

СНИЖЕНИЕ УРОВНЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ В АТМОСФЕРУ ОТ КОТЛОВ НА ОРГАНИЧЕСКОМ ТОПЛИВЕ ПУТЕМ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ДУТЬЕВОГО ВОЗДУХА

На сегодняшний день в мировой энергетике основным направлением является замещение углеводного топлива, особенно угля, возобновляемыми источниками энергии. Евросоюз запланировал полный отказ от использования углеводородов к 2050 году [1]. Однако разразившийся в 2021 году и продолжающий развиваться в текущем году энергетический кризис в Европе, обусловленный поспешным использованием ветроэнергетики взамен угольных электростанций, заставил внимательно отнестись к поискам резервов повышения экологических характеристик электрогенерирующих и теплогенерирующих установок.

Среди других возможных методов повышения экологичности подобных установок очень перспективным выглядит модернизация дутьевого воздуха путем обогащения его кислородом. Сам метод изобретён более ста лет назад [2]. Однако в энергетике он не использовался, поскольку кислород получали методом криогенного разделения воздуха, стоимость которого не позволяла получить в энергетике приемлемые экологические показатели, но в последнее десятилетие появились и доведены до приемлемого использования два новых метода получения кислорода – адсорбционного и мембранного разделения газовых смесей, в том числе воздуха и продуктов сгорания углеводородов [3]. Особенно перспективным выглядит последний метод, поскольку этот метод находится ещё в начале жизненного цикла и постоянно совершенствуется и соответственно удешевляется, хотя чистота получаемого этим методом кислорода не достигает того уровня, который достигается при использовании криогенного метода.

Исследования в направлении обогащения дутьевого воздуха кислородом активно ведутся в странах, в которых основным видом топлива является имеющийся на их территории уголь низкого качества [4]. При этом в этих странах разрабатывается технология, при которой в качестве окислителя используется искусственная смесь кислорода и двуокиси углерода [4]. Однако, для использования этого метода нужно новое оборудование с углубленной очисткой продуктов сгорания, что требует больших капитальных вложений. Учитывая, что мировая экономика будет двигаться в сторону водородной энергетики

с получением водорода с использованием электроэнергии полученной, либо на атомных электростанциях, либо на солнечных установках имеет смысл модернизировать имеющиеся теплоэнергетические системы, включив в состав мембранные установки для получения кислорода. При этом предварительные оценки эффективности метода показывают, что он эффективен при использовании как природного газа, так и угля. В энергетике Украины преобладает уголь в качестве топлива для ТЭС и ряда ТЭЦ. В связи с низким качеством угля экологические показатели их работы далеки от желаемых и требуемых европейскими стандартами. Для оценки перспективности обогащения кислородом дутьевого воздуха энергетических угольных котлов было проведено расчетное исследование характеристик котлов типа ТП-100, распространенного на ТЭС Украины. Расчеты проведены с использованием нормативного метода. Для расчета были приняты следующие исходные данные и сделан ряд допущений: дутьевой воздух не подогревается $t^n = 20^\circ\text{C}$.

Теплопотери от химической и механической неполноты сгорания (q_3, q_4) и потери тепла от внешнего охлаждения (q_5) определяются справочными данными, приведенными в нормативном методе: $q_3 = 0\%$, $q_4 = 4\%$; $q_5 = 0,26\%$.

Поскольку мы приняли потери q_3 как отсутствующее, то избыток воздуха $\alpha = 1$.

Таблица – Элементный состав угля, используемого в расчете

| $C^p, \%$ | $H^p, \%$ | $N^p, \%$ | $O^p, \%$ | $S^p_k, \%$ | $S^p_{op}, \%$ | $A^p, \%$ | $W^p, \%$ | $\Sigma, \%$ | $Q^p_n, \text{ ккал/кг}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|----------------|-----------|-----------|--------------|--------------------------|
| 57,64 | 4,58 | 0,72 | 6,87 | 1,25 | 0,77 | 18,07 | 10,1 | 100 | 5324 |

Тепловой расчет показал, что при повышении концентрации кислорода в воздухе происходит увеличение объёмных долей и, соответственно, парциальное давление трёхатомных газов и водяного пара в уходящих газах, из-за снижения парциального давления азота при постоянном давлении выходных газов.

По мере снижения температуры, объёма и энтальпии дымовых газов снижает расход теплоты с уходящими газами q_2 . Со снижением теплопотерь q_2 повышается КПД котла. Положительный эффект наблюдается во всем диапазоне повышенной концентрации O_2 , но экспоненциальное уменьшение объёма азота при постоянном объёме кислорода вызывает неравномерный рост КПД котла. Так с увеличением содержания кислорода до 22%, КПД увеличивается на 0,019 %, 22–23% – на 0,017% с последующей экспонентой.

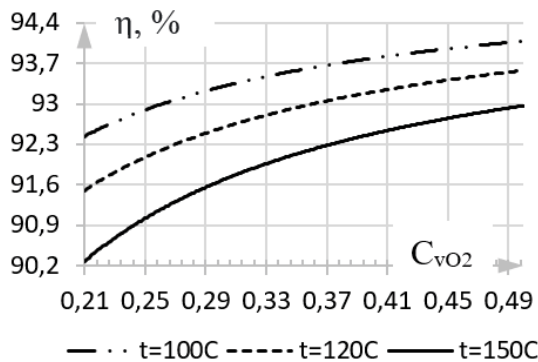


Рисунок 1 – Зависимость КПД котла от концентрации кислорода в дутьевом воздухе

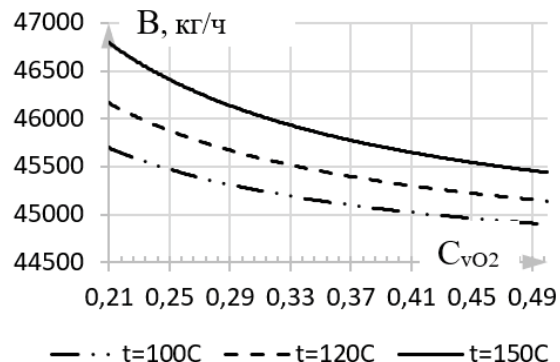


Рисунок 2 – Зависимость расхода топлива от концентрации кислорода в дутьевом воздухе

Наиболее заметный рост эффективности, который можно увидеть из графика зависимости КПД от концентрации кислорода, встречается в диапазоне 21–30% концентрации кислорода в дутьевом воздухе, в дальнейшем повышение КПД значительно снижается.

Теоретический анализ процесса сжигания углерода показал, что процесс проходит в несколько этапов, которые можно описать следующим образом: прогрев частиц пыли, выход летучих веществ, воспламенение летучих веществ и их сгорание, сжигание углерода. Сегодня каждый из этих этапов разделяется на более мелкие ступени и их количество может достигать до 11. Но нас в первую очередь интересует стадия воспламенения и горения летучих веществ. Чем раньше пройдет воспламенение летучих, тем больше времени останется у частиц угольной пыли, чтобы сжечь содержащийся в них углерод во время пребывания в топке. Потому что для сжигания углерода требуется высокая температура, которая имеет место только в топке. Задержка воспламенения летучих зависит от скорости диффузии кислорода к частице пыли через балласт в подаваемом воздухе – азот. Чем ниже содержание азота, тем быстрее происходит воспламенение летучих, что приводит к увеличению глубины выгорания углерода. В результате, за счет обогащения кислородом дутьевого воздуха, мы можем снизить потери со шлаками q_6 и механической неполнотой сгорания q_4 в тепловом балансе, благодаря этому еще больше поднять эффективность.

Обогащение дутьевого воздуха кислородом приводит к ряду изменений в работе теплогенерирующих устройств, в частности, парогенераторов на твердом топливе.

Изменяется состав среды топки и ее теплофизические характеристики, а также количество дымовых газов нагрев поверхностями экрана топки и падение температуры дымовых газов на выходе из топки.

Уменьшение количества дымовых газов приводит к уменьшению их скорости в конвективных поверхностях, что уменьшает долю конвективного теплообмена в общем теплообмене в воздухонагревателе и экономайзере. При этом температура на выходе из котла должна была быть, на более-менее постоянном уровне, но увеличение степени черноты дымовых газов из-за возрастания объёмной доли трёхатомных газов и водяного пара всё-таки приводят к ее уменьшению на выходе из котла.

Обогащение кислородом вдуваемого воздуха позволяет значительно уменьшить избыток воздуха (возможно, даже отказаться от него).

Уменьшение количества азота приводит к уменьшению энтальпии дымовых газов на выходе из котла.

Все эти факторы однозначно приводят к значительному снижению потерь q_2 с дымовыми газами в тепловом балансе котла, и снижению расхода топлива с 45700 кг/ч при не обогащенном топливе до 44900 кг/ч при обогащении кислородом дутьевого воздуха до 50%.

Есть еще некоторые моменты, которые не учитываются в общем анализе. Это очевидное снижение потребления электроэнергии на привод тягодутьевых машин, связанное с уменьшением объема вдуваемого воздуха и дымовых газов, а также на привод угольных мельниц и систем подачи угольной пыли в котельную печь за счет снижения расхода топлива.

В целом можно сказать, что кислородное обогащение дутьевого воздуха является перспективным методом повышения энергоэффективности твердотопливных теплогенерирующих установок, которые находятся в эксплуатации в настоящее время без существенных изменений в конструкции котлов.

Экономический эффект в пылеугольных котлах также достигается за счёт снижения расхода природного газа на подсветку факела.

ЛИТЕРАТУРА

1. 2050 Long-Term Strategy | Climate Action.
2. Яковлев В. Б. К истории бессемерования штейнов // Вопросы истории естествознания и техники. — 1957. — № 3.
3. M.W. Ackley Medical Oxygen Concentrators: a Review of Progress in Air Separation Technology Springer US (2019).
4. H. Stadler, F. Beggel, M. Habermehl, B. Persigehl, R. Kneer, M. Modigell, P. Jeschke Oxyfuel coal combustion by efficient integration of oxygen transport membranes Int. J. Greenh. Gas Control, 5 (2011).