

Агапитов Е.Б.<sup>1</sup>, Михайловский В.Н.<sup>1</sup>, Даутов Р.Н.<sup>2</sup>, Каблукова М.С.<sup>1</sup>, Агапитов А.Е.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

<sup>2</sup>ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат»

### ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПАРОВОЗДУХОДУВНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ ПРИ РЕШЕНИИ МНОГОЦЕЛЕВЫХ ЗАДАЧ

В работе проведен анализ работы паровоздуховой электростанции в структуре энергохозяйства металлургического предприятия, определены пути повышения энергоэффективности. Предложены зависимости, связывающие мощность турбогенераторов от параметров паровой нагрузки для зимнего и летнего периодов работы станции, которые используются для построения математической модели работы ПВЭС.

**Ключевые слова:** паровоздуховая электростанция, металлургическое предприятие, энергетические ресурсы, анализ данных.

#### ВВЕДЕНИЕ

Электростанции промышленных предприятий, в частности ОАО «ММК» выполняют одновременно несколько функций. Так, паровоздуховая электростанция (ПВЭС) отпускает сжатый воздух для доменных печей, вырабатывает электроэнергию и технологический пар для паровых сетей и является буферным потребителем для использования вторичных энергоресурсов - доменного и коксового газа. В этих условиях задача минимизации удельных расходов топлива на выработанную единицу электроэнергии или произведенного котлами пара, что характерно для обычных электростанций, часто отходит на второй план по сравнению с задачами обеспечения энергоносителями потребностей технологии основного металлургического производства.

На фоне дополнительно возникающих экономических задач оптимальное управление работой станции приобретает признаки неопределенности и ориентируется лишь на решение локальных проблем.

Для поиска глобальных оптимумов необходима адекватная математическая модель, которая описывает текущее технико-экономическое поведение станции. Типовым приемом в этом случае является построение моделей на основе анализа статистической информации. При этом оценка качества этой информации является самостоятельной задачей. Информационные потоки в производственных условиях поступают одновременно, дискретность анализируемой информации также различна. Так, расходы пара от котлов и его параметры - температуру и давление можно диагностировать в онлайн-режиме, а вот объемы дымовых газов от котлов определяются лишь расчетным путем. При работе котлов на смесях природного, коксового и доменного газов - непрерывно измеряются их расходы, а текущая калорийность газов не диагностируется, что может давать погрешность в оценке теплового баланса котла до 10% [2].

Рассмотрим в качестве примера ПВЭС-1 ОАО «ММК» (рис. 1).

Пар, вырабатываемый котлами, подается в линию из двух паропроводов, при этом в эти же паропроводы подается пар с другого блока станции в количестве 50 т/ч (по 25 т/ч в каждый паропровод) летом и 60 т/ч зимой. Из имеющихся редукционно-охладительных установок (РОУ) одна находится в постоянной работе с пропуском пара в зимний период 10 – 15 т/ч. Основной задачей работы станции является подача воздушного доменного дутья с давлением  $P=3 \text{ кг/см}^2$ , поэтому подача пара от котлов на 5 турбовоздуховодов является приоритетной задачей и выпадает из перечня параметров для оптимизации. При этом расход дутья определяется производственной программой доменного цеха. В связи с чем расход пара на турбовоздуховоды не является фиксированной величиной.

При поэтапном решении оптимизационных задач необходимо определить, что же является целью оптимизации - сокращение удельного расхода топлива на кВт/ч выработанной электроэнергии, снижение расхода покупного газа при работе на смеси с промышленными газами, снижение себестоимости отпущенного дутья или поиск режимов максимальной выработки электроэнергии.

#### МЕТОДИКИ

Турбогенераторы электростанции оснащены противодавленческими турбинами, работа которых связана с изменением работы паровых сетей предприятия. Рассмотрим работу турбоагрегатов станции в летний и зимний период.

Анализ выработки электроэнергии генераторами ТГ-1 и ТГ-2 представлен на рис. 2, 3.

Номинальная мощность ТГ-1 - 6 МВт, а ТГ-2 - 4 МВт. Оба турбогенератора не выходят на номинальный режим выработки электроэнергии, и одной из задач оптимизации работы станции является поиск возможностей роста производства электроэнергии [6].

В таблице представлены обработанные данные по работе турбины (ТГ №2 ПВЭС-1 в летний период).

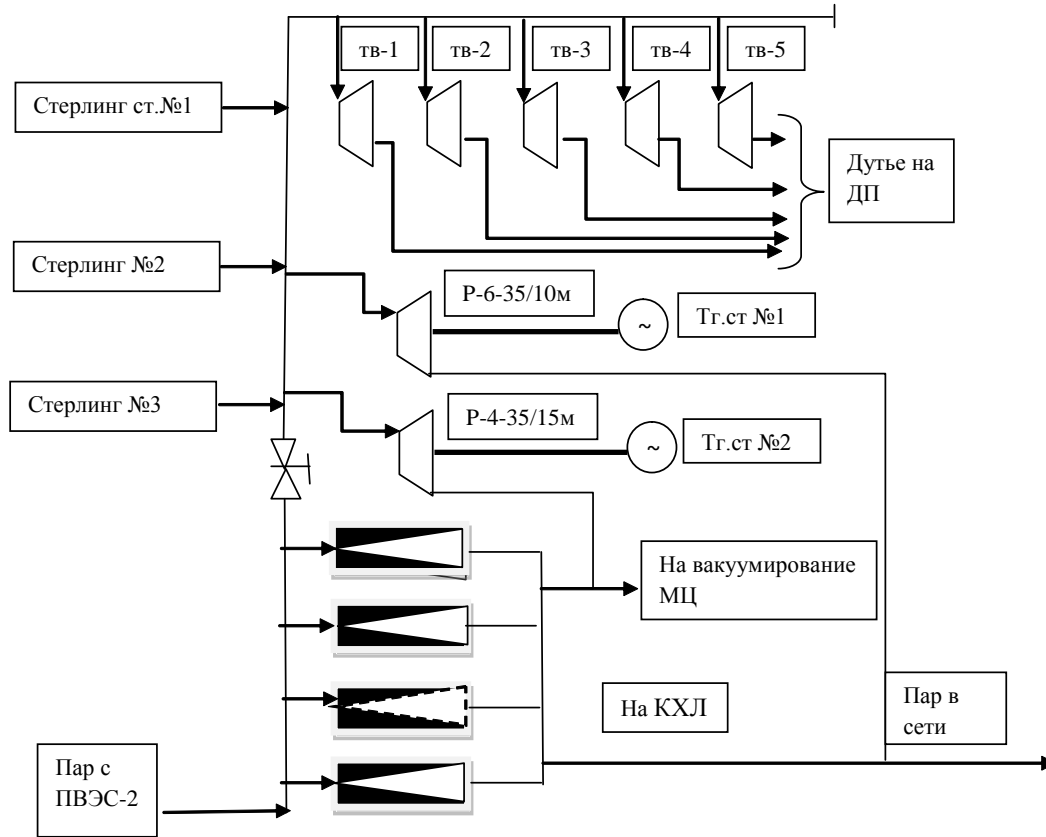


Рис. 1. Принципиальная схема ПВЭС – 1 ОАО ММК

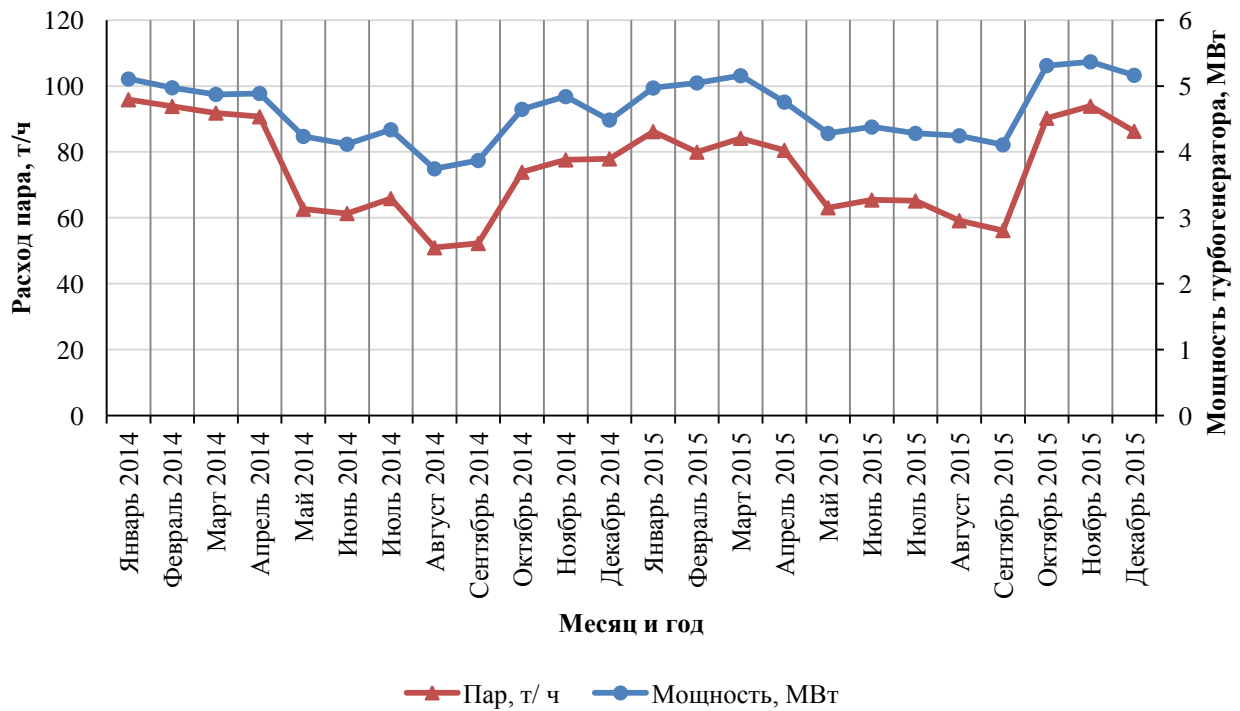


Рис. 2. Зависимость электрической мощности турбоагрегата ТГ-1 от расхода пара

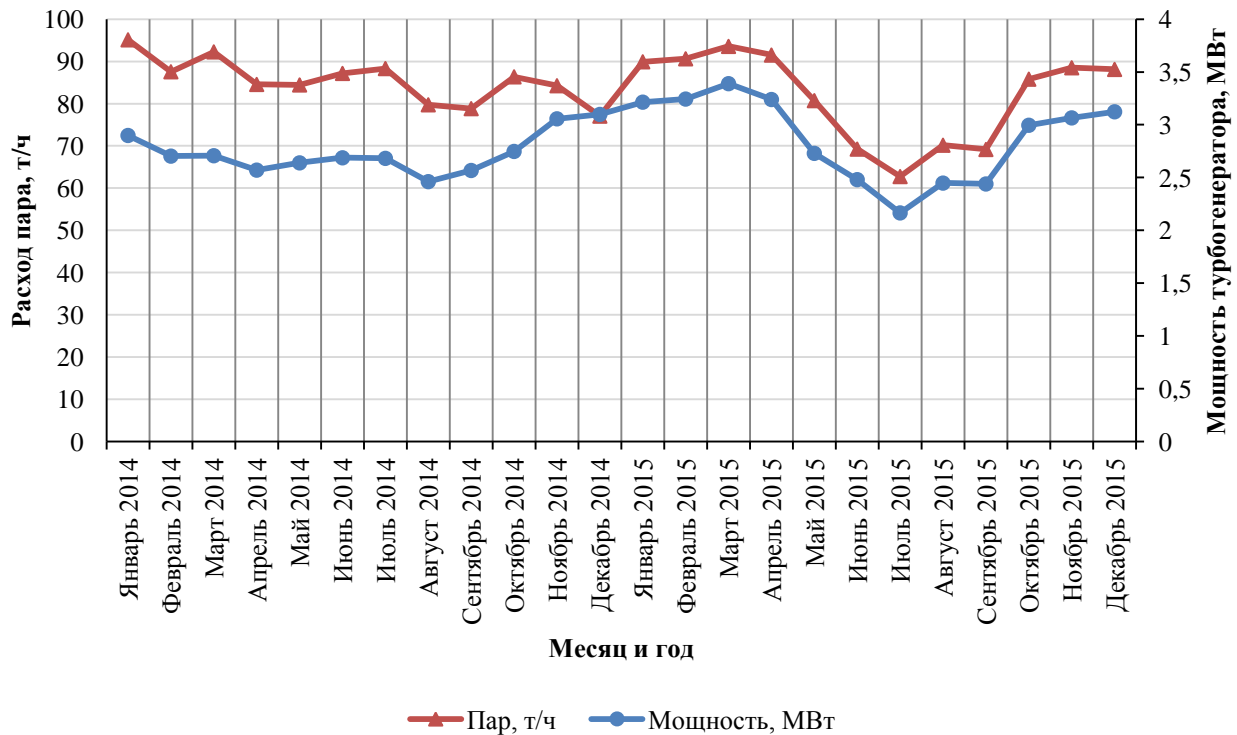


Рис. 3. Зависимость электрической мощности турбоагрегата ТГ-2 от расхода пара

Работа ТГ №2 блока 1 в летний период

| Месяц, год    | Средняя нагрузка, МВт | Расход пара на турбины, т/ч | Перепад давления, ати | Перепад температур, °С |
|---------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------|------------------------|
| Май 2014      | 2,6                   | 84,4                        | 15,0                  | 66,0                   |
| Июнь 2014     | 2,7                   | 87,2                        | 15,0                  | 66,0                   |
| Июль 2014     | 2,7                   | 88,3                        | 15,1                  | 78,0                   |
| Август 2014   | 2,5                   | 79,8                        | 15,1                  | 77,0                   |
| Сентябрь 2014 | 2,6                   | 78,8                        | 15,2                  | 80,3                   |
| Май 2015      | 2,7                   | 80,7                        | 15,9                  | 85,6                   |
| Июнь 2015     | 2,5                   | 69,3                        | 15,5                  | 80,7                   |
| Июль 2015     | 2,2                   | 62,8                        | 16,1                  | 81,7                   |
| Август 2015   | 2,4                   | 70,2                        | 16,2                  | 81,2                   |
| Сентябрь 2015 | 2,4                   | 69,2                        | 16,4                  | 80,2                   |

Уравнение для зимнего периода

$$N_1 = 0,002B + 0,135P + 0,009T + 0,001. \quad (1)$$

Уравнение для летнего периода

$$N_2 = 0,023B + 0,097P + 0,003T - 1,035, \quad (2)$$

где  $N_1, N_2$  – средняя мощность турбогенератора, МВт;  $B$  – расход пара на турбины, т/ч;  $P$  – перепад давления пара между входом и выходом из турбины, ати;  $T$  – перепад температур пара между входом и выходом из турбины, °С.

Средняя мощность ТГ-2 зимой находится на уровне 3 МВт, летом – 2,5 МВт, хотя номинальная мощность – 4 МВт. Было замечено, что в зимний период наблюдаются более высокие коэффициенты корреляции между

средней нагрузкой, перепадом давлений и перепадом температур пара до и после турбины (около 0,8). В летний же период с таким высоким коэффициентом коррелирует только расход пара на турбину и средняя нагрузка. Вероятно, в летний период на нестабильность параметров пара в сети станции в большей мере сказывается подача пара с нестабильными характеристиками от блока ПВЭС-2 [1].

Таким образом, чтобы поднять среднюю мощность турбогенераторов, нужно увеличивать не только расход пара на турбины, что очевидно, но и, в рамках технических возможностей, перепад давления и температуры пара на турбине турбогенератора. Так как турбины противодавленческие, то анализ полученных зависимостей позволяет оценить на сколько нужно изменить давление пара в заводской сети, чтобы вывести

турбины на номинальный режим. Заводская паровая сеть имеет сложную конфигурацию, связана с источниками пара различного давления и параметров, тем не менее имеет возможность управления параметрами пара в локальных участках.

Задав номинальную мощность турбогенераторов, получим задачу линейного программирования на основе уравнений (1) и (2), решением которой и будет режим работы станции, который обеспечит её выполнение. Например, для повышения мощности турбогенератора ТГ-2 в среднем на 0,5 МВт, нужно, чтобы режим работы турбины имел следующие параметры:

$B=80$  т/ч,  $\Delta P=19$  ати;  $\Delta T=100^\circ\text{C}$  – в летний период;  
 $B=95$  т/ч,  $\Delta P=18$  ати;  $\Delta T=85^\circ\text{C}$  – в зимний период.

Анализ существующих режимов показывает, что достижение этой задачи должно осуществляться с нескольких сторон – в направлении поиска путей повышения расхода пара и его параметров перед турбиной и возможностей снижения параметров пара в паровой сети.

В случае, когда котлы работают на общего потребителя. резервы повышения эффективности, экономии газа и электроэнергии заключаются в оптимальном распределении нагрузок между котлами [3]. Можно принять, что характеристики котлов станции идентичны, нагрузки ниже номинальных. Как известно, при пониженных нагрузках наблюдается максимальное значение КПД в области 60 – 75 %, однако для котлов ПВЭС-1 режим снижения нагрузки до такого уровня не характерен. Так как котлы работают на газовых смесях при существенном снижении нагрузки уменьшаются скорости истечения газов и воздуха, ухудшается их смешение и могут возникнуть потери с химической неполнотой сгорания. Абсолютные потери теплоты через обмуровку остаются при этом практически неизменными, а относительные (отнесенные на единицу расхода топлива) – возрастают.

Для каждого котлоагрегата может быть построена расходная характеристика, связывающая расход топлива с количеством выработанного пара или тепловой энергии. Расходные характеристики котлоагрегатов, вид которых приведен на рис.4, можно выразить в виде функциональных зависимостей:  $B_1=f(D_1)$ ,  $B_2=f(D_2)$  и  $B_3=f(D_3)$ , где  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  – часовой расход условного топлива соответственно котлами №1, 2и 3;  $D_1$ ,  $D_2$ ,  $D_3$  – паро- или теплопроизводительность этих котлов [9].

Суммарная выработка пара (тепловой энергии) в единицу времени тремя котлами составляет  $D_\Sigma$ . Если котел №1 загружен до значения  $D_1$ , то загрузка котла №2 составит  $D_3=D_\Sigma-D_1-D_2$ . Следовательно,  $B_1=f(D_1)$  и  $B_2=f(D_2)$ ,  $B_3=f(D_\Sigma-D_1-D_2)$

Суммарный расход топлива на три котла составит

$$B_\Sigma = B_1 + B_2 + B_3 = f(D_1) + f(D_2) + f(D_\Sigma - D_1 - D_2). \quad (3)$$

Для того чтобы расход топлива  $B_\Sigma$  был наименьшим (оптимальным), необходимо, чтобы первая производная суммы в правой части уравнения, взятая по нагрузке любого из котлов, равнялась нулю, а вторая производная была положительной. Таким образом, условие минимума суммарного расхода топлива  $B_\Sigma$

можно получить в результате дифференцирования вышеприведенного выражения, например, по  $D_1$ , т.е.

$$\begin{aligned} \frac{dB_\Sigma}{dD_1} &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_1} + \frac{dB_3}{dD_1} = \\ &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_2} \frac{dD_2}{dD_1} + \frac{dB_3}{dD_3} \frac{dD_3}{dD_1} = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Производная  $dD_2/dD_1$  может быть определена из условия  $D_1+D_2+D_3=D_\Sigma=\text{const}$ , следовательно,  $dD_1+dD_2+dD_3=0$ . Разделив последнее правую часть выражения  $dD_2/dD_1+dD_3/dD_1=-1$ , получаем

$$\begin{aligned} k_1 \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_2}{dD_2} (-1 - dD_3/dD_1) + \\ + \frac{dB_3}{dD_3} \frac{dD_3}{dD_1} = 0, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $k_1=1$ ;  $k_2=-1-dD_3/dD_1$ ;  $k_3=dD_3/dD_1$ .

Это выражение показывает, что для получения минимального суммарного расхода топлива каждый из котлов должен нести такую нагрузку, при которой наклон касательной к характеристике первого агрегата равен 1, наклон касательной к характеристике второго агрегата равен  $(-1-dD_3/dD_1)$ , наклон касательной к характеристике третьего равен  $dD_3/dD_1$  наклону касательной к характеристике другого агрегата, или  $\text{tg}\alpha_1=1$ ,  $\text{tg}\alpha_2=-1-dD_3/dD_1$ ,  $\text{tg}\alpha_3=dD_3/dD_1$  [10].

Взяв расход топлива на 2 и 3 котлоагрегате  $B_{2,3}=B_2+B_3$ , а их суммарную выработку за  $D_{2,3}=D_2+D_3$ , условие минимума суммарного расхода топлива  $B_\Sigma$  можно получить в результате дифференцирования вышеприведенного выражения, например, по  $D_1$ , т.е.:

$$\begin{aligned} \frac{dB_\Sigma}{dD_1} &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_{2,3}}{dD_1} = \\ &= \frac{dB_1}{dD_1} + \frac{dB_{2,3}}{dD_{2,3}} \frac{dD_{2,3}}{dD_1} = 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Производная  $dD_{2,3}/dD_1$  может быть определена из условия  $D_1+D_{2,3}=D_\Sigma=\text{const}$ , следовательно,  $dD_1+dD_{2,3}=0$ . Разделив правую часть выражения  $dD_{2,3}/dD_1=-1$ , получаем

$$\frac{dB_1}{dD_1} - \frac{dB_{2,3}}{dD_{2,3}} = 0. \quad (7)$$

Для получения минимального суммарного расхода топлива котлы должны нести такую нагрузку, при которой наклон касательной к характеристике первого агрегата равен наклону касательной к характеристике второго и третьего агрегата, или  $\text{tg}\alpha_1=\text{tg}\alpha_{2,3}$ . Заменив производные в выражении отношениями  $\Delta B$  и  $\Delta D$ , получим условие минимального суммарного расхода топлива:

$$1 + dD_2 / dD_1 = 0$$

или

$$dD_2 / dD_1 = -1.$$

$$\Delta B_1 / \Delta D_1 = \Delta B_{2,3} / \Delta D_{2,3}. \quad (8)$$

Так как котлоагрегаты близки по паропроизводительности, то для выработки одного и того же количества пара (тепловой энергии)  $D$  каждым котлом требуется одинаковый расход топлива  $B=f(D)$ , и между одинаковыми котлоагрегатами суммарная нагрузка должна распределяться поровну [5].

Проведя аналогичные рассуждения, формируется система уравнений [8]

$$\begin{cases} \Delta B_1 / \Delta D_1 = \Delta B_{2,3} / \Delta D_{2,3}; \\ \Delta B_2 / \Delta D_2 = \Delta B_{1,3} / \Delta D_{1,3}; \\ \Delta B_3 / \Delta D_3 = \Delta B_{1,2} / \Delta D_{1,2}, \end{cases} \quad (9)$$

где  $\Delta B_{1,3}$  – суммарный прирост топлива на 1 и 3 котлоагрегате;  $\Delta B_{1,2}$  – суммарный прирост топлива на 1 и 2 котлоагрегате;  $\Delta D_{1,3}$  – прирост паропроизводительности на 1 и 3 котлоагрегате;  $\Delta D_{1,2}$  – прирост паропроизводительности на 1 и 2 котлоагрегате.

Реальная ситуация – более сложная, т.к. характеристики котлоагрегатов ПВЭС-1 отличаются друг от друга, особенно при изменении калорийности газовой смеси, что требует при поиске вариантов перераспределения нагрузки между котлами применения в уравнении (7) приема балльных оценок [7].

Для построения адекватной производственно – технологической модели лучше всего подходит модель на основе энергетического баланса станции, где все энергетические потоки были бы представлены в сопоставимых единицах. При кажущейся простоте такая задача имеет множество неопределенностей [4].

Поступление горючих топлив на станцию фиксируется в текущем режиме в м<sup>3</sup>/ч, что предполагает возможность составления мгновенного теплового баланса по газам и пару, однако замеры калорийности газов в онлайн-режиме не производятся и в отчетной документации фигурируют лишь среднемесячные показатели. Анализ показал, что среднемесячное колебание калорийности природного газа составляет 0,6-0,8%, доменного – 9-12%, коксового – 8-9%. Объем отходящих газов в этом случае точно рассчитать невозможно, т.к. неизвестен текущий состав горючих газов, а для оценки потерь тепла с дымовыми газами необходимо знать их энтальпию и состав. Несмотря на то, что температура дымовых газов от котлов измеряется в онлайн-режиме, точность оценки среднemasсовой температуры потока газов может отличаться от измеренной на 3-5%. Статистическая обработка производственных данных дает возможность оценить производственные взаимосвязи между агрегатами станции и границы решения новых задач, но не позволяет строить стратегию управления энергоресурсами. Для решения оптимизационных задач необходимо привлекать математические модели более высокого уровня, которые адаптируются на конкретные технологические условия. Новым подходом к поиску глобального оптимума выбора соотношений между количеством природного газа и

вторичными энергоресурсами (ВЭР) является решение локальных оптимизационных задач с последующим объединением решений и формулировкой критериальных оценок, исходя из стратегических технико-экономических задач функционирования всего промышленного предприятия [7].

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В результате статистической обработки производственных данных по ПВЭС-1 ОАО «ММК», оснащенных турбинами противодавления, найдена регрессионная зависимость между электрической мощностью, параметрами пара на входе в турбину и параметрами пара в паровой сети предприятия как для условно-летнего, так и для условно-зимнего периода эксплуатации.

2. Составлена математическая модель связи прироста паропроизводительности паровоздуховодной станции с тремя однотипными котлами с расходом условного топлива, обеспечивающая минимизацию удельного расхода при решении задачи роста выработки электроэнергии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агапитов Е.Б., Агапитов А.Е. Математическое обеспечение программного модуля Grid-системы оценки эффективности работы электростанций на металлургическом предприятии // Электротехнические системы и комплексы. 2015. №4(29). С.25-30.
2. Агапитов А.Е., Агапитов Е.Б. К вопросу оценки риска окупаемости инвестиций в модернизацию электростанций металлургического предприятия // XV Международная научно- практическая конференция «Менеджмент XXI века: антикризисные стратегии и управление рисками», 24-26 ноября 2015г.: сб. науч. статей. С.-Петербург: ФГБОУ ВПО «РГПУ им. А.И.Герцена», 2015. С.171-175.
3. Агапитов Е.Б., Каблукова М.С. Моделирование горения газообразных ВЭР металлургического предприятия в топках компактных паровых котлов // Энергетики и металлургии настоящему и будущему России: материалы 15-й Всерос. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. С.59-62.
4. Бернас С., Цек З. Математические модели элементов электроэнергетических систем: пер. с польск. М.: Энергоиздат, 1982. 312 с.
5. Копцев Л.А. Оптимизация энергобаланса собственных электростанций ОАО «ММК» // Энергосбережение на промышленных предприятиях: материалы второй Международ. науч.-техн. конференции. Магнитогорск, 2000. 323 с.
6. Уилкс С. Математическая статистика / пер с англ. А.М. Кагана; под ред. Ю.Б. Линника. М.: Наука, 1967. 632 с.
7. Мунц В.А.. Энергосбережение в энергетике и теплотехнологиях. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2006. 136 с.
8. Energy and waste management in the steel industry. Met. Plant and Techn. Int. 1997. 20, no.6.
9. Energy Enviromental Management System (EEMS). Voest-Alipine. Industrialagenbaum. 1998. 45 p. Picandet L. Temperature control using fuzzy logic. Application note.
10. Fridlung, A.J. Sophisticated STATISTICA Is a Slick Jack-of-all-trades. Info World. 1995.

Поступила в редакцию 04 апреля 2016 г.

## INFORMATION IN ENGLISH

## IMPROVING THE EFFICIENCY OF TBS POWER PLANT OF METALLURGICAL ENTERPRISE IN SOLVING MULTI-OBJECTIVE PROBLEMS

Evgeniy B. Agapitov

D.Sc.(Eng.), Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: jek\_agapitov@mail.ru.

Vladimir N. Mikhaylovskiy

Ph.D.(Eng.), Associate Professor, Power Engineering and Automated Systems Institute, Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Rinat N. Dautov

OJSC "MMK", Magnitogorsk, Russia.

Margarita S. Kablukova

Teaching Assistant, Power Engineering and Automated Systems Institute, Heat and Electrical System Engineering Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Artem E. Agapitov

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

The paper describes the analysis of the TBS power plant operation in the structure of the power supply system at a metallurgical enterprise and determines the ways of energy efficiency improving. Some relationships were offered, which reflect the dependence between the power of turbine-generators and parameters of steam load for summer and winter periods of the station operation; the relationships can be used to develop mathematical models of the station operation.

**Keywords:** TBS, steel plant, energy resources, analysis of data.

## REFERENCES

1. Agapitov E.B., Agapitov A.E. Software of Program Module Grid-system for Evaluating the Performance of Power Plants at Metallurgical Enterprises. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical systems and complexes], 2015, no.4 (29), pp.25-30. (In Russian).
2. Agapitov A.E., Agapitov E.B. Risk Assessment of Return on Investment in Enhancement of Power Plants at Metallurgical Enterprise. *XV Mezhdunarodnaya nauchno- prakticheskaya konferentsiya «Menedzhment KhKh1 veka: antikrizisnye strategii i upravlenie riskami», 24-26 noyabrya 2015g.: sb. nauch. statey* [XV International scientific and practical conference "Management of XXI century: anti-crisis strategy and risk management", November 24-26, 2015, collection of scientific articles], 2015, pp.171-175. (In Russian).
3. Agapitov, E.B., Kablukova M.S. Modeling of Gaseous VER Burning at Metallurgical Enterprise in Furnaces of Compact Boilers. *Energetiki i metallurgi nastoyashchemu i budushchemu Rossii: materialy 15 y Vseros. nauch.-prakt. konf* [Power engineering and metallurgy of present and future of Russia: Proceedings of 15th All-Russian scientific-practical Conf]. Magnitogorsk, Publishing center of Nosov Magnitogorsk state technical University, 2014, p. 59 - 62. (In Russian).
4. Bernes C., Zec Z. *Matematicheskie modeli elementov elektroenergeticheskikh sistem* [Mathematical Models of Elements of Electric Power Systems]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 312 p.
5. Koptsev L.A. Optimizing the Energy Mix of Internal Power Plants of OJSC "MMK". *Energoberezhenie na promyshlennykh predpriyatiyakh: materialy vtoroy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konferentsii* [Energy saving in industry: Proceedings of the Second International Scientific and Technical Conference]. Magnitogorsk, 2000. 323 p. (In Russian).
6. Uilks S. *Matematicheskaya statistika* [Mathematical Statistics]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 632 p.
7. Munz V.A. *Energoberezhenie v energetike i teplotekhnologiyakh* [Energy Saving in Energy and Heat Technologies]. Yekaterinburg, Ural State Technical University Publ., 2006. 136 p.
8. Energy and waste management in the steel industry. *Met. Plant and Techn. Int.* 1997. 20, no.6.
9. Energy Environmental Management System (EEMS). Voest-Alipine. Industrialagenbaum. 1998. 45 p. Picandet L. Temperature control using fuzzy logic. Application note.
10. Fridlung, A.J. Sophisticated STATISTICA Is a Slick Jack-of-all-trades. Info World. 1995.