадает уголь такого качества, какого электростанции уже давно не видели, а цены на него не кажутся заоблачными. Модель позволяет найти ту границу цен на уголь на внешнем рынке, при снижении ниже которой экспортный уголь выгоднее сжигать на собственных электростанциях, а не продавать за рубеж» [1].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Общеизвестно, что создание энергетики СССР происходило в условиях жестких финансовых, временны́х, технологических и других ограничений. В основном поэтому при проектировании ТЭС и их котельного оборудования применялись технические решения с пылеугольными факельными топками для сжигания углей близлежащих месторождений. В разделе 2-Г «Расчетные характеристики топлива» Нормативного метода теплового расчета котлов указано, что для выбора расчетных характеристик угля проектное задание должно содержать сведения о его месторождении, марке (в соответствии с полным перечнем теплотехнических характеристик) и классе по размеру кусков [2].

Таким образом, все отечественные пылеугольные котлоагрегаты (их основное и вспомогательное оборудование) запроектированы на сжигание угля с определенными теплотехническими характеристиками – проектного угля (конкретной марки конкретного месторождения).

Вследствие существенных отличий теплотехнических характеристик углей разных месторождений и марок их взаимозаменяемость для сжигания на конкретном котельном оборудовании крайне затруднена при обязательном условии сохранения эффективного и безопасного уровня производства энергии. При этом взаимозаменяемыми углями называют такие, сжигание которых не требует проведения реконструкции котельного оборудования.

К основным теплотехническим характеристикам угля, критически важным для сжигания на ТЭС, относятся: теплота сгорания (Q); выход летучих веществ (V); общая влага (W); зольность (A); содержание серы (S, SO_X); содержание азота (NO_X); химический состав золы и содержание кальция (CaO); температура плавления золы[1]; коэффициент размолоспособности (HGI); гранулометрический состав (R).

Влияние изменения рассматриваемых теплотехнических характеристик сжигаемого угля на функционирование конкретных узлов и агрегатов ТЭС схематично изображено на *рис.1, 2 (*знак ↑/↓ после обозначения показателя указывает на его увеличение/уменьшение по отношению к проектному значению, знак +/- обозначает получение позитивного/негативного эффекта при данном изменении показателя).

1. Теплота сгорания

Важнейший теплотехнический показатель угля, определяющий основные конструктивные особенности котлов с горелочными устройствами (количество горелок, их расположение, высоту и объем топочной камеры и др.), тип, производительность и оборудование систем пылеприготовления (СПП) и углеподачи. Изменения теплоты сгорания угля прежде всего связаны (в обратной зависимости) с изменением его влаги и зольности.

Примечание: в котлах по ходу движения уходящих газов различают три основных объема: топочная камера, поворотная камера и газоход(ы). Движение газов организовано совместной работой дутьевых вентиляторов, подающих в топку угольную пыль в смеси с воздухом, и дымососов, удаляющих из топки продукты сгорания. В указанных объемах на стенах размещаются поверхности нагрева – трубы небольшого диаметра (20-60 мм), внутри которых под давлением насосов движутся вода и пар.

[1] *Данный показатель не показан на рис. 1 и 2, потому что его изменение имеет разный эффект при использовании разных систем шлакоудаления: для сухого шлакоудаления недопустимо снижение данного показателя (несгоревшие частицы золы вместо того, чтобы оставаться в твердой фазе, начнут переходить в жидкую (расплавляться)), для жидкого шлакоудаления – его рост (частицы золы вместо того, чтобы расплавиться, останутся в твердой фазе).*

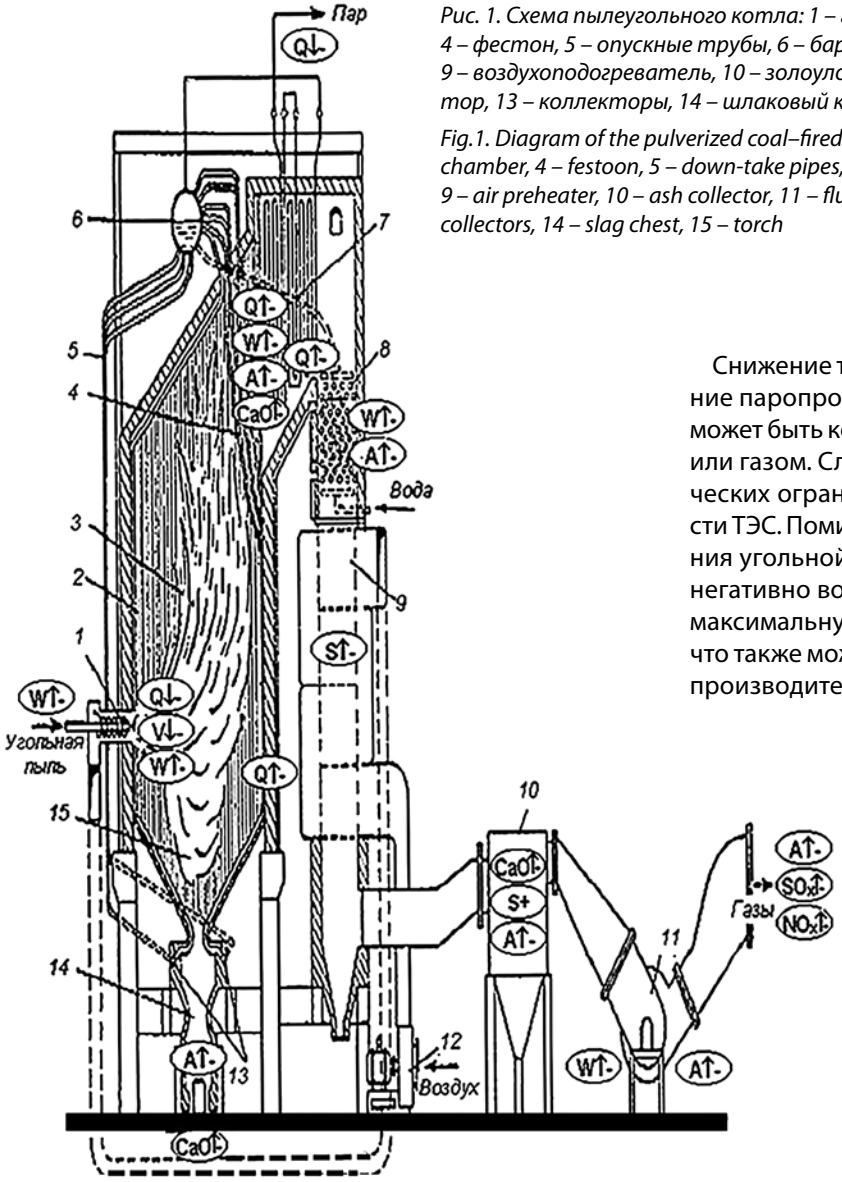

Рис. 1. Схема пылеугольного котла: 1 – горелка, 2 – экраны, 3 – топочная камера, 4 – фестон, 5 – опускные трубы, 6 – барабан, 7 – пароперегреватель, 8 – экономайзер, 9 – воздухоподогреватель, 10 – золоуловитель, 11 – дымосос, 12 – дутьевой вентилятор, 13 – коллекторы, 14 – шлаковый комод, 15 – факел

Fig.1. Diagram of the pulverized coal–fired boiler: 1 – burner, 2 – screens, 3 – combustion chamber, 4 – festoon, 5 – down-take pipes, 6 – drum, 7 – steam superheater, 8 – economizer, 9 – air preheater, 10 – ash collector, 11 – flue gases fan, 12 – forced-draught fan, 13 – slag collectors, 14 – slag chest, 15 – torch

Снижение теплоты сгорания и соответственное снижение паропроизводительности котлоагрегатов не всегда может быть компенсировано подсветкой факела мазутом или газом. Следствием этого является появление технических ограничений диапазона регулирования мощности ТЭС. Помимо оказываемого влияния на процесс горения угольной пыли в топке снижение теплоты сгорания негативно воздействует на работу СПП, ограничивая ее максимальную производительность по сушке и размолу, что также может снизить максимально возможную паропроизводительность котлов, в результате чего уменьшается возможный диапазон изменения их нагрузки. Обычно при этом не соответствуют расчетным температуры газов в топке и газоходах котлов, не выдерживаются расчетные параметры пара (температура и давление), снижается средняя эксплуатационная нагрузка котлов, и в результате ухудшаются технико-экономические показатели ТЭС: растут потери тепла с механическим недожогом и уходящими газами, увеличивается расход мазута/газа на подсветку факела, снижается коэффициент полезного действия (КПД), увеличиваются удельный расход электроэнергии на собственные нужды и удельные расходы условного топлива на отпуск электрической энергии.

Примечание: основные потери тепла в котле и, следовательно, снижение его КПД происходят с уходящими газами. При сжигании углей с пониженной теплотой сгорания увеличиваются объем и температура отходящих от котла дымовых газов, поэтому даже при отлаженном для использования непроектного угля режиме его горения увеличиваются объем вредных выбросов в атмосферу и экологические платежи.

Снижение теплоты сгорания сопровождается увеличением влажности готовой пыли, ухудшением характеристик ее воспламенения и повышением минимальной паропроизводительности котлов, при которой они могут устойчиво работать без дополнительной подачи мазута или газа для подсветки факела. В этом случае при нагружении котла до номинальных значений паропроизводительности из-за снижения тепла, отдаваемого испарительным (радиационным) поверхностям нагрева, и повышения количества тепла дымовых газов, поступающего на пароперегревательные поверхности (конвективные), может происходить повышение температуры свежего пара котла и пара промежуточного перегрева до предельно допустимых значений, что приводит к ограничению паропроизводительности.

Примечание: тепло в котлах передается излучением (при температурах выше 800°С) или конвекцией (скоростью обдува, при температурах ниже 800°С) в радиационных и конвективных поверхностях нагрева соответственно. Радиационные поверхности нагрева (экраны) располагаются в топочной камере, конвективные – в поворотной камере и газоходе.

При увеличении теплоты сгорания сжигаемого угля происходит в целом обратная ситуация. Возможное в ряде случаев повышение экономичности работы котла из-за снижения температуры и объема дымовых газов не улучшает экономичность работы ТЭС в целом, так как не позволяет поддерживать номинальную температуру пара за котлом, а снижение температуры пара ведет к снижению экономичности работы турбины. Также из-за повышения температур газов в топках и газоходах котлов повышается вероятность увеличения шлакования топок и конвективных поверхностей нагрева котлов.

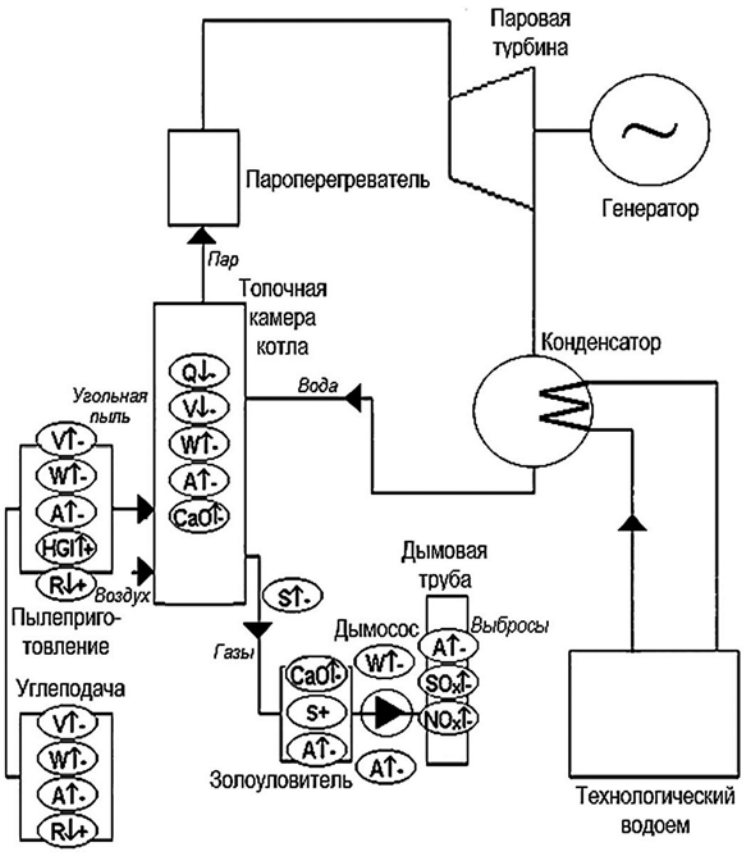

Рис.2. Технологическая схема пылеугольной ТЭС

Fig. 2. A process flow diagram of the pulverized coal-fired thermal power plant

Примечание: шлакованию наиболее подвержены стенка топочной камеры, противоположная месту вдувания пылеугольного топлива (горелкам), конвективные поверхности нагрева в поворотной камере и стенки газохода у входной поверхности экономайзера.

Процессы шлакования особенно опасны для котлов, у которых отсутствуют средства очистки поверхностей нагрева от возможных шлаковых отложений (например, системы гидроочистки зашлакованных поверхностей). В результате шлакования может снижаться нагрузка и даже потребоваться длительные остановы котлов для ручной очистки.

В целом, при снижении теплоты сгорания возникают проблемы с паропроизводительностью котла и повышением температуры свежего пара и пара промперегрева, при повышении – наоборот, котел перестает «вытягивать» номинальную температуру свежего пара и пара промперегрева, а кроме этого, возможно появление шлакования топочных и конвективных поверхностей нагрева.

2. Выход летучих веществ

Второй по важности теплотехнический показатель угля, отражающий его реакционную способность (степень взаимодействия угля с кислородом воздуха), скорость воспламенения, устойчивость горения и склонность к окислению и самовозгоранию, а следовательно, определяющий конструктивные особенности топок и горелок котлов, СПП, а также условия хранения угля на складе и в бункерах [3].

Так, скорость воспламенения угля и устойчивость его горения в топке котла обусловливают необходимость подсветки факела мазутом или газом. А для СПП, предназначенной для размола и сушки исходного угля до подсушенной готовой пыли требуемой тонкости помола, одной из важнейших проблем является обеспечение взрывобезопасности этих процессов. Нормативными документами на ТЭС введен критерий взрываемости K_T, зависящий от комплекса характеристик угля, и прежде всего от выхода летучих веществ [4].

В соответствии с K_T угли подразделяются по возрастанию на четыре группы взрывоопасности, для каждой из которых устанавливаются необходимые на ТЭС средства взрывопредупреждения и взрывозащиты. Например, антрациты с минимальным выходом летучих веществ относятся к первой группе, а бурые канско-ачинские угли соответственно – к третьей.

В целом, при снижении выхода летучих веществ возникает дополнительная потребность в подсветке факела мазутом или газом, а при повышении – возможны проблемы с обеспечением взрывобезопасности систем углеподачи и пылеприготовления ввиду неготовности СПП к работе с углями с повышенным K_T.

3. Общая влага

Состоит из внешней влаги, изменяющейся от влажности и температуры окружающей среды и от условий добычи и транспортировки угля, и внутренней (материнской), постоянной для конкретного угля и удаляемой только при температурах выше 800°С.

Кроме влияния общей влаги на функционирование оборудования ТЭС, опосредованного через теплоту сгорания и, соответственно, рассмотренного выше, изменение данного показателя имеет также ряд прямых последствий.

Увеличение влаги угля приводит прежде всего к ухудшению его сыпучих свойств, затруднениям при разгрузке и прохождении по трактам топливоподачи и СПП, что может потребовать увеличения обслуживающего персонала даже при использовании специальных систем вибро- или пневмообрушения. В зимнее время повышенная влага может усиливать смерзаемость угля, что требует увеличения производительности имеющихся размораживающих устройств, использования их дополнительных мощностей и обслуживающего персонала (в результате возможны сверхнормативные простои железнодорожных вагонов).

Также повышенное содержание влаги может ограничивать сушильную производительность СПП, что приводит к увеличению влажности готовой пыли и, соответственно, снижению надежности и экономичности ее сжигания в котле, а в ряде случаев – и к ухудшению работы бункеров и питателей пыли. При этом значительное по сравнению с проектной уменьшение влаги ведет к повышению температур угольной пыли на выходе из мельниц, что требует специальных мер по обеспечению взрывобезопасной работы СПП.

Кроме этого, увеличение влаги при постоянной тепловой нагрузке котла приводит к росту объемов водяных паров и скоростей дымовых газов в конвективных поверхностях нагрева. В свою очередь, рост объемов водяных паров может ограничивать производительность дымососов и из-за этого паропроизводительность котлов, а рост скоростей дымовых газов, хотя и улучшает теплообмен в конвективных поверхностях нагрева, но в значительно большей степени усиливает их абразивный износ и повышает температуру металла поверхностей нагрева.

Примечание: основное место возникновения абразивного износа (увеличения скоростей дымовых газов и концентрации золы) – внешняя стенка выходной части поворотной камеры (место расположения экономайзера).

4. Зольность

Является неорганической частью угля и состоит из внешней зольности, зависящей от условий добычи и наличия обогащения угля, и внутренней (материнской, прочно связанной с органической частью), от которой при современном уровне развития технологий обогащения избавиться практически невозможно.

По данным ОРГРЭС, каждый процент увеличения зольности сжигаемого угля приводит к снижению КПД на 0,10-0,15%, повышению расхода угля для поддержания заданной мощности на 0,5 г/кВт×ч, расхода электроэнергии на собственные нужды на 0,13% и расхода мазута на 0,15-0,60% на тонну сжигаемого угля.

Кроме влияния зольности на функционирование оборудования ТЭС, опосредованного через теплоту сгорания и, соответственно, рассмотренного выше, изменение данного показателя имеет также ряд прямых последствий.

Увеличение зольности приводит к пропорциональному износу оборудования ТЭС – систем разгрузки и подачи угля, углеразмольного оборудования, прежде всего быстроизнашивающихся элементов мельниц (шаров у шаровых, бил у молотковых, валков у среднеходных мельниц и рабочих лопаток у мельниц-вентиляторов, брони у всех типов мельниц с сепараторами), пылепроводов (особенно их изгибов в СПП), конвективных поверхностей нагрева котлов и лопаток дымососов. С точки зрения абразивного износа наиболее опасно увеличение золы с высоким содержанием ее абразивных составляющих – SiO_2, Fe_2O_3 и CaO + MgO (в виде кварцевого песка, пиритных, колчеданных и гранитных включений).

Также увеличение зольности затрудняет работу золоулавливающих установок и ухудшает экологические показатели ТЭС (платежи за сверхнормативные выбросы золы и за хранение дополнительных объемов золошлаковых отходов (ЗШО)). При этом объем выбросов золы пропорционален ее содержанию в угле с учетом КПД золоулавливающих установок: объем выбросов = зольность × (1 – КПД).

Примечание: основная часть золы (85-95%), образующейся в процессе сжигания угля, уносится газами в газоходы котла и золоуловители, а неуловленная зола – в атмосферу. Остальная часть золы извлекается из нижней части топки в виде шлака. Существуют два основных типа шлакоудаления: сухое (частицы золы в твердом виде скатываются в нижнюю часть топочной камеры – крутонаклонную холодную воронку) и жидкое (частицы золы в жидком виде скапливаются на плоском поду топочной камеры и сливаются через специальную летку). В обоих случаях шлак попадает в водяные ванны и после дробилок в систему гидрозолошлакоудаления. Обычно для накопления и хранения в золошлакоотвалах шлак и уловленная зола транспортируются водой.

5. Содержание серы

Общая сера угля состоит из ее содержания в органической части и в золе. Для ТЭС принципиально важным является содержание органической серы, т.к. этот показатель определяет температуру уходящих газов за воздухоподогревателями котлов и тем самым конструкцию котлов, потому что с увеличением содержания серы возрастает температура начала сернокислотной коррозии (точка росы H_2SO_4) металлических элементов воздухоподогревателей (если температура металла меньше температуры точки росы, то на нем конденсируются пары серной кислоты). В целях предотвращения сернокислотной коррозии необходимо повышать температуру уходящих газов, а поскольку основные потери тепла в котле и, следовательно, снижение его КПД происходят с уходящими газами, данное обстоятельство отрицательно влияет на экономичность работы ТЭС в целом.

Содержание органической серы определяет также количество выбросов вредных оксидов серы (SO_X) в атмосферу, размер экологических платежей, тип и производительность сероулавливающих установок.

Примечание: в технологии циркулирующего кипящего слоя органическая сера угля связывается подаваемым в слой известняком (с образованием гипса).

Кроме отрицательного, содержание серы в угле в определенных количествах может оказывать и положительное влияние, поскольку усиливает электризацию летучих частиц золы некоторых углей в электрофильтрах и способствует улучшению улавливания золы и уменьшению объемов ее выброса в атмосферу.

6. Содержание азота

Частично определяет объем вредных выбросов оксидов азота (NO_X) в атмосферу с уходящими от котла дымовыми газами. Общее количество образовавшихся в котле NO_X можно разделить на две части: образующиеся из азота, содержащегося в угле, и малозависящие от технологии сжигания и образующиеся из азота воздуха и зависящие от максимальных температур, достигаемых в топках котлов, т.е. от технологии сжигания.

Примечание: при нормальных температурах в топочной камере более 1000°С азот и кислород, содержащиеся в воздухе, начинают взаимодействовать с образованием NO_X. Для уменьшения образования NO_X (на 40-60%) существуют технологические схемы (первичные), заключающиеся в снижении максимальной температуры горения: применение низкоэмиссионных горелок, особое (многоярусное) расположение горелок на стенах топочной камеры, растягивающее зону активного горения угля, рециркуляция дымовых газов, низкотемпературное сжигание и др. Возможно также использование вторичных методов снижения концентрации NO_X в дымовых газах – разрушение образовавшихся NO_X с помощью реагентов-восстановителей, в том числе опрыскивание дымовых газов аммиачным раствором.

Если технологические резервы снижения образования в котлах оксидов азота исчерпаны, повышение содержания азота в угле может привести к увеличению сверхнормативных выбросов NO_x и соответствующих штрафов или необходимости сооружения специальных дорогостоящих азотоулавливающих установок.

7. Химический состав золы и содержание кальция

Обычно используется для экспертных оценок свойств золы, и прежде всего ее склонности к шлакованию и образованию твердых отложений на конвективных поверхностях нагрева, а также ее абразивности.

Для отдельных видов углей, например канско-ачинских, вероятность шлакования можно оценить по следующему соотношению (числитель – щелочные/основные составляющие, знаменатель – кислые составляющие): $(CaO + MgO + K_2O + Na_2O + Fe_2O_3) / (SiO_2 + Al_2O_3 + TiO_2)$. Склонность к образованию твердых отложений на конвективных поверхностях нагрева оценивают в том числе по суммам содержания $CaO + MgO$ и $K_2O + Na_2O$.

Наибольшее влияние на шлакующие свойства угля оказывает содержание в золе оксида кальция. Значительное содержание CaO в золе (более 15-20%) обычно приводит к образованию твердых трудноудаляемых отложений на конвективных поверхностях нагрева, что требует внеплановых остановов котлов на расшлаковку (очистку). Кроме этого, соединения CaO с оксидами серы, углерода и железа при их взаимодействии с водой образуют гипсо- и цементоподобные трудноудаляемые отложения, нарушающие работу систем гидрозолошлакоудаления и мокрого золоулавливания, что, в свою очередь, требует увеличения резервирования оборудования этих систем и затрат на ремонт и замену их элементов.

8. Температура плавления золы

Температурные характеристики золы t_A, t_B, t_C (A – начала деформации, B – плавления, C – жидкоплавкого состояния/растекания) являются одними из самых объективных показателей шлакующих и жидкоплавких состояний золы и во многом определяют выбор способа и устройств шлакоудаления и, соответственно, конструкцию топок котлов. При проектных температурах в топочной камере в зависимости от применяемой системы сухого или жидкого шлакоудаления несгоревшие частицы золы для их удаления должны соответственно либо оставаться в твердой фазе, либо перейти в жидкое состояние (расплавиться).

9. Коэффициент размолоспособности

Характеризует способность углей к измельчению (дроблению) и определяет тип, конструкцию и производительность дробилок, мельниц, сепараторов, питателей и другого оборудования СПП. Повышение значения коэффициента размолоспособности соответствует более легкому измельчению угля и, следовательно, сокращению расхода электроэнергии на углеподготовку и пылеприготовление и увеличению срока службы оборудования.

Примечание: значение данного коэффициента может рассчитываться двумя методами с использованием разных аппаратов для размола проб угля – ВТИ (Всесоюзный теплотехнический институт) ($K_{ло}^{ВТИ}$, Gr^{VTI}) и Хардгрова ($K_{ло}^{ХАР}$, HGI), взаимосвязь между которыми устанавливается соответствующими нормативными материалами [5].

10. Гранулометрический состав

Размер кусков угля определяет количество ступеней, тип и производительность дробилок в тракте топливоподачи. Чем крупнее куски угля, тем больше затрат требуется для его измельчения (дробления). Кроме этого, при повышении содержания в поставленном на ТЭС угле крупноразмерных кусков возникает необходимость использования специальных «додрабливающих» механизмов на решетках приемных бункеров.

В завершение рассмотрения основных аспектов влияния изменения теплотехнических характеристик угля на функционирование конкретных узлов и агрегатов ТЭС следует подчеркнуть, что даже обладая аналитическими данными и экспертными оценками о возможности сжигания конкретного непроектного угля на конкретном действующем котельном оборудовании, их необходимо проверять по результатам опытных сжиганий. Для регламентации сжигания на ТЭС непроектных углей в РАО «ЕЭС России» действовали «Методические указания по организации изменения топливного режима в связи с недостатком проектных углей на электростанциях», устанавливавшие единый порядок перевода на сжигание непроектных углей по результатам обязательного опытного сжигания и согласования с угольными компаниями перспектив поставки необходимых объемов угля [6].

Предельно допустимые значения теплотехнических характеристик угля (диапазоны их изменения) в значительной мере определяются резервами производительности и гибкостью используемого энергетического оборудования, которые предусматриваются на этапе проектирования ТЭС.

Также крайне важно отметить, что усреднение теплотехнических характеристик (формирование однородности) за счет смешения разных углей возможно в основном только по следующим показателям: влаге и зольности, а соответственно, и теплоте сгорания, содержанию серы и азота. При этом расчетные массовые/объемные доли компонентов смеси определяются требуемым значением конкретного теплотехнического показателя как средневзвешенной величины.

Практически все остальные теплотехнические характеристики угля не могут быть усреднены прежде всего потому, что в смеси они не обладают аддитивными свойствами. Это относится, в частности, к следующим показателям:

1) выходу летучих веществ (реакционной способности);

2) критерию взрываемости (независимо от доли в смеси, наиболее взрывоопасный уголь определяет необходимый набор мероприятий и защит по обеспечению взрывобезопасности эксплуатации систем пылеприготовления и топливоподачи);

3) содержанию в химическом составе золы оксидов CaO, MgO, K_2O и Na_2O, определяющих склонность к шлакованию и образованию твердых отложений на конвективных поверхностях нагрева (неорганические части компонентов смеси проявляются в котлоагрегате абсолютно независимо, как будто каждый из них сжигается в «чистом» виде, даже при небольшой добавке в смесь сильношлакующего угля склонность смеси к шлакованию существенно возрас-

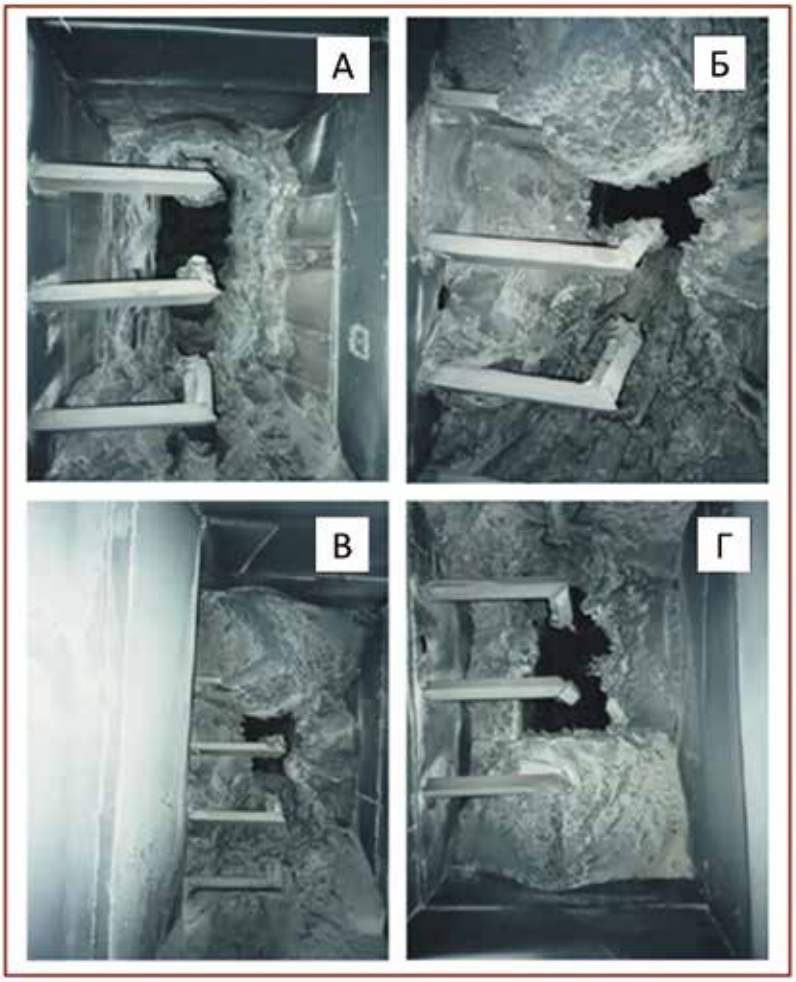

Рис. 3. Отложения золы в трубах Вентури скрубберов А, Б, В и Г котлоагрегата ст. № 1 Благовещенской ТЭЦ (21.03.2001)

Fig. 3. Ash deposits in the Venturi pipes of A, B, C and D scrubbers of boiler unit No. 1 at the Blagoveshchenskaya Combined Heat and Power Plant (March 21, 2001)

тает, а оценить вероятность возникновения или усиления шлакования в случае сжигания угольной смеси крайне сложно);

4) температуре плавления золы (температура начала шлакования смеси резко уменьшается даже при небольшой доле угля с низким значением данного показателя, в топочной камере частицы золы одних компонентов смеси переходят в жидкоплавкое состояние, а других – остаются в твердой фазе);

5) коэффициенту размолоспособности (независимо от доли в смеси, наиболее устойчивый к размолу (измельчению) уголь определяет выбор размольных устройств, либо необходимо применение их разных типов для разных компонентов смеси).

Таким образом, становится понятно, почему в большинстве случаев более корректно использование термина «угольное сочетание», а не «угольная смесь».

Следует подчеркнуть, что сжигание угольных сочетаний, как и попеременное сжигание углей с различными теплотехническими характеристиками, приводит к снижению надежности и экономичности функционирования котлов за счет нарушений стабильности и оптимальности работы отдельных узлов и котлов в целом.

Для наглядности всего вышеизложенного можно вспомнить, например, как вынужденное сжигание на ТЭЦ Хабаровскэнерго в 1982-1983 гг. значительных объемов «хороших/качественных» каменных углей, вызванное дефицитом проектных бурых углей, привело к аварийным остановам, в частности на Хабаровской ТЭЦ-1 шести из шестнадцати котлоагрегатов, нарушению температурных графиков тепловых сетей и серьезному снижению температуры в жилых и общественных помещениях в зимние периоды. Последствия этих нарушений преодолевались в течение нескольких лет.

А в результате дефицита проектного бурого угля 2Б Ерковецкого месторождения на Благовещенской ТЭЦ в 2001 г. было вынужденно сожжено 3500 т (всего один маршрут) бурого угля 2Б Березовского месторождения Канско-Ачинского бассейна. Почти все теплотехнические характеристики березовского угля лучше по сравнению с ерковецким, кроме входящих в химический состав золы оксидов кальция, содержание которых у березовского угля в два раза выше. Последствия этого «эксперимента» можно увидеть на фотографиях системы мокрого золоулавливания (*рис. 3*) [7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принципиально важно, что проектные показатели эффективности и безопасности производства энергии на ТЭС достигаются только при сжигании проектного угля (с проектными теплотехническими характеристиками). Ошибочным является мнение о том, что сжигание непроектного угля с более высокими (по сравнению с проектными) качественными параметрами может обеспечить улучшение технико-экономических показателей ТЭС. Наоборот, сжигание подобного угля без проведения соответствующих (зачастую масштабных) реконструктивных и наладочных работ ведет к ухудшению технико-экономических показателей, к возможным повреждениям оборудования и авариям.

Для котельных агрегатов российских ТЭС, включая основное и вспомогательное оборудование, «качественным» является только тот уголь, на сжигание которого они запроектированы, имея в виду полный перечень теплотехнических характеристик, а не только теплоту сгорания, влагу и зольность.

Пылеугольная технология с факельным сжиганием, ставшая для советской (а затем и российской) энергетики традиционной, не относится к так называемым «всеядным». При этом ряд новых чистых технологий сжигания угля, в частности в циркулирующем кипящем слое (ЦКС),

позволяет эффективно использовать угольное топливо с достаточно широким диапазоном изменения его теплотехнических характеристик [8]. Более того, ведущими экспертами российского угольного сообщества уже сделан запрос к угольной генерации на внедрение новых угольных котлов «на базе эффективных и экологически чистых технологий генерации» для обеспечения роста внутреннего спроса на уголь в целях устойчивого развития угольной отрасли [9].

В завершение остается только упомянуть, что проектирование ТЭС России на сжигание проектных углей и, следовательно, их крайне ограниченные технологические возможности по сжиганию непроектных углей (т.е. ограниченная взаимозаменяемость углей (как товаров)) делают угольные компании фактически технологическими монополистами, а в условиях монополизма и, соответственно, отсутствия конкуренции ценообразование на товар имеет нерыночный (квазирыночный) и небиржевой характер. Без преодоления технологического монополизма поставщиков угля, обусловленного жесткой привязкой котельного оборудования к проектным углям, любая деятельность в продвижении дополнительных торговых инструментов, например внебиржевых ценовых индексов и биржевой торговли, представляется преждевременной и малоэффективной, несмотря на активно проводимую на СПбМТСБ работу [10].

Развитие конкурентных основ в углеобеспечении ТЭС возможно только в результате создания в России новой угольной генерации – на базе котлоагрегатов с новыми чистыми технологиями сжигания (например, с ЦКС) или котлоагрегатов, изначально запроектированных на сжигание стандартизированных углей (со стандартизированными теплотехническими характеристиками) [11].

С экономической точки зрения понятие «российский угольный рынок» для ТЭС в настоящее время является абстракцией, поскольку в действительности он представляет собой сегментированную по отдельным ТЭС сферу обращения угля в условиях технологического монополизма поставщиков с нерегулируемым ценообразованием.

Список литературы • References

1. Казаков С.А., Бортневский А.В., Петелин С.А. Имитационная модель электростанции – инструмент подбора оптимальной топливной смеси // Уголь. 2010;(10):44-47. https://ugolinfo.ru/Free/102010.pdf.
   Kazakov S.A., Bortnevsky A.V., Petelin S.A. Imitating model of power station – the tool of selection of an optimum fuel mix. *Ugol'*. 2010;(10):44-47. (In Russ.). https://ugolinfo.ru/Free/102010.pdf.
2. Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е издание, переработанное и дополненное. Спб.: ЦКТИ. 1998.
3. РД 34.44.101-96. Типовая инструкция по хранению углей, горючих сланцев и фрезерного торфа на открытых складах электростанций. М.: ОРГРЭС. 1997.
4. РД 153-34.1-03.352-99. Правила взрывобезопасности топливоподачи и установок для приготовления и сжигания пылевидного топлива. М.: РАО «ЕЭС России». 2000.
5. Расчет и проектирование пылеприготовительных установок котельных агрегатов (нормативные материалы). Л.: ЦКТИ. 1971.
6. РД 153-34.1-44.302-2001. Методические указания по организации изменения топливного режима в связи с недостатком проектных углей на электростанциях РАО «ЕЭС России». М.: ОРГРЭС. 2001.
7. Штегман А.В., Алешинский Р.Е. Актуальные проблемы конкуренции на топливных рынках и их влияние на топливообеспечение тепловых электростанций России // Энергетик. 2026;(1).
   Shtegman A.V., Aleshinsky R.E. Actual problems of the competition in the fuel markets and their impact on the fuel supply of thermal power plants in Russia. *Energetik*. 2026;(1). (In Russ.).
8. Современное состояние и развитие технологии циркулирующего кипящего слоя в энергетике и ее применение для снижения выбросов парниковых газов / Г.А. Рябов, О.М. Фоломеев, Д.А. Санкин и др. / В сб. докл. «Горение твердого топлива» VIII Всероссийской конф. Новосибирск: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. 2012.
9. Малышев Ю., Ковальчук А., Рожков А. Угольная отрасль: поиск ориентиров в эпоху перемен // Энергетическая политика. 2021;(2).
   Malyshev Yu., Kovalchuk A., Rozhkov A. The coal industry: finding landmarks in an era of change // Energy Strategy. 2021;(2). (In Russ.).
10. Артемьев И. Вывод на биржу новых товаров дает государству и бизнесу понимание о справедливой цене // Энергетическая политика. 2026;(2).
    Artemyev I. Bringing new goods to the stock exchange gives the government and business an understanding of a fair price. *Energy Strategy*. 2026;(2). (In Russ.).
11. Алешинский Р.Е. Актуальность создания нового российского угольного котлоагрегата // Энергетик. 2024;(1).
    Aleshinsky R.E. The relevance of the creation of a new Russian coal-fired boiler unit. *Energetik*. 2024;(1). (In Russ.).

Authors Information

Veksler F.M. – Senior Brigade Engineer, ORGRES JSC, Moscow, 107023, Russian Federation, e-mail: Aleshinskiy@rosenergo.gov.ru

Aleshinsky R.E. – Doctor Economic Sciences, Deputy Head of Department, Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 127083, Russian Federation, e-mail: Aleshinskiy@rosenergo.gov.ru

Vasilyev S.V. – Head of Division, Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of Russia, Moscow, 127083, Russian Federation, e-mail: Vasilev@rosenergo.gov.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию: 16.07.2026
Поступила после рецензирования: 17.09.2026
Принята к публикации: 30.09.2026

Paper info

Received July 16, 2026
Reviewed September 17, 2026
Accepted September 30, 2026