

*к. т. н., доц. Алексеев В.П.,
ассистент Алексеева
М.В.
(ДонГТУ, г. Алчевск,
Украина)*

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛА КОНВЕРТЕРНЫХ ГАЗОВ ЗА КИСЛОРОДНЫМИ КОНВЕРТЕРАМИ

Наведені результати аналізу енергетичної ефективності систем використання тепла конвертерних газів (СВТКГ), які реалізовані за кисневими конвертерами, а також нових технічних рішень по ефективному використуванню тепла конвертерних газів, що розташовується, забезпечуючи високі енергоекономічні показники.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.

Черная металлургия является одной из наиболее энергоемких отраслей промышленного производства, потребляющая около 17 % топлива и электрической энергии от общего количества. Технологические процессы этой отрасли характеризуются низкими показателями использования топлива основными его потребителями – металлургическими печами. При этом значительная часть энергии топлива, которая не используется в технологическом процессе, может быть использована в виде вторичных энергоресурсов (ВЭР). Их выход эквивалентен 50 млн. т. условного топлива в год [1]. Задача максимального использования ВЭР имеет не только экономическое значение, так как снижение расхода топлива, обеспечиваемое за счет использования ВЭР, уменьшает вредные выбросы и снижает загрязнение окружающей среды. С целью снижения удельных затрат топлива и электроэнергии необходимо наряду с усовершенствованием технологических процессов в теплотехнологических агрегатах всемерно использовать ВЭР.

Технический прогресс в сталеплавильном производстве за последние десятилетия характеризуется развитием кислородно – конвертерного производства стали. Благодаря целому ряду как технологических, так и энергетических преимуществ кислородно – конвертерное производство стали вытесняет традиционный

мартеновский процесс. В конвертерном производстве стали (при продувке конвертера кислородом) образуются горючие ВЭР (конвертерные газы). Количество конвертерных газов, выходящих из горловины конвертера, составляет 60 – 80 м³ на 1 т садки, температура газов в среднем 1600 °С [2]. Особенности кислородно – конвертерного производства (ККП) стали – цикличность процесса, переменный расход и состав конвертерных газов в течение продувки кислородом, запыленность их мелкодисперсным уносом создают значительные трудности при использовании тепла этих газов. Располагаемое тепло (химическое и физическое) конвертерных газов на выходе из горловины конвертера достигает до 14000 кДж/м³, теплота сгорания составляет 10000 – 11500 кДж/м³. Конвертерный газ состоит из оксида углерода СО до 90 % и диоксида углерода СО₂ до 10 % и в незначительном количестве (по 1 %), N₂, Н₂ и О₂. Газовая смесь, содержащая более 12,5% СО при концентрации кислорода более 5 % становится взрывоопасной. Конвертерный газ – высококачественное технологическое и энергетическое топливо. Его технологическая ценность определяется высоким содержанием СО, что дает возможность использовать его в качестве восстановительного газа, а энергетическая ценность – высокой теплотой сгорания и относительно небольшим количеством продуктов сгорания на единицу получаемой теплоты, что обеспечивает высокий К.И.Т. При выборе способа отвода и использования конвертерных газов необходимо учитывать эти особенности. Разработка эффективных систем использования тепла конвертерных газов (СИТКГ) является актуальной народно-хозяйственной задачей, но специфика ККП стали выдвигает ряд технических проблем, которые необходимо решать.

Анализ исследований и публикаций. Анализ отечественных и зарубежных исследований и разработок показывает, что в настоящее время предложены и реализованы различные способы отвода, охлаждения и использования тепла конвертерных газов. За время освоения ККП стали наметилось три основных способа, отвода и использования тепла конвертерных газов для энергетических нужд (использование конвертерного газа для технологических целей в данной работе не рассматриваются): 1) дожигание конвертерных газов, выходящих из горловины конвертера, за счет подсоса воздуха и разбавление продуктов сгорания воздухом до температуры, необходимой перед газоочисткой по условиям нормальной её эксплуатации; 2) дожигание конвертерных газов и охлаждение продуктов сгорания в охладителях конвертерных газов (ОКГ) перед подачей в газоочистку; 3) отвод конвертерных газов из горловины

конвертера «без дожигания» и охлаждением в радиационном ОКГ. При этом конвертерный газ после газоочистки можно использовать в качестве топлива в других теплотехнологических установках. Первый способ был применен в Канаде и получил распространение в США. Эти установки, как правило, работают без утилизации тепла и характеризуются большим расходом электроэнергии на привод дымососов и не характерны для нашей страны, также Европы и Японии. Этот способ частично может быть оправдан при низкой стоимости электроэнергии. С увеличением емкости конвертеров и интенсивности продувки кислородом применение этих установок нерационально, вследствие их неэкономичности (очистка больших объемов продуктов сгорания конвертерного газа). Второй способ был применен в Австрии и получил распространение в странах СНГ и Европе. В установках, работающих по второму способу, продукты сгорания охлаждаются в радиационно – конвективном ОКГ и поступают в газоочистку для очистки от уноса. С точки зрения энергетических затрат и общего баланса энергии эти установки явились шагом вперед по сравнению с первым способом.

ОКГ с утилизацией тепла представляют собой радиационно – конвективные (с охлаждением газов до 300 °С) и радиационные (с охлаждением газов до 1000 – 1100 °С). С увеличением емкости конвертера и интенсификации технологического процесса экономичность радиационно – конвективных ОКГ снижается и рекомендуется применять ОКГ радиационного типа, созданные без конвективной части. Но отказ от конвективной части приводит к увеличению в несколько раз мощности оборотных циклов воды системы газоочистки, что снижает экономичность установки. Системы с радиационно – конвективными ОКГ, работающие с полным дожиганием газов перед газоочисткой, вырабатывают переменное количество насыщенного пара только в период продувки конвертера кислородом. Для непрерывного отпуска пара потребителям используют паровые аккумуляторы. От аккумуляторов насыщенный пар низкого давления используется в системах теплоснабжения и для производственных нужд. С целью выработки пара и в межпродувочный период в некоторых установках осуществляется сжигание топлива в ОКГ, подаваемого от других источников, например, коксодоменную смесь. Тепловая мощность подтопочных горелок при этом выбирается из расчета обеспечения паропроизводительности ОКГ в режиме подтопки равной 30 % от максимальной его паропроизводительности в режиме продувки. При установке автономного пароперегревателя с подводом внешнего топлива установка может вырабатывать перегретый

пар, который может быть использован для выработки электроэнергии. Необходимо отметить, что тепловая мощность ОКГ выбирается из условия максимального тепловыделения из конвертера, что определяет низкий коэффициент использования установленного основного и вспомогательного оборудования. На основе анализа работы СИТКГ, работающих с полным дожиганием конвертерных газов в радиационно – конвективных ОКГ можно заключить, что эти системы имеют ряд серьезных недостатков и имеют низкую энергетическую эффективность. Кроме того высокая степень запыленности конвертерных газов снижает надежность работы конвективных поверхностей нагрева. Применение таких систем оказалось нецелесообразным для конвертеров большой емкости, вследствие усложнения систем газоочистки (как по экономическим, так и техническим причинам).

Для конвертерных цехов конвертерами емкостью 300 т и более применение систем с дожиганием газов перед газоочисткой оказалось неэкономичным. В связи с этим были разработаны и осуществлены системы газоотводящего тракта «без дожигания». В этих системах происходит частичное сжигание конвертерного газа ($\alpha = 0,1 - 0,15$) за счет присоса воздуха через неплотности соединений между горловиной конвертера и газоотводящего тракта и охлаждение газов до 1000 – 1100 °С в радиационном ОКГ, расположенного перед газоочисткой. При этом значительно уменьшается объем очищаемых газов, что упрощает систему газоочистки и уменьшает расход воды в её обратном цикле. Сущность работы этих СИТКГ сводится к тому, что в одних установках конвертерные газы охлаждаются в радиационном ОКГ до температуры 1000 – 1100 °С, при этом часть физического и химического тепла используется для выработки насыщенного пара. Затем после газоочистки конвертерные газы направляются в газгольдер и используются в качестве топлива (например, Япония). В других системах после газоочистки газы сжигаются на «свече» (например, страны СНГ и Европы). Основной проблемой при отводе конвертерных газов «без дожигания» является герметизация горловины конвертера, чтобы исключить подсос воздуха в газоотводящий тракт. Предложены различные способы: горловина конвертера во время продувки закрывается специальным устройством; подсос воздуха исключается поддержанием «нулевого давления» над горловиной конвертера; уплотнения зазора путем подачи пара или азота. Но абсолютной герметизации достичь сложно, поэтому такие установки фактически работают с частичным дожиганием при коэффициенте расхода воздуха $\alpha = 0,1 \div 0,15$.

В установке с газгольдером, в которой частично используется физическое и химическое тепло конвертерных газов в радиационном ОКГ, газы после газоочистки направляются в газгольдер с последующим использованием их в качестве топлива. Эта установка имеет ряд существенных недостатков: в газгольдер направляются газы с содержанием $\text{CO} \geq 60\%$ и около 30 % газов сжигается на «свече»; трудности в уплотнении горловины конвертера, герметизации газоотводящего тракта и т.д. Взрывоопасность, необходимость сооружения компрессорной станции и газгольдеров большого объема на территории завода снижает надежность работы СИТКГ, а неиспользование части тепла газов с содержанием $\text{CO} < 60\%$ – энергоэкономическую эффективность такой системы. Коэффициент энергетической эффективности такой системы не превышает 50 %. Установка, в которой конвертерные газы после газоочистки сжигаются на «свече», имеет низкую энергетическую эффективность, поскольку 80 % располагаемого тепла не используется (только 20 % используется в радиационном ОКГ). Коэффициент энергетической эффективности не превышает 10 %. При этом имеет место значительное загрязнение окружающей среды вредными выбросами CO , NO_x и инертными газами высокой температуры.

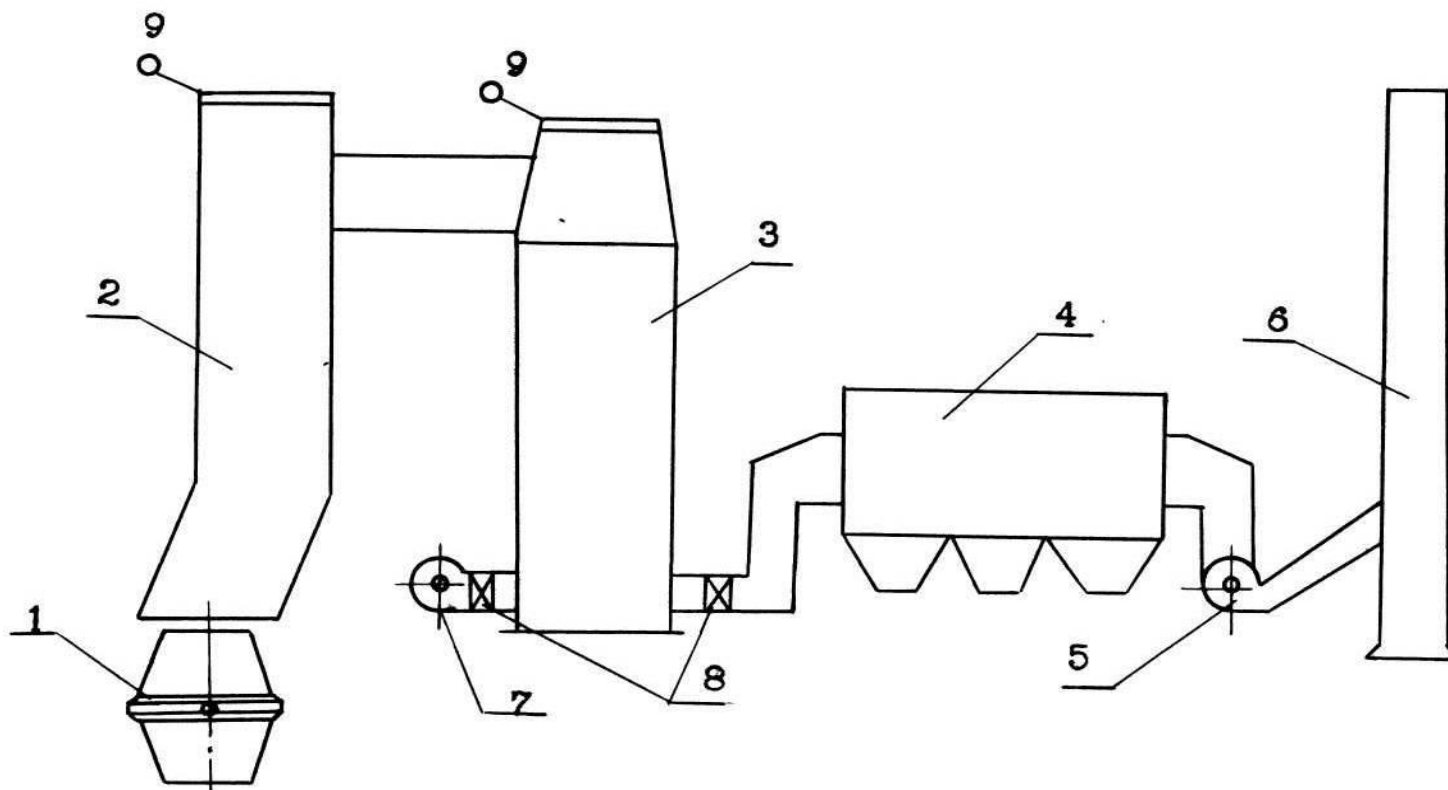
В настоящее время известно несколько схем с применением регенеративных насадок в газоотводящих трактах кислородных конвертеров. В одной из схем ОКГ снимается с основной магистрали отходящих газов и заменяется регенератором с кирпичной насадкой. ОКГ располагается при этом в стороне от магистрали газоотводящего тракта параллельно с регенератором [3]. Сущность работы такой установки состоит в следующем: отходящие газы после охлаждения в радиационном камине поступают в регенератор, охлаждаются до температуры необходимой перед газоочисткой. ОКГ при этом работает на подтопке. В межпродувочный период аккумулированное тепло из регенератора при рециркуляции газа передается ОКГ и за счет этого сокращается расход топлива на подтопку. При остановке ОКГ (выходе его из строя) регенератор охлаждается в межпродувочный период холодным воздухом, который выбрасывается в атмосферу. Эта СИТКГ имеет ряд серьезных недостатков: регенератор установлен перед газоочисткой, следовательно, работает на газах с высокой степенью запыленности имеет низкий срок службы, имеет значительные габариты, так как в зависимости от типа газоочистки температура газов за регенератором должна быть минимальной. Известна установка с применением теплового аккумулятора типа доменного воздухонагревателя, который фактически играет роль охладителя газов

и работает без утилизации тепла конвертерных газов [4]. Схема такой установки приведена на рисунке 1. Тепловой аккумулятор в периоды между продувками продувается воздухом и горячий воздух затем выбрасывается в атмосферу. Энергетическая эффективность таких установок низкая, поскольку теплота конвертерных газов не используется, небольшой срок службы. Таким образом анализ энергетической эффективности существующих СИТКГ показывает, что они имеют низкие энергетические показатели и существенно загрязняют окружающую среду вредными выбросами в виде CO , NO_x и инертными газами. Необходима разработка новых технических решений по эффективному использованию располагаемого тепла конвертерных газов, что позволит значительно сократить расход энергоресурсов, прежде всего топлива. В связи с этим большой интерес представляет СИТКГ с тепловым аккумулятором, предложенная и разработанная МЭИ (Москва).

Постановка задачи. Исследовать энергетическую эффективность СИТКГ с тепловым аккумулятором, которая обеспечивает непрерывную выработку пара энергетических параметров при циклической работе сталеплавильного конвертера.

Изложение материала и его результаты. Принципиальная схема одного из возможных вариантов СИТКГ с тепловым аккумулятором для выработки пара энергетических параметров приведена на рисунке 2 [5]. После охлаждения в радиационном ОКГ до температуры $1000 - 1100$ °С и очистки от уносов в газоочистке, конвертерные газы поступают в камеру сгорания 1, в которую подается подогретый воздух из воздухоподогревателя 6, необходимый для сжигания. Далее продукты сгорания конвертерного газа из камеры сгорания направляются в тепловой аккумулятор (ТА), состоящий из двух секций 2 и 4, и выполненный из огнеупорного кирпича. После ТА часть продуктов сгорания (основная часть) направляется в конвективный котел 5, где тепло их используется для выработки пара энергетических параметров, остальная часть направляется в воздухоподогреватель 6, где подогревается воздух, необходимый для сжигания конвертерного газа. Продукты сгорания после котла и воздухоподогревателя с помощью дымососов 7 и 8 выбрасываются через дымовую трубу 9 в атмосферу. В периоды между продувками конвертера в качестве теплоносителя для котла используется воздух. При этом последний подается в тепловой аккумулятор вентилятором 10 в противоточном направлении, где подогревается до необходимой температуры за счет тепла аккумулялированного огнеупорной насадкой ТА в период продувки, и

направляется в котел 5. Таким образом обеспечивается непрерывное поступление греющего теплоносителя в



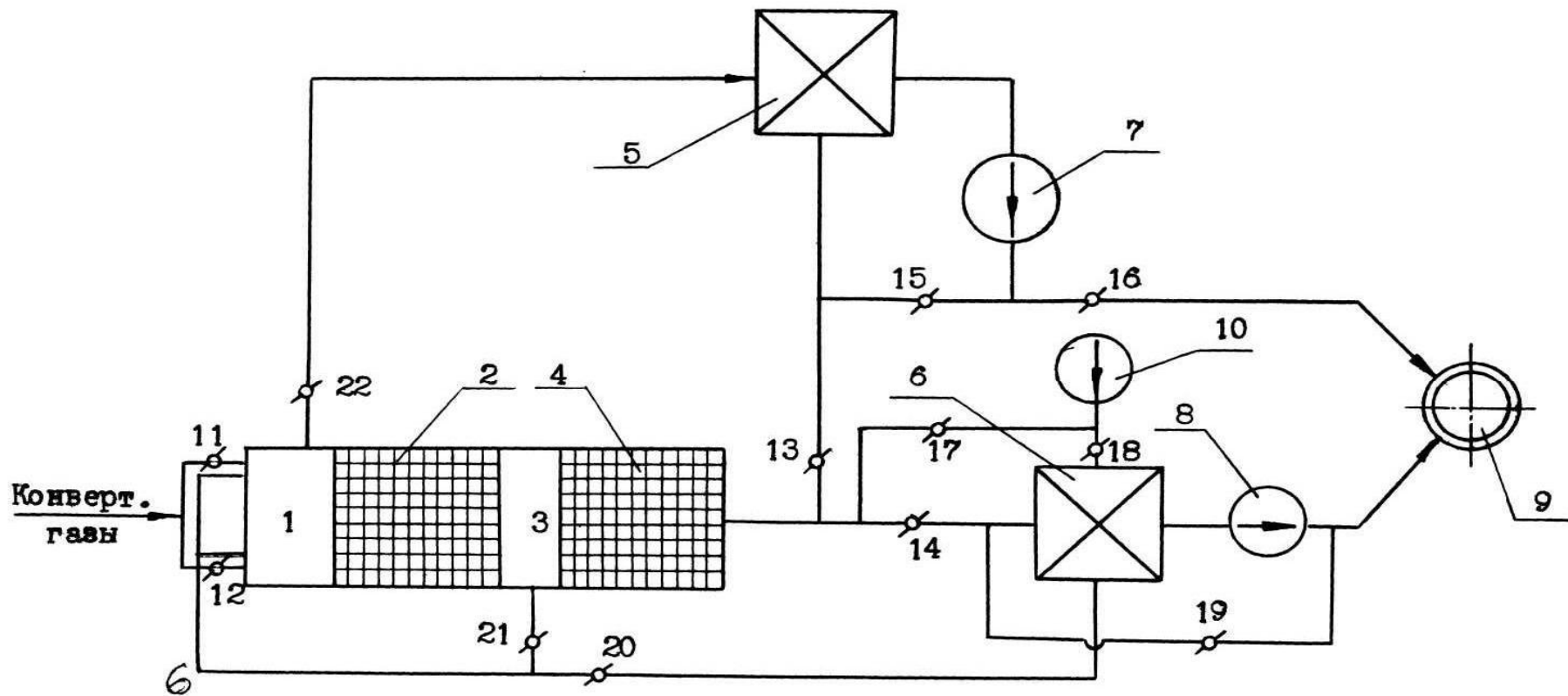
1 – конвертер; 2 – радиационный охладитель; 3 – аккумулятор тепла; 4 – газоочистка (фильтр); 5 – дымосос; 6 – дымовая труба; 7 – вентилятор; 8 – шибер; 9 – сбросной клапан.

Рисунок 1 – Схема газоотводящего тракта с аккумулятором тепла

котел в течение всего цикла работы конвертера и осуществляется непрерывный процесс выработки пара заданных параметров. Котел при этом работает на очищенных продуктах сгорания в период продувки (или на воздухе в межпродувочный период), что исключает загрязнение поверхностей нагрева ТА и котла уносом и повышает эффективность их работы.

В рассмотренной СИТКГ котел работает на разных теплоносителях (продукты сгорания + воздух), что не обеспечивает равномерную нагрузку котла в течение всего цикла работы конвертера при постоянном расходе и температуре теплоносителей, что является одним из недостатков этой установки. Этот недостаток можно избежать, используя замкнутую систему теплоиспользования. Сущность работы установки в период продувки конвертера аналогична с работой установки с разомкнутой системой теплоиспользования (см. рис. 2). В межпродувочный период осуществляется замкнутая циркуляция продуктов сгорания (вместо воздуха) с помощью дымососа 7. Преимуществом установки является возможность обеспечения работы котла на одном виде теплоносителя с минимальными потерями тепла с уходящими газами, что позволяет повысить коэффициент энергетической эффективности до 80 % по сравнению с разомкнутой системой $\eta_{\text{эн}} = 70 \%$. Замкнутая система может быть осуществлена с воздушным подогревателем и без него. Оптимальной схемой является замкнутая система с воздушным подогревателем. В целях снижения вредных выбросов в окружающую среду в виде оксидов азота NO_x в рассматриваемой установке предусмотрено двухступенчатое сжигание конвертерных газов. В камере сгорания 1 происходит неполное горение при коэффициенте расхода воздуха $\alpha < 1$, затем остаточный оксид углерода CO дожигается в камере дожигания 3. Другая схема СИТКГ с тепловым аккумулятором МЭИ предназначена для использования тепла конвертерных газов для выработки электроэнергии в газотурбинной установке. В этой СИТКГ также предусмотрено использование теплового аккумулятора. В качестве теплоносителя в газовой турбине используется воздух, который нагревается до заданной температуры в насадках ТА. Коэффициент энергетической эффективности такой установки составляет $\eta_{\text{эн}} = 65 \%$.

При анализе энергетической эффективности различных СИТКГ использован коэффициент энергетической эффективности, который определялся по формуле (кроме установки с газовой турбиной для выработки электроэнергии)



1 – камера горения; 2, 4 – тепловой аккумулятор; 3 – камера дожигания; 5 – конвективный котел; 6 – воздушный подогреватель; 7, 8 – дымосос; 9 – дымовая труба; 10 – вентилятор; 11 – 22 – запорно - регулирующая арматура.

Рисунок 2 – Разомкнутая система теплоиспользования с тепловым аккумулятором и воздушным подогревателем

$$\eta_{\text{ЭН}} = \frac{(1 - \alpha)(1 - \beta)\varphi}{\eta_{\text{к}}(1 + S)}, \quad (1)$$

где α – коэффициент, учитывающий долю тепла конвертерных газов, теряемых с уходящими газами в окружающую среду;

$\beta = \mathcal{E}_m (q_k - q_m)$ – коэффициент, учитывающий потери, имеющие место за счет вытеснения отбора пара от заводской ТЭЦ;

\mathcal{E}_m – удельная выработка электроэнергии на паре данных параметров при теплофикационном режиме (зависит от начальных параметров пара и величины давления отбора);

q_k – удельный расход тепла на выработку электроэнергии для районной ТЭС;

q_m – удельный расход тепла на выработку электроэнергии при теплофикационном режиме на заводской ТЭЦ;

φ – коэффициент, учитывающий степень использования тепла пара, вырабатываемого теплоиспользующей установкой;

$\eta_{\text{к}}$ – КПД замещаемого котлоагрегата;

S – коэффициент, учитывающий расход энергии на собственные нужды СИТКГ.

Выводы и направление дальнейших исследований. Анализ работы существующих СИТКГ показывает низкую их энергетическую эффективность. Максимальный коэффициент энергетической эффективности имеет система с отводом конвертерных газов без дожигания с последующим использованием их в качестве топлива $\eta_{\text{ЭН}} = 50 \%$. Но система с газгольдером не нашла широкого применения, так как имеет ряд существенных недостатков. Наиболее перспективным вариантом является СИТКГ с тепловым аккумулятором (МЭИ). Коэффициент энергетической эффективности СИТКГ с газовой турбиной, вырабатывающий электроэнергию, составляет $\eta_{\text{ЭН}} \approx 65 \%$, а СИТКГ с тепловым аккумулятором, вырабатывающий пар энергетических параметров, по разомкнутой схеме $\eta_{\text{ЭН}} \approx 70 \%$. Наиболее предпочтительной схемой при реализации СИТКГ с тепловым аккумулятором является вариант с замкнутой системой теплоиспользования с воздушным подогревателем, которая имеет наилучшие энергоэкономические показатели. Коэффициент энергетической эффективности такой установки достигает до $\eta_{\text{ЭН}} \approx 80 \%$. При реализации такой установки в ККЦ с тремя конвертерами ёмкостью 300 тн, годовая экономия топлива может составить ~ 100 тыс.т.у.т. Таким образом, СИТКГ с тепловым аккумулятором обеспечивает непрерывную выработку пара энергетических параметров (который может быть использован в турбогенераторах) или

электроэнергии с использованием газовой турбины при циклическом режиме работы сталеплавильных конвертеров и защиту окружающей среды от вредных выбросов в виде оксида углерода СО и оксидов азота NO_x. Необходимо провести дальнейшие исследования с целью определения оптимальной схемы теплоиспользования в СИТКГ с тепловым аккумулятором, оптимальных параметров основных элементов и энергоэкономических показателей установки.

Приведены результаты анализа энергетической эффективности систем использования тепла конвертерных газов (СИТКГ), которые реализованы за кислородными конвертерами, а также новых технических решений по эффективному использованию располагаемого тепла конвертерных газов, обеспечивающие высокие энергоэкономические показатели.

The results of analysis of power efficiency of the systems of the use of heat of converter gases (SITKG), which are realized after oxygen converters, and also new technical decisions on the effective use of the disposed heat of converter gases, are resulted, providing high energoekonomicheskie indicators.

Библиографический список.

1. Розенгарт Ю.И., Якобсон Б.И., Мурадова З.А. Вторичные энергетические ресурсы черной металлургии и их использование. – Киев: Вища школа, 1988. – 328 с.
2. Розенгарт Ю.И., Мурадова З.А., Теверовский Б.З. и др. Теплоэнергетика металлургических заводов. – М.: Металлургия, 1985. – 303 с.
3. Очистка газов в металлургии, спец. выпуск № 83 института ЧМ Англии: Пер. с англ. – М.: Металлургия, 1968. – 372 с.
4. Бережинский А.И., Циммерман А.Ф. Охлаждение и очистка газов кислородных конвертеров. – М.: Металлургия, 1975. – 192 с.
5. Алексеев В.П., Алексеева М.В. Установка для использования тепла конвертерных газов с тепловым аккумулятором. Вестник МАНЭБ. – СПб. – 2004. – т. 9, № 7 (79). – С. 82 – 85.

*Рекомендовано к печати
д. т. н., проф. Петрушовым С.Н.*