

ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ПРОЦЕССА НА БАЗЕ ГАЗОТУРБИННОГО ЦИКЛА

А. Н. Бушуев

Новотроицкий филиал НИТУ «МИСИС»

(г. Новотроицк, Россия)

Рассмотрены результаты изменения показателя эффективности системы на базе газотурбинного цикла при осуществлении дополнительного подогрева металлической шихты перед плавкой за счет частичного отбора отработавших газов газовой турбины. Установлена требуемая доля отбора в зависимости от системы энергообеспечения и основных определяющих параметров. Рассмотрено использование доменного газа металлургического предприятия при дожигании в паротурбинной части системы с целью повышения полной генерируемой мощности и повышения эффективности энергетического комплекса «Электросталеплавильное производство – система энергообеспечения». Исследовано влияние использования доли отходящих газов ГТУ для подогрева шихты на показатель эффективности энергетического комплекса в целом.

Ключевые слова: газотурбинная установка (ГТУ), котел-утилизатор, предварительный подогрев металлической шихты, электросталеплавильное производство.

Необходимость строительства собственной электростанции на предприятии с энергоемкими технологическими циклами обусловлена многими причинами, в том числе и тем, что затраты на подвод электроэнергии и тепла при новом строительстве сопоставимы с расходами на строительство самой местной электростанции [1]. Следует отметить также, что местные источники энергии дают возможность полезного использования дешевых ВЭР на предприятии [2].

Возможными приводами генераторов для децентрализованных мини-ТЭС рассматриваются газовые поршневые и турбинные двигатели. Применение когенерационных источников теплоты и электроэнергии на базе последних дает ряд преимуществ [2 – 4]:

удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии на ГТУ составляет 220 г/кВт · ч и менее, в то время как средний расход по энергосистеме находится на уровне 346 г/кВт · ч;

повышается надежность электроснабжения производственного процесса;

уменьшаются потери электроэнергии в питающих распределительных сетях.

Включение в цикл производства энергии ГТУ может обеспечить подогрев металлошихты перед загрузкой в ДСП тепловым потоком выхлопных газов турбины. Подогрев металлошихты может осуществляться в каком-либо технологическом устройстве (теплоизолированном канале), образующем вместе с подводящими и отводящими газоходами и вспомогательными механизмами систему подогрева металлошихты (СПШ) [5, 6].

Принципиальная схема системы энергообеспечения электросталеплавильного процесса, включающая в себя основные варианты и комбинации энергетического источника, приведена на рис. 1. Данная схема в полном виде отображает систему энергообеспечения на базе парогазотурбинного цикла с предварительным подогревом металлической шихты перед плавкой и

возможностью утилизации ВЭР металлургического предприятия.

При отсутствии двух нижних ветвей схема отображает принцип работы системы энергообеспечения на базе паротурбинного цикла, при отсутствии только одной нижней ветви – принцип системы энергообеспечения на базе парогазотурбинного цикла. В этом случае при Q_{T2} , отличном от нуля, схема будет отображать принцип работы системы энергообеспечения с

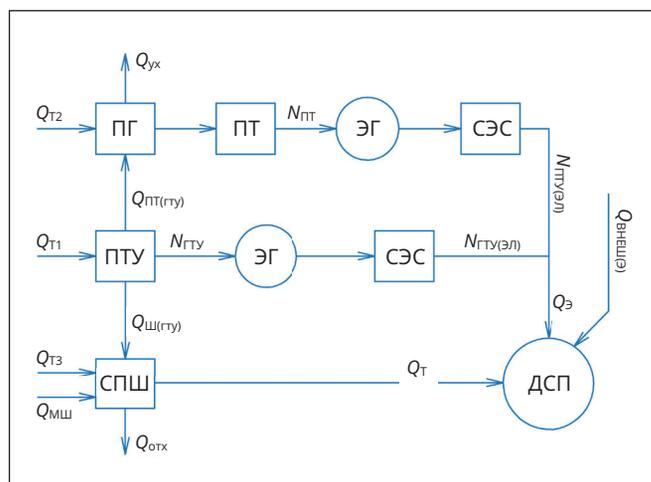


Рис. 1. Принципиальная схема системы энергообеспечения на базе парогазотурбинного цикла с возможностью подогрева металлической шихты: ПГ – парогенератор (паровой котел); ПТ – паровая турбина; ЭГ – электрогенератор; СЭС – система электроснабжения; ДСП – дуговая сталеплавильная печь как потребитель тепловой и электрической энергии; Q_{T1} , Q_{T2} , Q_{T3} – количество теплоты, вносимое в систему посредством сжигания различных видов топлива; $Q_{MШ}$ – теплота, вносимая в систему с металлошихтой; $N_{ПТ}$ – мощность на валу паровой турбины; $N_{ПТ(ГТУ)}$ – мощность на валу ГТУ; $Q_{ПГ(ГТУ)}$, $Q_{Ш(ГТУ)}$ – количество теплоты, вносимое в парогенератор и в СПШ с выхлопными газами ГТУ; $Q_{Э}$, $Q_{Т}$ – электрическая и тепловая энергия, вводимая в технологический процесс ДСП от местного источника; $Q_{внеш(Э)}$ – электрическая энергия от внешнего источника (от энергосистемы)

дожиганием вспомогательного топлива в паротурбинном цикле с целью повышения параметров системы. При отличии энергетических потоков Q_{T1} , Q_{T2} , Q_{T3} от нуля схема будет отображать полную систему энергообеспечения на базе парогазотурбинного цикла с дожиганием топлива в паротурбинной части системы и в системе подогрева металлической шихты.

Отходящие газы ГТУ не запылены инородными включениями и по химическому составу очень близки к воздуху, так как коэффициент избытка воздуха при горении топлива значительно выше единицы [3]. Данный факт и высокая температура указывают на актуальность рассмотрения проблемы использования части отходящих газов ГТУ для предварительного подогрева металлической шихты перед загрузкой в ДСП.

Требуемая доля отбора отходящих газов газовой турбины на предварительный подогрев металлической шихты при частичном энергообеспечении технологического процесса электроплавки от ГТУ может быть выражена как функция двух интервальных показателей:

$$z(x, y) = \frac{v C_m \cdot (x - t_{1m})}{(I_{gas} - I_{yx}) \cdot \eta_{yc} \cdot (1 + \alpha \cdot V) \cdot \tau} \cdot \left[(1 + \alpha \cdot V) \cdot (I_{gaz} \cdot I_{gas}) \eta_t \eta_{mi} \frac{\alpha \cdot V \cdot (I_{voz}(y) \cdot I_v)}{\eta_k \eta_{mk}} \right] \cdot \eta_{\Xi} \cdot \frac{980}{N_{уд}}$$

где x, y – интервальные величины (конечная температура подогретой шихты и степень сжатия компрессора соответственно); v – коэффициент, учитывающий превышение массы шихты на 1 т готовой стали (показатель учитывает угар шихты перед расплавлением, порядка 10-16 %); C_m – массовая теплоемкость металлической шихты; t_{1m} – температура холодной шихты, подаваемой в систему подогрева (принимается 25 °С); I_{yx2} – энтальпия газов за системой подогрева шихты; I_v – энтальпия наружного воздуха; $N_{уд}$ – удельный подвод электрической мощности на 1т стали; τ – продолжительность технологического процесса электроплавки; I_{gaz} – энтальпия рабочих газов перед газовой турбиной (за камерой сгорания); I_{gas} – энтальпия рабочих газов за газовой турбиной (перед подачей на подогрев металлошихты).

Показатели $N_{уд}$ и τ являются основными для технологического процесса производства электростали [6]. На основе усредненных данных за последние годы выплавки стали СтЗсп на предприятии АО «Уральская Сталь» установленная подводимая мощность на 1 т выплавляемой электростали составляет порядка 500 кВт, средняя продолжительность процесса под током – 3000 с. Относительно низкий показатель подводимой электрической мощности объясняется заливкой жидкого чугуна в ДСП. Именно на основе отмеченных технических данных процесса выплавки электростали в АО «Уральская Сталь» проводились основные расчеты систем энергообеспечения.

Числовое поле значений доли отбора отходящих газов ГТУ, построенное по приведенной зависимости с учетом поправки среднего значения доли отбора 11 %, показано на рис. 2.

Как видно, доля отбора не зависит от подачи топлива на турбину, так как увеличение электрической мощности ГТУ ведет к пропорциональному увеличению массы переплавляемого лома. При построении числового поля температура отходящих газов за турбиной принималась постоянной, равной 1250 °С, за системой подогрева шихты 100 °С, КПД СПШ – 85 %.

Коэффициент полезного использования топлива данной системы энергообеспечения при переменной доле отбора рабочих газов ГТУ на подогрев металлической шихты может быть записан как функция прежних интервалов:

$$\eta(x, y) = \left[(1 + \alpha \cdot V) \cdot (I_{gaz} \cdot I_{gas}) \cdot \eta_t \cdot \eta_{mi} \frac{\alpha \cdot V \cdot (I_{voz}(y) \cdot I_v)}{\eta_k \cdot \eta_{mk}} \right] \cdot \eta_{\Xi} \cdot \frac{0,98}{Q} + \frac{f(x, y) \cdot (\alpha \cdot V + 1) (I_{gas} \cdot I_{yx})}{Q}$$

Здесь $f(x, y)$ – рассмотренная функция доли отбора отходящих газов ГТУ.

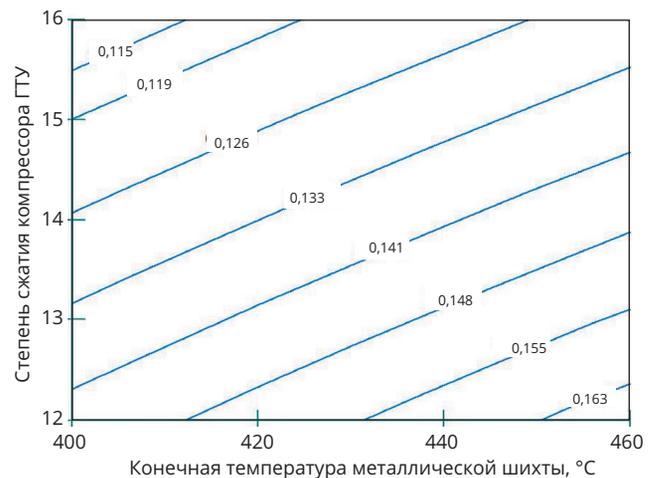


Рис. 2. Числовое поле значений доли отбора отходящих газов ГТУ на предварительный подогрев металлической шихты

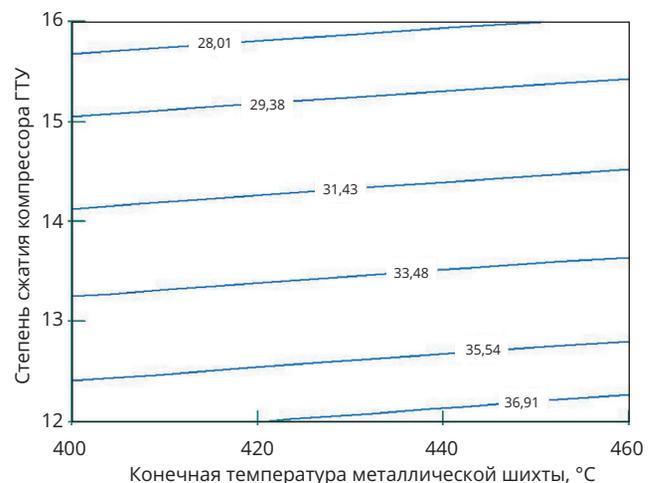


Рис. 3. Числовое поле возможных значений массы переплавляемой стали в ДСП при энергообеспечении системой «ГТУ – СПШ»

Данный показатель лежит в пределах от 39 до 50 % с постепенным ростом при повышении температуры подогрева металлошихты перед ДСП.

Как показали результаты расчета системы, отбор некоторой доли (порядка 12-15 %) отходящих газов ГТУ на подогрев металлической шихты перед плавкой повышает показатель эффективности данной системы энергообеспечения примерно на 7-9 % по сравнению с вариантом энергообеспечения только от ГТУ.

При заданной подводимой удельной электрической мощности и продолжительности технологического процесса выплавки электростали возможно построение числового поля массы переплавляемой электростали при энергообеспечении от исследуемой системы. В упрощенном виде функциональная зависимость данного показателя имеет вид:

$$m(x, y) = \left[\left[(1 + \alpha \cdot V) \cdot (I_{gaz} \cdot I_{gas}) \cdot \eta_t \cdot \eta_{mt} \cdot \frac{\alpha \cdot V \cdot x \cdot (I_{voz}(y) \cdot I_v)}{\eta_k \cdot \eta_{mk}} \right] \cdot 0,98 \cdot \eta_{\text{D}} + f(x, y) \cdot (\alpha \cdot V + 1) \cdot (I_{gas} \cdot I_{yx}) \right] \cdot \frac{1}{N_{\text{уд}}}.$$

Числовое поле приведенной зависимости изображено на рис. 3.

Как показано на рис. 2, доля отбора отходящих газов ГТУ на подогрев металлической шихты значительно меньше 100 %, что указывает на значительный резерв повышения эффективности системы энергообеспечения газотурбинного цикла. Единственный способ – утилизировать 100 % отходящих газов ГТУ с целью выработки электрической или тепловой энергии. Более глубокую утилизацию отходящих газов ГТУ возможно обеспечить включением в систему парового или водогрейного котла-утилизатора [2].

Энергетический источник на смешанном парогазотурбинном цикле эффективен прежде всего тем, что наличие котла-утилизатора в технологической цепочке генерации энергии предусматривает возможность дополнительной подачи топлива на сжигание непосредственно в паровом котле с целью увеличения генерируемой мощности системой в целом [2]. В качестве топлива, подаваемого на дожигание, могут быть использованы не только традиционные виды топлива, но и вторичные энергоресурсы промышленного предприятия.

Коэффициент полезного использования топлива котла-утилизатора при дополнительном дожигании доменного газа лежит в пределах от 76 до 86 %, смещаясь в сторону больших значений при снижении расхода природного газа на ГТУ с одновременным увеличением подачи доменного газа в котел.

После установления четких границ функционального показателя доли отбора рабочих газов на подогрев шихты может быть построено числовое поле множества значений показателя эффективности системы энергообеспечения с предварительным подогревом шихты [5]. Функциональная зависимость данного показателя сходна с функцией эффективности системы «ГТУ-КУ с дожиганием ВЭР». Отличие заключается в

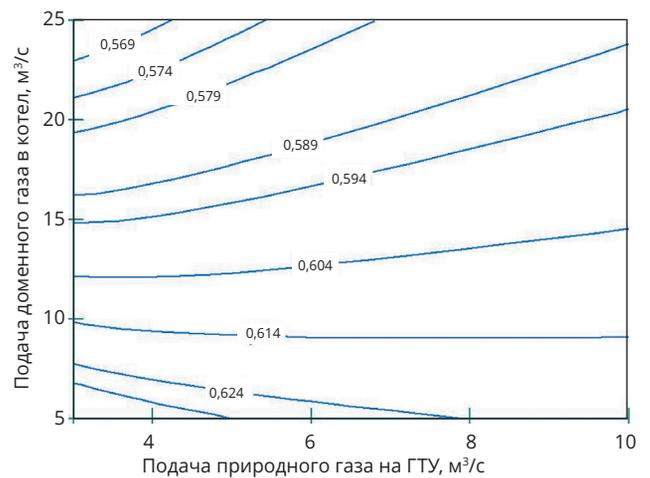


Рис. 4. Коэффициент полезного использования топлива системы ГТУ-КУ с дожиганием доменного газа и предварительным подогревом металлошихты

учете понижения подачи отходящих газов ГТУ на котел-утилизатор и учете эффективности самой системы подогрева металлической шихты. Такой показатель эффективности системы подогрева, как его КПД $\eta_{\text{ус}}$, учитывается непосредственно в самой функциональной зависимости доли отбора рабочих газов $z(x, y)$. Тогда функция коэффициента полезного использования первичных ресурсов системы энергообеспечения в развернутом виде может быть записана следующим образом:

$$\eta(x, y) = \frac{(\alpha \cdot V + 1) \cdot x \cdot (I_{gaz} \cdot I_{gas}) \cdot \eta_t \cdot \eta_{mt} \cdot \frac{\alpha \cdot V \cdot x \cdot (I_{voz} \cdot I_v)}{\eta_k \cdot \eta_{mk}}}{x \cdot Q + y \cdot Q_1} \cdot \eta_{\text{D}} + \frac{z(x, y) \cdot (1 + \alpha V) \cdot (I_{gas} \cdot I_{yx})}{x \cdot Q + y \cdot Q_1} + \frac{I_{par} \cdot I_k}{I_{par} \cdot I_{pv}} \cdot n \cdot \frac{\left[(anV + 1)nxnI_{gas}n(1 \cdot z(x, y)) + \right] nh_{pt} \cdot nh_{mpt} \cdot nxnh_{\text{D}}}{xnQ + ynQ_1} + \frac{y(I_{dom} \cdot i_{dom})}{xnQ + ynQ_1} = nw(x, y),$$

где $z(x, y)$ – ранее рассмотренная функция доли отбора газов на подогрев металлошихты; $w(x, y)$ – частная функция, учитывающая изменение показателя эффективности использования первичных ресурсов котла-утилизатора с учетом отбора доли газов ГТУ.

Числовое поле функции $\eta(x, y)$ изображено на рис. 4. При сравнении результатов с числовым полем показателя эффективности аналогичной системы энергообеспечения без предварительного подогрева металлической шихты следует отметить, что в области низкой подачи топлива на ГТУ данные показатели практически неразличимы (разница менее 1 %). При высокой подаче топлива на ГТУ и низкой подаче доменного газа на дожигание в котел-утилизатор, разница между показателями достигает уже 3 %. Данную разницу определяет прежде всего КПД системы подогрева металлической шихты.

При сжигании конвертерного газа в котле-утилизаторе при прежних условиях показатель КПИ топлива системы изменяется в среднем от 60 до 64 %. Измене-

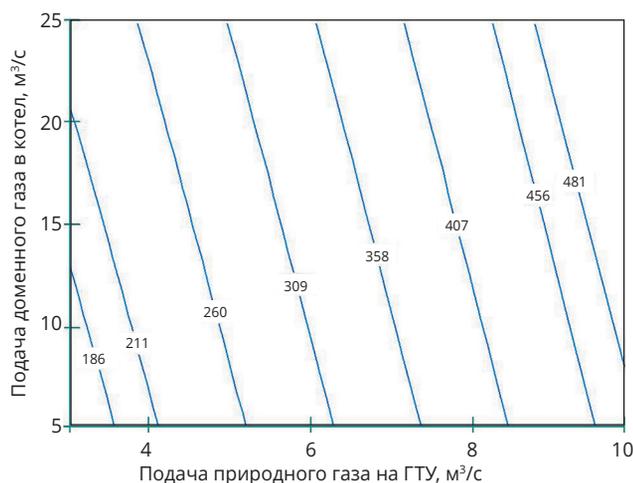


Рис. 5. Числовое поле возможных значений конечной массы готовой электростали, выплавляемой за технологический цикл при энергообеспечении от системы «ГТУ-КУ с дожиганием доменного газа» при предварительном подогреве шихты

ние эффективности системы при постоянной подаче природного газа на ГТУ в зависимости от подачи конвертерного газа составляет в среднем 1,8 – 2 % независимо от мощности, развиваемой ГТУ.

Рассматриваемая система обеспечивает меньшую выработку электроэнергии по сравнению с аналогичной системой энергообеспечения без предварительного подогрева металлической шихты за счет отбора части отходящих газов ГТУ на чисто тепловые нужды. На основании функциональной зависимости развиваемой электрической мощности системы и требуемой удельной мощности $N_{уд}$ на выплавку 1 т стали построено числовое поле массы готовой электростали, выплавляемой при энергообеспечении от рассматриваемой системы. Числовое поле массы изображено на рис. 5.

Можно отметить некоторое превышение (примерно от 2,5 до 7 % в зависимости от подачи топлива) массы переплавляемой стали при энергообеспечении технологического процесса без осуществления предварительного подогрева металлической шихты. Объясняется это неизменной требуемой удельной мощностью технологического процесса выплавки 1 т электростали и большей электрической мощностью, подводимой к ДСП при отсутствии отбора газов на подогрев шихты [6]. Однако при энергообеспечении от данной системы продолжительность технологического процесса выплавки приведенной массы электростали составляет порядка 3000 с, тогда как при энергообеспечении от системы, обеспечивающей дополнительный подогрев металлической шихты, продолжительность процесса сокращается примерно до 2420 с. Сокращение времени выплавки составляет практически 21 %. Превышение массы выплавляемой

стали при максимальных подачах топлива в систему составляет всего 7,3 %.

При сокращении продолжительности технологического процесса выплавки стали на 21 % при энергообеспечении от системы без подогрева шихты максимально возможная масса выплавляемой стали чисто теоретически может составить 429 т. Однако рассматриваемая система энергообеспечения обеспечивает выплавку электростали массой 506 т, т. е. на 18 % больше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнивая показатели эффективности систем энергообеспечения, можно отметить значительное превышение показателя эффективности для системы энергообеспечения без предварительного подогрева металлической шихты при высоких подачах топлива на систему – примерно 59 и 63 % соответственно. Однако энергообеспечение технологического процесса от системы с подогревом шихты обеспечивает значительно большую производительность процесса, что в суммарной оценке говорит о высокой энергетической эффективности технического комплекса «Электросталеплавильное производство – система энергообеспечения». В подобных энергосистемах производительность технологического процесса энергопотребителя является вторым критерием оценки эффективности как системы энергообеспечения, обеспечивающей протекание этого процесса, так и всего энергетического комплекса в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Таймаров М.А., Максимов Е.Г. Анализ технико-экономических показателей ГПД и ГТД для технического переоснащения ТЭС // Изв. вузов. Проблемы энергетики. 2005. № 3-4. С. 96 – 100.
2. Теплотехника : учебник / под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. 6-е изд. – М. : МГТУ им. Баумана, 2018. – 880 с.
3. Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н. Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций : учеб. пособ. для вузов ; под ред. С.В. Цанева. – 3-е изд., стереот. – М. : ИД МЭИ, 2009. – 584 с.
4. Комаров О.В., Блинов В.Л., Шемякин А.С. Тепловые и газодинамические расчеты газотурбинных установок : учеб.-метод. пособ. – Екатеринбург : изд-во Урал. ун-та, 2018. – 164 с.
5. Понтер Д.А., Бушуев А.Н. Анализ нагрева металлошихты выхлопными газами ГТУ в электросталеплавильном производстве // Промышленная энергетика. 2014. № 9. С. 26 – 29.
6. Рошин В.Е., Рошин А.В. Электрометаллургия и металлургия стали : учебник. – М.; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 576 с.

Статья поступила 30.06.2024