

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№ 3 (2021)

Павлодар

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания
№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/ADSD2201>

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

к.т.н., доцент

Заместитель главного редактора

Талипов О. М., *доктор PhD, доцент*

Ответственный секретарь

Приходько Е. В., *к.т.н., профессор*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я., *д.т.н., профессор*
Новожилов А. Н., *д.т.н., профессор*
Никитин К. И., *д.т.н., профессор (Россия)*
Никифоров А. С., *д.т.н., профессор*
Новожилов Т. А., *к.т.н., доцент (Россия)*
Оспанова Н. Н., *к.п.н., доцент*
Нефтисов А. В., *доктор PhD, доцент*
Шокубаева З. Ж. *технический редактор*

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

***В. Ф. Хацевский**

Торайгыров университет,
Республика Казахстан, г. Павлодар

ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

В данной статье представлен анализ текущего состояния отечественной и мировой практики эксплуатации существующих потребителей электрической энергии характеризующийся тем, что возникает напряженный энергетический баланс, наиболее выраженный в осенне-зимний период, когда потребность в электроэнергии значительно возрастает. Питающие энергосистемы вынуждены ограничивать энергопотребление за счет наиболее энергоемких потребителей, к числу которых относятся основные металлургические предприятия со сверхмощными рудовосстановительными печами (РВП). Представлены различные методы согласования графиков нагрузок, включающих снижение потребляемой мощности РВП до меньшего значения, чем номинальная мощность. Рассмотрено решение проблемы оптимизации эксплуатационных характеристик сверхмощных рудовосстановительных электропечей и даны рекомендации для реальной практики. Разработаны рекомендации для создания многокритериальной математической модели, состоящей из двух многофункционально связанных между собой структур – пространства параметров с областью, внутри которой выполняются все требования к показателям качества, производительности и удельного расхода электроэнергии, и пространства критериев с областью, ограниченной требованиями безаварийной эксплуатации оборудования.

Ключевые слова: рудовосстановительная печь, ограничения мощности, производительность, режимы работы, газоплазменная область.

Введение

Анализ отечественной и мировой практики эксплуатации существующих потребителей электрической энергии показывает, что в связи с суточной

неритмичностью работы промышленных предприятий, ростом потребления электроэнергии в быту и сельскохозяйственном производстве во многих питающих энергосистемах возникает напряженный энергетический баланс, наиболее выраженный в осенне-зимний период, когда потребность в электроэнергии возрастает [1, 5]. По мере роста потребления электроэнергии происходит увеличение неравномерности графиков нагрузки энергосистем и если не проводить мероприятия по рациональному использованию электроэнергии, необходимо иметь значительный резерв генерирующих мощностей и обеспечивать определенные требования к маневренности электростанций.

В связи с этим питающие энергосистемы вынуждены производить лимитированный отпуск электроэнергии и в часы максимальных нагрузок ограничивать энергопотребление за счет наиболее энергоемких потребителей. К числу таких потребителей относятся металлургические предприятия со сверхмощными рудовосстановительными печами (РВП), установленными группами до 10 электропечей с единичной мощностью от 20 до 90 МВА [1].

Существующие ограничения энергопотребления предприятий с РВП приводят к сокращению выпуска продукции, перерасходу электроэнергии [3, 5], снижению надежности работы высокопроизводительного технологического оборудования и в результате – к значительному экономическому ущербу.

Материалы и методы

Практика отключения отдельных РВП при возникающих ограничениях энергопотребления показала, что за счет большой тепловой инерционности электропечей и значительного уровня аккумулированной энергии в принципе возможно их отключение на контролируемый период времени. Однако последующее безаварийное введение электропечей в рабочие режимы требуют существенных затрат электроэнергии и выполнения трудоемких работ с потерей производственного времени [1].

Использование методов согласования графиков нагрузок, включающих снижение потребляемой мощности РВП до меньшего значения, чем номинальная мощность, осложняется возникновением аварийных ситуаций и отсутствием методов анализа таких режимов работы РВП. Сложность происходящих в этих печах процессов, взаимосвязь многих зависящих друг от друга факторов до настоящего времени не позволили создать единую общепризнанную электротехнологическую методику расчета параметров РВП [1]. При рассмотрении проблемы превалирует эмпирический подход, основанный на количественно взаимосвязанных критериях геометрического, электрического и технологического подобия электропечей. Поэтому существующие методы перерасчетов параметров РВП не позволяют даже приблизительно производить оценку изменения параметров работы

агрегатов в нестандартных режимах при переводе конкретных электропечей из номинального режима в квазистационарный режим с пониженной мощностью.

Производство продукции в современных РВП основано на комплексных электротехнологических процессах, которые определяются нелинейными взаимосвязями электрических, термодинамических, химических, газо- и гидродинамических параметров, самоустанавливающихся в рабочем пространстве электропечей. Сложность протекания взаимосвязанных процессов определило развитие теории РВП на основе критериев подобия, которые позволяют провести перерасчет параметров оптимальных квазистационарных режимов с номинальной мощностью «образцовой» электропечи для электропечей большей мощности с определением номинальных электрических параметров квазистационарного режима и, что особенно важно, новых геометрических размеров рабочего пространства и электродов для осуществления этих режимов [1].

Для разработки методов длительной эксплуатации РВП в режимах, существенно отличающихся от номинальных с сохранением нормального хода технологического процесса, были проведены исследования нестационарных режимов на промышленных электропечах [5] изменений энергораспределений между различными областями рабочего пространства РВП. Эти изменения определяются электрическими и тепловыми процессами и, следовательно, объемнораспределенными активными и реактивными сопротивлениями этих областей. При анализе нестационарных режимов работы РВП установлено, что при снижении вводимой мощности происходят изменения электрических, тепловых и технологических процессов, которые включают последовательные периоды по времени протекания с существенно различающимися постоянными времени протекания процессов, определяющих эти периоды режима. Установлены следующие закономерности развития указанных процессов [5]:

1 Для обеспечения нормального хода технологического процесса при любых мощностях необходимо существование самоподдерживающихся газоплазменных подэлектродных областей (закрытой теплоизолированной дуги). При снижении вводимой мощности в подэлектродное пространство уменьшается объем газоплазменной полости с сохранением геометрического подобия, идентичности состава газовой среды, постоянства температуры с последующим самоустанавливающимся квазиравенством объемных плотностей энергии в газоплазменной полости за счет изменения ее объема. В номинальном режиме, когда обеспечивается соотношение $U_{пол} = C P_n$ при $n = 0,33$ (для выплавки FeSi), напряжение на дуге прямо пропорционально

току в узком интервале параметров, когда обеспечивается электрическое, геометрическое и температурно–технологическое подобие.

2 Сопротивление дуги шунтируется стенками реакционного тигля (RT) и шихтой между электродами и стенкой проводящей футеровки (Rш и Rст). При снижении мощности сопротивление реакционного тигля (RT) в нестационарных режимах становится основным шунтирующим каналом [1].

Изменение по времени $RT = f(\tau)$ определяется изменением температурного поля; постоянная времени изменения процесса $\tau > 600$ с. Эта область является определяющей для производительности РВП, самоподдерживает оптимальные технологические температуры, а нормальный ход технологического процесса возможен при $qS \gg 0$.

3 Используя известные методологические подходы [7–9], обработка экспериментальных результатов показала, что в квазиустановившихся режимах работы исследованных электропечей формы кривых общего тока и напряжения в электрической цепи, содержащей дугу (Rд) и активные линейные сопротивления RT, Rш, Rст, являются суммами характерных форм тока и напряжения дуги [2], а формализованная динамическая вольтамперная характеристика (ВАХ) состоит из двух линейных участков.

В начальный период уменьшения вводимой мощности путем снижения напряжения от U_t до $U_t(1)$ температурное поле в реакционном пространстве из-за инерционности не изменится, напряжение зажигания теплоизолированной дуги ($U_{зж}$) близко к квазипостоянной величине. Продолжительность неустановившегося режима определялась при проведении экспериментов по изменению образующихся продуктов (производительности) и по изменению состава и температуры отходящих газов.

Анализ режимов работы показывает, что для действующей РВП при изменении мощности P в переходном режиме и в последующем – квазиустановившемся, необходимо изменять соотношения составляющих шихты: $СMeO$ – состав шихты в реакционной зоне (содержание MeO в шихте), q коксык – расход электроэнергии на единицу массы коксика, участвующего в эндотермической реакции с учетом теплосодержания покидающих зону компонентов (производительности печи) [5].

Результаты и обсуждения

Выполненные обобщенные исследования фактических и возможных режимов эксплуатации РВП в периоды времени, включающие ограничения потребляемых мощностей, показали, что снижение потребляемой мощности предприятиями с РВП при ограничениях энергопотребления может производиться различными способами: отключение одной или нескольких печей на весь период ограничений, поочередное отключение

печей на незначительные периоды времени, частичное снижение мощности печи или группы печей на весь период ограничений. Каждый из этих способов сопровождается различным развитием нестационарных режимов, обеспечивающих безаварийный уровень эксплуатации оборудования.

Для выявления фактических режимов ограничения потребляемых мощностей рассмотрены РВП как коллективные, так и как индивидуальные потребители энергии; проведен расчетно-статистический анализ производственно-технологических документов за пять лет эксплуатации электропечей типа РК321 и РП363 на трех крупнейших ферросплавных заводах [5].

Разработаны рекомендации для создания многокритериальной математической модели, состоящей из двух многофункционально связанных между собой структур – пространства параметров с областью, внутри которой выполняются все требования к показателям качества, производительности и удельного расхода электроэнергии, и пространства критериев с областью, ограниченной требованиями безаварийной эксплуатации оборудования [3].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 **Хацевский, В. Ф., Гоненко, Т. В., Чердниченко, В. С., Хацевский, К. В.** Ресурсосбережение при эксплуатации рудовосстановительных электропечей. // Вестник ПГУ. – 2010. – № 3, Павлодар. – С. 77–84.

2 **Свенчанский, А. Д., Гуттерман, К. Д.** Автоматическое регулирование электрических печей. – М. : Энергия, 1985. – 479 с.

3 **Чердниченко, В. С., Хацевский, В. Ф.** Проблемы ресурсосбережения при эксплуатации рудовосстановительных электропечей. // Сб. науч. трудов НГТУ «Экологически перспективные системы и технологии. Ресурсосбережение». – 2014. – Вып. 5. – С. 74–86.

4 Промышленные установки электродугового нагрева и их параметры // Под общ. ред. Л. Е. Никольского. – М. : Энергия. 1991. – 272 с.

5 **Хацевский, В. Ф.** Экспериментальные исследования нестационарных режимов работы рудовосстановительных электропечей. // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (12), Новосибирск. – С. 141–150.

6 **Свенчанский, А. Д., Смелянский, М. Я.** Электрические промышленные печи. Часть 2. – М. : Энергия, 1970. – 264 с.

7 **Овчарук, А. Н., Чепеленко, Ю. В., Хитрик, С. И. и др.** Производство ферросплавов. – М. : Металлургия, 1994. – № 3. – С. 14–19.

8 Электрические промышленные печи. Дуговые печи в установках специального нагрева / Под ред. А. Д. Свенчанского. – М. : Энергоиздат, 2006. – 296 с.

9 **Bockman, O. C.** Some experiments with Scale models of electrochemical Society. – 2008. – Vol. 101. – 10. – X-54.

10 **Глишков, М. А.** Основы общей теории печей. – М. : Metallurgiya, 2009. – 295 с.

REFERENCES

1 **Khatsevskiy, V. F., Gonenko, T. V., Cherednichenko, V. S., Khatsevskiy, K. V.** Resyrsosberegenie pri explyatazii rudovosstanovitelnikh electropetchey [Resource saving during operation of ore recovery electric furnaces] // Vestnik PGU. – 2010. – № 3. – Pavlodar. – P. 77–84.

2 **Svenchanskiy, A. D., Gytterman, K. D.** Avtomaticheskoe regyirovanie electrichekikh pechey [Automatic regulation of electric furnaces]. – М. : Energiya, 1985. – 479 p.

3 **Cherednichenko, V. S., Khatsevskiy, V. F.** Problemi resyrsosberegeniya pri eksplyatacii rydovosstanovitelnih electropetchey [Problems of resource saving during operation of ore recovery electric furnaces] // Sb. Naychn. Trydov NGTU «Ecljlgicheski perspektivnie sistemi I tekhnologii. Resyrsosberegenie» – 2014. – Vip. 5. – P. 74–86.

4 Promichlennie ystanovki electrodygovogo nagreva i ich parametric / Pod. obc. Red. L. E. Nikolskogo [Industrial electric arc heating units and their parameters]. – Moscow : Energiya, 1991. – 272 p.

5 **Khatsevskiy, V. F.** Experimentalnie issledovaniya nestatcionarnih regimov raboti rudovosstanovitelnikh electropetchey [Experimental studies of non-stationary operating modes of ore recovery electric furnaces] // Naychniy vestnik NGTU. – 2012. – № 1 (12). – Novosibirsk. – P. 141–150.

6 **Svenchanskiy, A. D., Smelyanskiy, M. Ya.** Electrichekiske promicylennie pechi. Chast 2. [Electric industrial furnaces. Part 2] – Moscow : Energiya, 1970. – 264 p.

7 **Ovcharyk, A. N., Chepelenko, Yu. V., Khitrik S. I. i dr.** Proizvodstvo ferrosplavov [Production of ferroalloys]. – Moscow : Metallurgiya, 1994. – № 3. – P. 14–19.

8 Electrichekiske promicylennie pechi. Dygovie pechi v ystanovkakh spetsialnogo nagreva [Electric industrial furnaces. Arc furnaces in special heating units] / Pod red. Svenchanskogo A. D. – Moscow : Energoizdat, 2006. – 296 p.

9 **Bockman, O. C.** Some experiments with Scale models of electrochemical Society [Some experiments with Scale models of electrochemical Society]. – 2008. – Vol. 101. – 10. – X-54.

10 **Glinkov, M. A.** Osnovy obchey teorii pechey [Fundamentals of the general theory of furnaces] – Moscow : Metallurgiya, 2009. – 275 p.

Материал поступил в редакцию 28.08.21.

**В. Ф. Хацевский*

Торайғыров университеті,
Қазақстан Республикасы, Павлодар қ.
Материал 28.08.21 баспаға түсті.

ҚАЗІРГІ ЗАМАНҒЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКАЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫЛАРДЫ ПАЙДАЛАНУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ

Бұл бапта электр энергиясына қажеттілік едәуір артатын күзгі-қысқы кезеңде анағұрлым айқын көрінетін шиеленісті энергетикалық теңгерімнің туындауымен сипатталатын электр энергиясының қолданыстағы тұтынушыларын пайдаланудың отандық және әлемдік практикасының ағымдағы жай-күйін талдау ұсынылған. Қоректендіруші энергия жүйелері энергия тұтынуды энергияны неғұрлым көп қажет ететін тұтынушылар есебінен шектеуге мәжбүр болады, олардың қатарына қуаты жоғары кенді қалпына келтіру пештері (RVP) бар негізгі металлургиялық кәсіпорындар жатады. RVP тұтынатын қуатын номиналды қуатқа қарағанда аз мәнге дейін төмендетуді қамтитын жүктемелер кестесін келісудің әртүрлі әдістері ұсынылған. Қуаттылығы жоғары кенді қалпына келтіру электр пештерінің пайдалану сипаттамаларын оңтайландыру проблемасын шешу қарастырылып, нақты практика үшін ұсыныстар берілді. Өзара көп функционалды байланысты екі құрылымнан – ішінде электр энергиясының сапа, өнімділік және үлестік шығын көрсеткіштеріне қойылатын барлық талаптар орындалатын саласы бар параметрлер кеңістігінен және жабдықты апатсыз пайдалану талаптарымен шектелген саласы бар өлшемдер кеңістігінен тұратын көп критерийлі математикалық модельді құру үшін ұсынымдар әзірленді.

Кілтті сөздер: кенді қалпына келтіру пеші, қуатты шектеу, өнімділік, жұмыс режимдері, газ плазмалық сала.

**V. F. Khatsevskiy*

Toraighyrov University,
Republic of Kazakhstan, Pavlodar.
Material received on 28.08.21.

PECULIARITIES OF OPERATION OF MODERN ELECTROTECHNOLOGICAL PLANTS

This article presents an analysis of the current state of domestic and world practice of operating existing consumers of electric energy characterized by the fact that a tense energy balance arises, most pronounced in the autumn-winter period, when the demand for electricity increases significantly. Power supply systems are forced to limit energy consumption at the expense of the most energy-intensive consumers, which include the main metallurgical enterprises with super-powerful ore recovery furnaces (RVP). Various methods of matching load schedules are presented, including reduction of TDR power consumption to a lower value than rated power. Various methods of matching load schedules are presented, including reduction of TDR power consumption to a lower value than rated power. The solution of the problem of optimizing the operational characteristics of super-powerful ore recovery electric furnaces was considered and recommendations for real practice were given. Recommendations have been developed for creating a multi-criterion mathematical model consisting of two multifunctionally interconnected structures – a parameter space with an area within which all requirements for indicators of quality, productivity and specific consumption of electricity are met, and a criteria space with an area limited by the requirements of accident-free operation of equipment.

Keywords: ore recovery furnace, power limitations, productivity, operating modes, gas plasma region.

Теруге 28.08.2021 ж. жіберілді. Басуға 11.09.2021 ж. қол қойылды.

Электрондық баспа

2,69 Mb RAM

Шартты баспа табағы 8,11. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Тапсырыс № 3847

Сдано в набор 28.08.2021 г. Подписано в печать 11.09.2021 г.

Электронное издание

2,69 Mb RAM

Усл. печ. л. 8,11. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: З. С. Исакова

Корректор: А. Р. Омарова

Заказ № 3847

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

«Торайғыров университет»

коммерциялық емес акционерлік қоғамы

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

8 (7182) 67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz