

ЭЛЕКТРО- И ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.515.1

DOI: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43

Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В.

ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СХЕМЫ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СЖИМАЕМОГО ГАЗА В СИСТЕМЕ СНАБЖЕНИЯ ТЕХНИЧЕСКИМИ ГАЗАМИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Предложена усовершенствованная схема охлаждения сжимаемого газа между группами ступеней сжатия в крупных промышленных центробежных компрессорных установках, позволяющая экономить энергию на сжатие за счет доохлаждения газа до температуры, близкой к температуре окружающей среды в зимнее время, и генерировать электрическую энергию на отводимой теплоте сжатия в летнее время. Произведен расчет энергосберегающего эффекта от использования жидких продуктов разделения воздуха для охлаждения сжатых газов: воздуха, кислорода и азота. В зависимости от типа привода центробежных компрессоров выполнен термодинамический расчет затрат на сжатие технических газов для полного цикла металлургического производства стали, включая сжатие воздуха для разделения, доменного дутья, газообразных кислорода и азота. Оценена удельная экономия энергии в зависимости от охлаждения сжимаемого газа между группами ступеней сжатия в промышленных центробежных компрессорных установках и от впрыска жидких продуктов разделения воздуха в поток сжимаемого газа с учетом типа привода компрессоров на примере климатических условий месторасположения ОАО «ММК».

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективная схема, центробежный компрессор, тип привода, работа сжатия, теплота, промежуточное охлаждение, органический цикл Ренкина.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая энергоёмкость металлургического предприятия обуславливает исключительную важность энергосбережения на всех стадиях производства конечного продукта. Средние удельные затраты на производство 1 т стали в странах с развитой промышленностью в последние два десятилетия были снижены на 25-30 %. В то же время показатели энерго- и материалоемкости производства металлопродукции в Российской Федерации существенно уступают зарубежным аналогам [1]. Так, в России металлургические предприятия потребляют около 14 % всего топлива и 12 % всего объема вырабатываемой электроэнергии в энергетическом балансе страны [2]. Например, ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» потребляет около 900 МВт электрической мощности, из которых 650 МВт обеспечивается собственными электростанциями (ГЭЦ – 330 МВт, ЦЭС – 205 МВт, ПВЭС – 100 МВт, ПСЦ – 15 МВт) [3].

Доля энергопотребления на производство сжатых газов на предприятиях черной металлургии – 5÷7 % от общего расхода энергии на производство основного продукта цеха, предприятия. Удельные расходы энергии на производство сжатого воздуха составляют от 80 до 140 кВт·ч/1000 м³ (в зависимости от типа компрессоров, условий охлаждения и эксплуатации) при электроприводе и 17÷20 кг у.т./1000 м³ при паротурбинном приводе компрессоров [3, 4].

Одним из существенных факторов, влияющих на перерасход энергии на компрессорных станциях, является недоохлаждение газа в промежуточных охладителях до температуры охлаждающего теплоносителя как в летнее, так и зимнее время, достигающее 20-40 °С, а так-же сброс теплоты сжатия в окружающую среду. В качестве промежуточного охладителя чаще всего ис-

пользуется вода. При этом возникают две взаимосвязанные технические проблемы: первая – недоохлаждение сжатого газа в зимнее время, ограниченной температурой применения воды 0 °С вследствие её замерзания; вторая – проблема использования отведенной низкопотенциальной теплоты сжатия.

Таким образом, можно выделить главную задачу энергосбережения, связанную с охлаждением газа в компрессорных установках, – снижение температуры сжимаемого газа при возможно меньших потерях на эксплуатацию системы охлаждения и использование отведенной теплоты с максимальной эффективностью.

МЕТОДИКА

Авторами данной работы была предложена комбинированная схема охлаждения с использованием теплоты сжатия в органическом цикле Ренкина [5], где сжатый воздух сначала поступает в трубчатый теплообменник и охлаждается фреоном, который кипит, превращаясь в перегретый пар. Полученный фреоновый пар подается во фреоновую турбину, где, расширяясь, приводит в действие электрогенератор. В качестве рабочего тела для органического цикла Ренкина был выбран наиболее широко применяемый в промышленности фреон R134a [6, 7].

Для доказательства практической значимости разработанной схемы была проведена оценка энергетического эффекта от внедрения предлагаемой схемы на металлургическом предприятии полного цикла. В основу расчетов заложены данные теплотехнологии получения стального проката из железной руды тех переделов, в которых потребляется наибольшее количество сжатого воздуха и продуктов его разделения на примере ОАО «ММК».

В процесс производства стального листа входят:

1 этап. Выплавка чугуна в доменной печи.

В данном процессе, при давлении 1,4 МПа, используется 90 кг азота на тонну чугуна для продувки ко-

лошника доменной печи [8, 9]. Кроме того, в доменную печь вдувают около 2700 кг дутья/т чугуна при давлении 0,6 МПа [8, 10, 11]. Дутье представляет собой воздух, обогащенный кислородом, на что расходуется до 200 кг кислорода на тонну чугуна [12].

2 этап. Выплавка стали из чугуна в конвертере.

Для удаления углерода чугун продувают кислородом при давлении 1,5 МПа в количестве 80÷100 кг/т [13]. Также для создания защитной атмосферы используется около 25÷35 кг азота/т стали.

3 этап. Разливка и прокатка стали для получения готового листа.

Для получения 1 т листа необходимо выплавить 1,2 т стали. В свою очередь, для выплавки такого количества стали требуется 1 т чугуна и 220 кг лома. На 1 т чугуна расходуется 0,48 т кокса, а также 1,13 т агломерата и 0,61 т окатышей [14-16].

Азот и кислород для доменной печи и конвертера производятся в воздухоразделительных установках (ВРУ) типа АКАр 40/35, а затем сжимаются до 3 МПа в компрессорах типа АЭРОКОМ АА-259/31А и КТК-12,5 соответственно. Дутье для доменных печей и воздух для ВРУ сжимаются в компрессорах типа К-1500. Принципиальная схема описанной выше технологии, с учетом массовых поточных коэффициентов и типов компрессорных установок, приведена на рис. 1.

Таким образом, для производства 1 т стального листа необходимо сжечь около 1375 кг воздуха, 2700 кг дутья, 295 кг кислорода и 120 кг азота. Теплота, отводимая системой промежуточного охлаждения компрессоров, сбрасывается в пруд-охладитель. В качестве механического привода для указанных компрессоров могут быть использованы паровая или газовая турбины, электродвигатель.

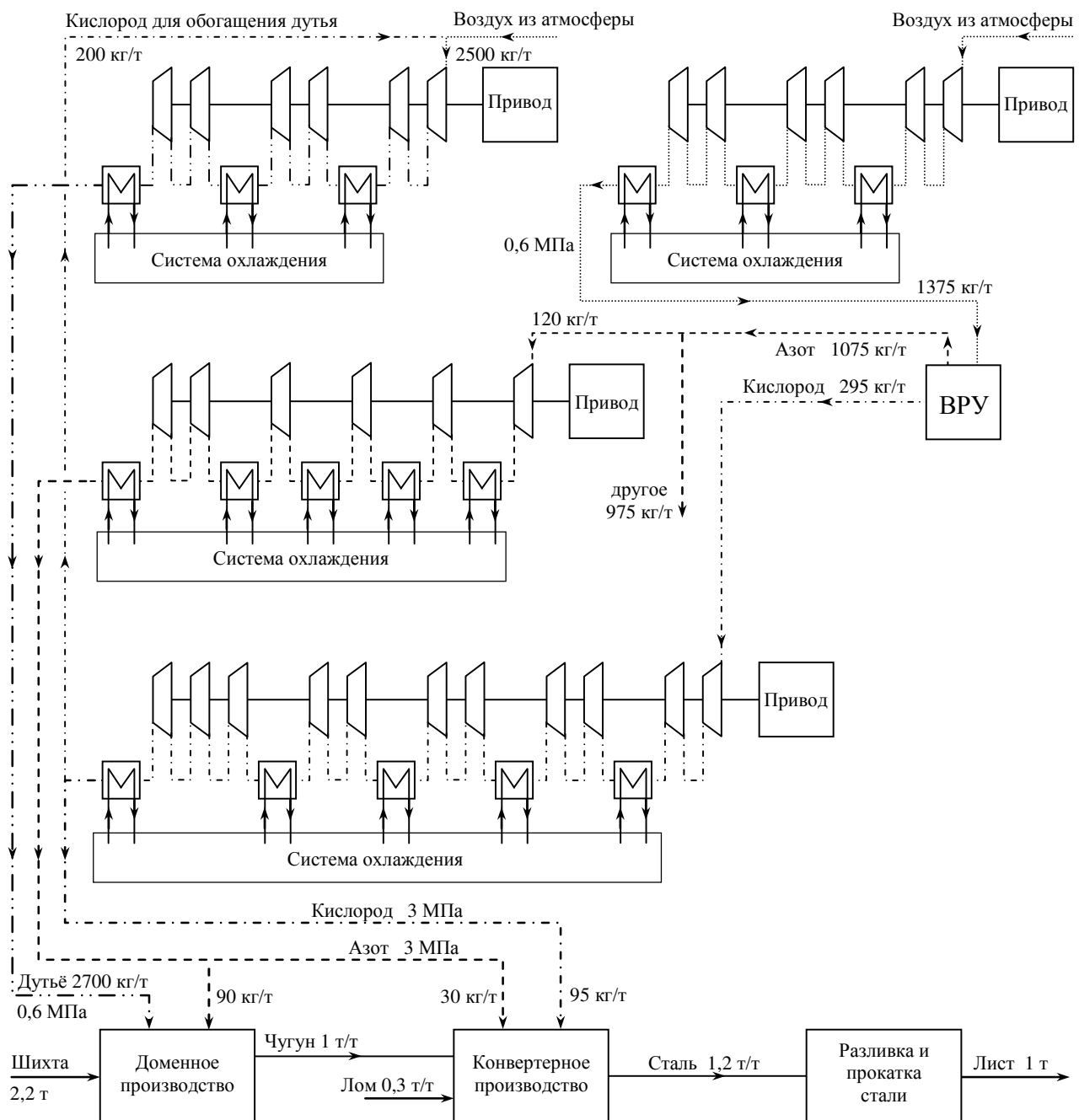


Рис. 1. Принципиальная схема снабжения предприятия черной металлургии сжатыми газами

Для оценки общих затрат были рассчитаны затраты на сжатие всего объема сжимаемых газов, с учетом типа используемого привода. При работе от паротурбинного привода были учтены КПД КУ (60 %) и КПД паротурбинной установки (40 %). При газотурбинном приводе также необходимо учесть КПД КУ и КПД газотурбины установки (35 %). В случае использования электропривода: для расчета количества потребляемых кВт·ч необходимо учесть КПД КУ и КПД электродвигателя (90 %), а при расчете затрат в килограммах условного топлива – добавить потери в сети (местные сети – 15 % и на линиях электропередач – 9 %) и КПД тепловой электрической станции (40 %).

Работа сжатия в ступени рассчитывается по следующей формуле:

$$L = G \cdot \frac{1}{\eta_{oi}} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot T_{нач} \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right), \quad (1)$$

где G – масса сжимаемого газа, кг; $T_{нач}$ – температура на входе в ступень сжатия, К; η_{oi} – внутренний КПД компрессора; R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); k – показатель адиабаты; ε – степень повышения давления в ступени компрессора.

В летнее время экономия достигается за счет генерации электрической энергии путём утилизации теплоты сжатия в органическом цикле Ренкина, рассчитываемой по следующим формулам [17]:

$$N_{ORC} = G \cdot (l_T - l_n), \quad (2)$$

где l_T – удельная работа, вырабатываемая турбиной, Дж/кг:

$$l_T = m_{\phi} \cdot \eta_{oi}^T \cdot (h_{вх}^T - h_{вых}^T), \quad (3)$$

где l_n – удельная работа, затрачиваемая на насос, Дж/кг:

$$l_n = \frac{m_{\phi} \cdot (h_{вых}^H - h_{вх}^H)}{\eta_{oi}^H}, \quad (4)$$

где η_{oi}^T – КПД турбины (был принят равным 0,8); η_{oi}^H – КПД насоса (был принят равным 0,7); $h_{вх}^T$ – удельная энтальпия перегретого пара фреона на входе в турбину, Дж/кг; $h_{вых}^T$ – удельная энтальпия сухого насыщенного пара фреона на выходе из турбины, Дж/кг; $h_{вх}^H$ – удельная энтальпия конденсата фреона на входе в насос, Дж/кг; $h_{вых}^H$ – удельная энтальпия конденсата фреона на выходе из насоса, Дж/кг; m_{ϕ} – удельный расход фреона на 1 кг охлаждаемого газа, кг/кг.

Расчеты велись по формулам (1)-(4) для условий географического месторасположения ОАО «ММК» с учетом многоступенчатости реальных компрессоров. Экономия энергии на привод компрессора от усовершенствования системы охлаждения рассчитывается отдельно для зимнего и летнего времени. В зимнее время экономия достигается за счет доохлаждения газа ниже температуры охлаждающей воды [18]. Результаты расчетов представлены на **рис. 2** и **3**.

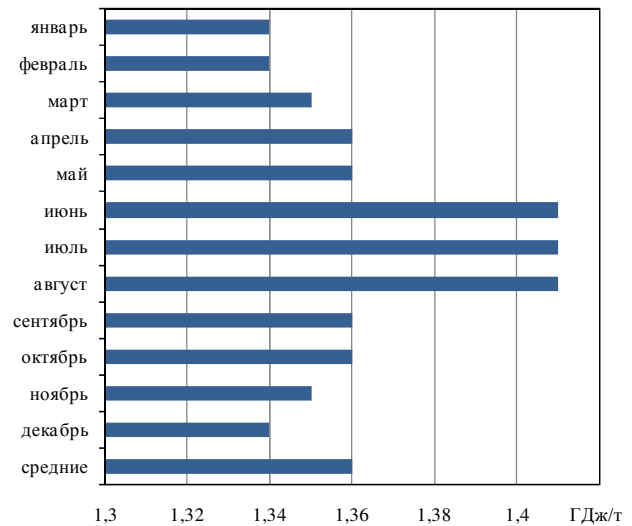


Рис. 2. Затраты энергии на сжатие газов в компрессорах, приведённые к ГДж на тонну стального листа по месяцам

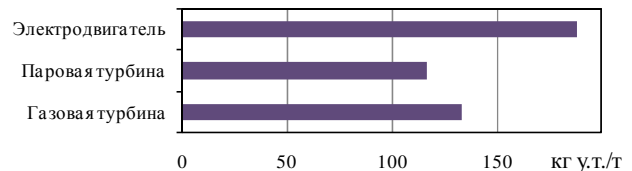


Рис. 3. Средние затраты энергии на сжатие газов в компрессорах, кг у.т. на тонну стального листа в зависимости от типа привода

Зная расход ресурсов (1375 кг воздуха, 2700 кг дутья, 295 кг кислорода и 120 кг азота) для производства 1 т стального листа и рассчитывая энергию, затраченную на сжатие газов, можно наглядно увидеть структуру этих затрат (**рис. 4**).

Таким образом, в структуре затрат преобладают затраты при производстве дутья для доменного производства и затраты на сжатие воздуха перед ВРУ.

Следует обратить внимание на еще один резерв энергосбережения при сжатии продуктов разделения воздуха. Как известно, минимизация величины недоохлаждения сжимаемого газа до температуры окружающей среды приводит к значительному увеличению площади теплообмена в промежуточных газоохладителях и АВО для промежуточного теплоносителя, в свою очередь, это увеличивает затраты на циркуляцию охладителя. Однако обозначенную проблему можно решить, если заменить поверхностное охлаждение сжимаемого газа объемным охлаждением путем впрыска охладителя в поток сжатого газа. При этом следует учитывать, что недопустимо ухудшать качество сжимаемых газов, то есть их состав.

Таким образом, требуется жидкий охладитель с температурой ниже температуры окружающей среды, по составу мало отличимый от сжимаемых газов. В металлургическом производстве в качестве такого теплоносителя могут выступать жидкие азот и кислород [19], вырабатываемые ВРУ в количестве 5,5 кг азота /т стали, либо 6,5 кг кислорода/т стали. При этом возникает задача выбора направления впрыска жидких продуктов разделения воздуха:

- а) жидкий азот в воздух;
- б) жидкий азот в азот из ВРУ;

- в) жидкий кислород в воздух;
- г) жидкий кислород в дутье;
- д) жидкий кислород в кислород.

Для определения направления для впрыска была рассчитана экономия энергии при впрыске, с учетом затрат на сжатие дополнительного количества газа и изменение свойств сжимаемой смеси. Результаты представлены на **рис. 5**. Расчеты для каждой ступени велись по формуле

$$\Delta I_{\text{впр}} = G_{\text{см}} \cdot \frac{1}{\eta_{oi} \cdot \eta_{\text{пр}}} \cdot \frac{k_{\text{см}}}{k_{\text{см}} - 1} \cdot R_{\text{см}} \times \Delta T \cdot \left(\varepsilon^{\frac{k_{\text{см}} - 1}{k_{\text{см}}}} - 1 \right), \quad (5)$$

где $G_{\text{см}}$ – масса сжимаемой газовой смеси, кг; $R_{\text{см}}$ – индивидуальная газовая постоянная смеси, Дж/(кг·К); ΔT – величина доохлаждения за счет впрыска, К; $k_{\text{см}}$ – показатель адиабаты смеси; ε – степень повышения давления в ступени компрессора; $\eta_{\text{пр}}$ – КПД привода.

При расчетах учитывалось количество газоохладителей, после которых предполагается впрыск (только после первого, после первого и второго и так далее), а также время года (зимнее время с температурой окружающей среды -15°C и летнее с $+15^{\circ}\text{C}$). Изменение свойств сжимаемой смеси учитывалось с помощью программы WaterSteamPro.

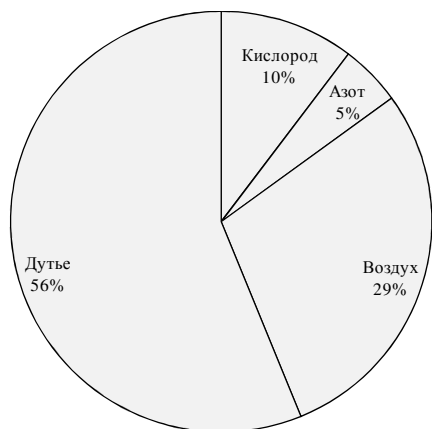


Рис. 4. Структура затрат энергии на сжатие газов металлургического производства на примере ОАО «ММК»

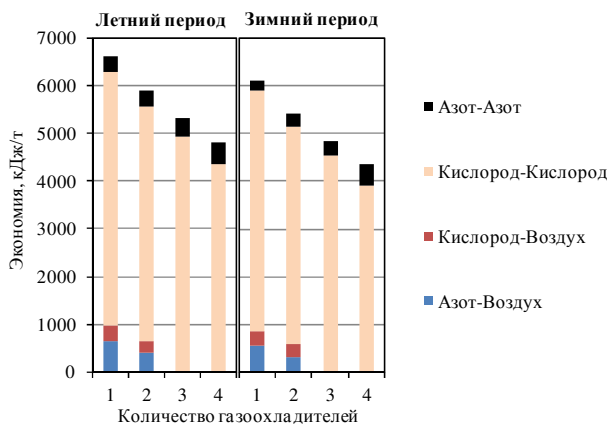


Рис. 5. Экономия энергии на сжатие газов при впрыске жидких продуктов разделения воздуха

Видно, что наибольшая экономия достигается для компрессоров, сжимающих азот на выходе из воздухо-разделяющей установки, при впрыске жидкого азота в сжимаемый же азот. Также показано, что независимо от времени года экономия на сжатии для азотных компрессоров проявляется сильнее относительно других вариантов и составляет от 4800 до 6600 кДж/т стали в летний период и от 4400 до 6100 кДж/т стали в зависимости от количества газоохладителей за ступенями сжатия. Учитывая это, была рассчитана дополнительная экономия энергии на сжатие азота в зависимости от месяца (**рис. 6**).

Таким образом, доказана экономия на работе сжатия в компрессорах при совершенствовании системы охлаждения промежуточных охладителей. Как было отмечено ранее, работа сжатия может быть обеспечена различными типами приводов, что повлияет на относительную экономию работы сжатия при учете энергетических затрат и КПД механического привода (парового, газового, электрического). На **рис. 7** представлена суммарная (средняя за год) экономия работы сжатия в процентах от затрат в действующей схеме.

Несмотря на незначительное снижение расходов энергии, потребляемой для сжатия газов, при производстве металлургическим предприятием полного цикла 10 млн т стали в год экономия энергии, приведенная к условному топливному эквиваленту, составит более 42,7 тыс. т.у.т. В зависимости от типа привода компрессора сокращение затрат энергии для такого предприятия будет отличаться (**рис. 8**).

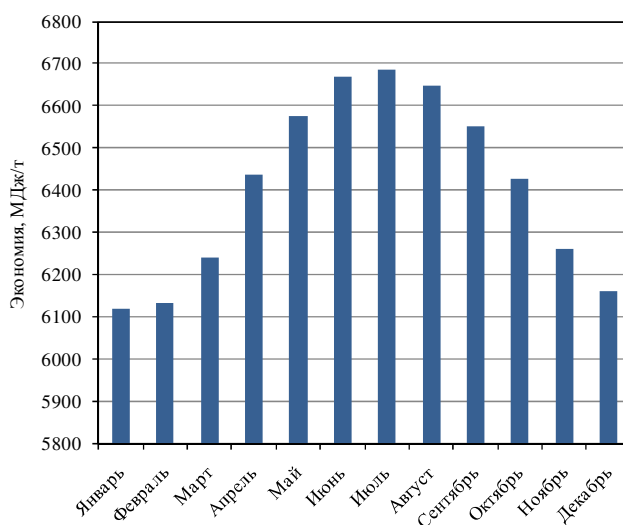


Рис. 6. Экономия энергии на сжатие азота при впрыске жидкого азота на тонну стали

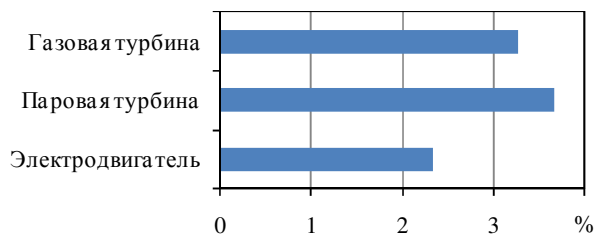


Рис. 7. Средняя относительная экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора

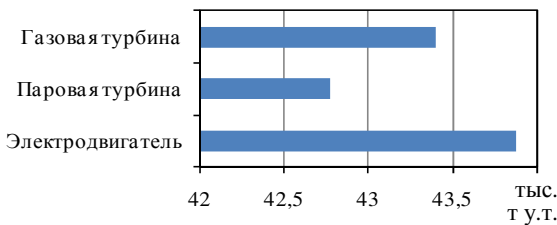


Рис. 8. Годовая экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора

Данная экономия достигается при условиях ярко выраженного континентального климата месторасположения ОАО «ММК» (с холодной зимой и тёплым летом). Для производств с иными климатическими условиями экономия будет иной и её необходимо рассчитывать индивидуально. Для оценки экономии в жарких и холодных климатических зонах рассчитана экономия энергии на сжатии по месяцам в условиях месторасположения ОАО «ММК» с учетом типа привода компрессора (рис. 9).

Из рис. 9 видно, что для температур окружающей среды выше +15°C экономия превышает 4% для электропривода, 6% для газотурбинного привода и может достигать 8% для паротурбинного привода. В свою очередь, для климатической зоны со средней температурой окружающей среды ниже -10°C экономия превышает 2% для газотурбинного, паротурбинного электропривода. При температуре окружающей среды около 5°C замена водяного охлаждения не целесообразна.

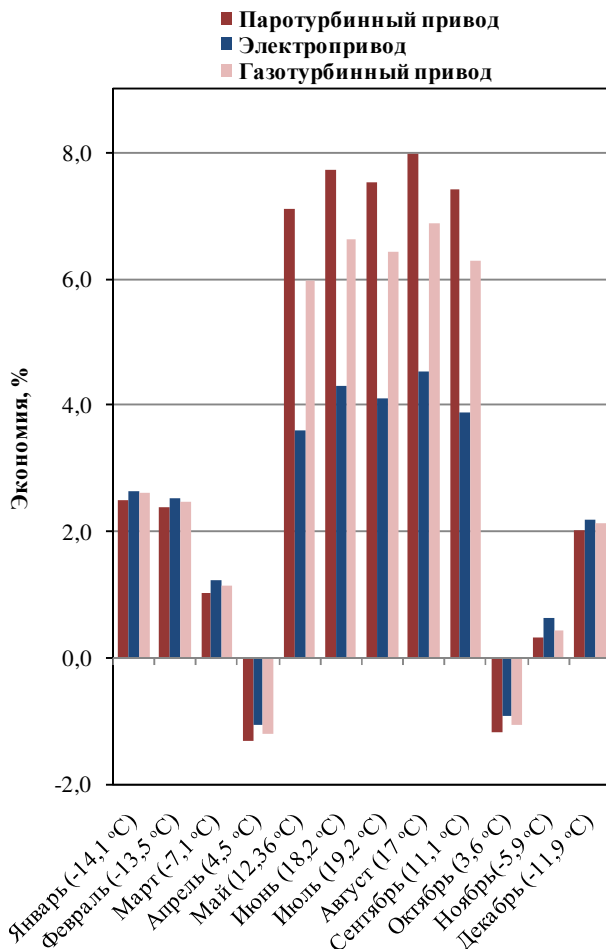


Рис. 9. Относительная экономия энергии на сжатие газов в зависимости от типа привода компрессора и месяца

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях месторасположения ОАО «ММК» внедрение предлагаемой энергоэффективной схемы промежуточного охлаждения и впрыска жидкого газа (кислород, азот) в сжимаемый газ (кислород, азот, воздух) открывает возможность сокращения затрат энергоресурсов на сжатие технических газов более чем на 2÷8 % в проанализированных климатических условиях. При производстве 10 млн т стали в год и цене 2500 руб. за тонну условного топлива данное мероприятие позволит экономить более 105 млн руб.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копцев В.В. Снижение энергозатрат при эксплуатации газовых одностопных колпаковых печей // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 2. С. 53-56.
2. Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И. Энергосбережение и управление энергопотреблением в металлургическом производстве. М.: Энергоатомиздат. 2003. 282 с.
3. Заславец Б.И. Малафеев А.В. Ягольников Е.Б. Снижение тарифов на передачу электроэнергии за счет компенсации реактивной мощности // Вестник МГТУ им Г.И. Носова. 2013. № 2. С. 75-80.
4. Система воздухообращения промышленных предприятий / Н.В. Калинин, И.А. Кабанова, В.А. Галковский, В.М. Костюченко. Смоленск: Смоленский филиал МЭИ (ТУ). 2000. 122 с.
5. Экономные компрессоры / Демин Ю.К., Слепова И.О., Хасанова Р.В., Картавец С.В. // Энергонадзор. 2015. №4. С. 14-16.
6. Mathew Aneke, Meihong Wang, April 2015, Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles, Applied Thermal Engineering, v.81. P. 223-231.
7. G. Kosmadakis, D. Manolakis, G. Papadakis, 2015, Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions, Applied Thermal Engineering, v. 92 (2016). P. 1-7.
8. Воскобойников В.Г. и др. Металлургия стали. М.: ИКЦ. 2005. 768 с.
9. Сперкоч И.Е., Курунов И.Ф. Резервы интенсификации доменного процесса // Металлург. 2005. №2. С. 33-37.
10. Сибатуллин С.К., Майорова Т.В. Увеличение работы газового потока в доменной печи с повышением общего перепада давления по высоте печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2011. №1. С. 14-16.
11. Сибатуллин С.К., Майорова Т.В., Полинов А.А. О влиянии изменения параметров состояния газа на величину его работы в доменной печи // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2007. №4. С. 34-37.
12. Повышение производительности доменной печи при оптимизации автоматического управления подачей природного газа и технического кислорода в дутье / Парсункин Б.Н., Сеничкин Б.К., Андреев С.М., Рябчиков М.Ю. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им Г.И. Носова. 2011. №4. С.63-73.
13. Беляков В.П. Криогенная техника и технология. М.: Энергоатомиздат, 1982. 272 с.
14. Евстигнеев В.Л., Майорова Т.В., Рябчиков М.Ю. Применение балансовой модели для стабилизации показателей доменной плавки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2006. № 3. С. 30-33.
15. Результаты совместного использования в доменной печи

- коксового орешка с одновременным улучшением качества скипового кокса / Сибатуллин С.К., Харченко А.С., Полинов А.А., Семенов М.А., Бегинюк В.А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2010. № 2. С. 24-27.
16. Железорудная база ОАО «Магнитогорский Metallurgical Комбинат» / В.И. Гладских, С.В. Гром, А.Б. Пермяков, Н.И. Хасанов // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2007. № 2. С. 13-16.
17. Sahar Safarian, Fereshteh Aramoun, 2015, Energy and exergy

- assessments of modified Organic Rankine Cycles, Energy Reports, v.1. P.1-7.
18. Демин Ю.К., Картавцев С.В. Оценка энергосберегающего потенциала окружающей среды при производстве сжатого воздуха // Промышленная энергетика. 2013. №1. С. 6-8.
19. Демин Ю.К., Слепова И.О., Картавцев С.В. Электросбережение при разделении воздуха // Электротехнические системы и комплексы. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. №21. С. 290-292.

Поступила в редакцию 19 октября 2016 г.

INFORMATION IN ENGLISH

IMPROVEMENT OF INTERMEDIATE COOLING SCHEME OF COMPRESSED GAS IN INDUSTRIAL GAS SUPPLY SYSTEM AT A METALLURGICAL ENTERPRISE

Yuriy K. Demin

Postgraduate student, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: dyomin.ura@yandex.ru.

Rezeda V. Khasanova

Master's degree student, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: rezed@list.ru.

Evgeniy G. Neshporenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: neshporenkoeg@mail.ru

Sergey V. Kartavtsev

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Thermal and Energy Systems, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia, E-mail: kartavz@mail.ru

The paper describes the improved cooling circuit of compressed gas between the groups of compression stages at large industrial centrifugal compressor units, which makes it possible to save the energy required for compression due to subcooling of the gas to the temperature close to the ambient one in winter and to generate electric energy making use of the exhaust the heat in summer. Energy saving effect was calculated due to the use of liquid air separation products for cooling of compressed gases: air, oxygen and nitrogen. Thermodynamic calculation of costs for compression of technical gases for the full cycle of metallurgical production of steel was carried out for different types of drives of centrifugal compressors; the cycle included compression, air separation, blast furnaces operation, gaseous oxygen and nitrogen separation. Estimated specific energy consumption depends on cooling the compressed gas between groups of stages of compression in industrial centrifugal compressor units and the injection of liquid products of air separation in a stream of compressed gas with the type of compressor drives, for example the climatic conditions of OJSC "MMK" location.

Keywords: Energy saving, energy efficient scheme, centrifugal compressor, drive type, compression work, heat, intermediate cooling, organic Rankine cycle.

REFERENCES

1. Koptsev V.V. The reduction of energy consumption in the operation of the gas bell-type furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 2, pp. 53-56. (In Russian)

2. Nikiforov G.V., Oleynikov V.K., Zaslavets B.I. *Energoberezhenie i upravlenie energopotrebleniem v metallurgicheskoy proizvodstve* [Energy saving and energy management in metallurgical production]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 2003. 282 p.
3. Zaslavets B.I. Malafeev A.V. Yagol'nikova E.B. The reduction of tariffs for electricity transmission through reactive power compensation. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2013, no. 2, pp. 75-80. (In Russian)
4. Kalinin N.V., Kabanova I.A., Galkovskiy V.A., Kostyuchenko V.M. *Sistema vozdukhosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy* [The air supply system of industrial enterprises]. Smolensk, Smolensk branch of MPEI (TU), 2000. 122 p.
5. Demin Yu.K., Slepova I.O., Khasanova R.V., Kartavtsev S.V. Economical compressors. *Energopodzor* [Energy oversight], 2015, no. 4, pp. 14-16. (In Russian)
6. Mathew Aneke, Meihong Wang. Potential for improving the energy efficiency of cryogenic air separation unit (ASU) using binary heat recovery cycles. *Applied Thermal Engineering*. 2015, vol. 81, pp. 223-231.
7. Kosmadakis G., Manolakos D., Papadakis G. Experimental investigation of a low-temperature organic Rankine cycle (ORC) engine under variable heat input operating at both subcritical and supercritical conditions. *Applied Thermal Engineering*. 2016, vol. 92, pp. 1-7.

8. Voskobeynikov V.G. *Metallurgiya stali* [Metallurgy of steel.]. Moscow, IKC Publ., 2005. 768 p.
9. Sperkoch I.E., Kurunov I.F. Reserves of intensification of blast furnace process. *Metallurg* [Metallurgist], 2005, no. 2, pp. 33-37. (In Russian)
10. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V. The increase of the gas flow in blast furnace with increased total pressure differential along the height of the furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 1, pp. 14-16. (In Russian)
11. Sibagatullin S.K., Mayorova T.V., Polinov A.A. On the effect of changing parameters of gas state on the value of his work in blast furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 4, pp. 34-37. (in Russian)
12. Parsunkin B.N., Senichkin B.K., Andreev S.M., Ryabchikov M.Yu. Increased productivity of the blast furnace in the optimization of automatic control of supply of natural gas and technical oxygen in the blast. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of the Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2011, no. 4, pp. 63-73. (In Russian)
13. Belyakov V.P. *Kriogennaya tekhnika i tekhnologiya*. [Cryogenic engineering and technology]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1982. 272 p.
14. Evstigneev V.L., Mayorova T.V., Ryabchikov M.Yu. The application of the balance model for the stabilization of indicators of the blast furnace. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2006, no. 3, pp. 30-33. (In Russian)
15. Sibagatullin S.K., Kharchenko A.S., Polinov A.A., Semenyuk M.A., Beginyuk V.A. The results of the joint use of blast furnace coke nut with a simultaneous improvement of a skip coke quality. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2010, no. 2, pp. 24-27. (In Russian)
16. Gladskikh V.I., Grom S.V., Permyakov A.B., Khasanov N.I. Iron ore base of JSC "Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2007, no. 2, pp. 13-16. (In Russian)
17. Sahar Safarian, Fereshteh Aramoun. Energy and exergy assessments of modified Organic Rankine Cycles. *Energy Reports*. 2015, vol. 1, pp. 1-7.
18. Demin Yu.K., Kartavtsev S.V. Evaluation of energy saving potential of the environment in the production of compressed air. *Promyshlennaya energetika* [Industrial energy], 2013, no. 1, pp. 6-8. (In Russian)
19. Demin Yu.K., Slepova I.O., Kartavtsev S.V. Saving in the separation of air. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes]. Magnitogorsk, Nosov Magnitogorsk State Technical University Publ., 2013, no. 21. pp. 290-292. (In Russian)

Дёмин Ю.К., Хасанова Р.В., Нешпоренко Е.Г., Картавец С.В. Совершенствование схемы промежуточного охлаждения сжимаемого газа в системе снабжения техническими газами металлургического производства // *Электротехнические системы и комплексы*. 2017. №1(34). С. 37-43. doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43

Demin Yu.K., Khasanova R.V., Neshporenko E.G., Kartavtsev S.V. Improvement of Intermediate Cooling Scheme of Compressed Gas in Industrial Gas Supply System at a Metallurgical Enterprise. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no.1(34), pp. 37-43. (In Russian) doi: 10.18503/2311-8318-2017-1(34)-37-43