

## АНАЛИЗ ФАКТИЧЕСКОГО КПД ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ

Г.П. Корнилов, П.А. Шулепов

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова,  
г. Магнитогорск, Россия

Рассмотрены возможные варианты повышения эффективности дуговой сталеплавильной печи за счет перераспределения объемов используемых энергетических ресурсов. Проведен сравнительный анализ технологических параметров плавки различных марок стали. Рассмотрена методика определения фактического значения коэффициента полезного действия 180-тонной дуговой печи. Предложены варианты повышения значения внутреннего КПД дуговой печи за счет внедрения систем автоматического регулирования объемами подводимых энергетических ресурсов. Рассмотрен вариант регулирования объемов подводимых энергоносителей на основе анализа значений высших гармонических составляющих тока.

*Ключевые слова:* дуговая сталеплавильная печь, энергетическая эффективность, распределение энергоресурсов, коэффициент полезного действия, гармонический состав токов, система автоматического управления, диагностика стадий плавки.

### Введение

В современных электродуговых сталеплавильных печах наряду с основными техническими показателями большое влияние на энергетическую эффективность оказывает коэффициент полезного действия печи [1]. Его значение зависит от количества и видов энергетических ресурсов, используемых в процессе ведения плавки. Для малообъемных печей, которые используют в качестве энергоносителя исключительно электрическую энергию, КПД складывается из собственного КПД печи и затрат на производство и передачу электроэнергии к ней. Для печей больших емкостей, в которых помимо электрической энергии используется природный газ и кислород, также необходимо учитывать затраты на их производство и транспортировку. Таким образом, с увеличением объема печи и количества энергетических ресурсов общий КПД снижается. Другими словами, у сверхмощных дуговых печей технологическое топливное число (ТТЧ) значительно выше, чем у печей средней и малой емкости [2]. Повышение энергетической эффективности возможно за счет рационального способа определения необходимых объемов используемых энергетических ресурсов в каждый момент времени ведения плавки.

Снизить значение ТТЧ и тем самым повысить КПД печи возможно двумя способами. Первый способ заключается в снижении затрат на производство и транспортировку того или иного энергетического ресурса. Второй состоит в том, чтобы рационально использовать и минимизировать объемы потребления энергетических ресурсов самой печью и повысить ее собственный КПД. Первый способ не представляется возможным выполнить в относительно короткие сроки, так как он связан с большими финансовыми вложениями, реконст-

рукцией имеющегося оборудования для производства и транспортировки энергоресурса и разработкой инновационных методов его производства и передачи. Второй способ наиболее приемлем к реализации в рамках отдельно взятого предприятия. Его осуществление возможно за счет снижения потерь в дуговых сталеплавильных печах (ДСП) и рационального распределения используемых энергоносителей в процессе плавки [3]. Для оценки возможности реализации данных мероприятий наиболее показательными будут удельные значения технологических параметров плавки в отношении единицы производимой продукции (см. таблицу).

Каждый из используемых энергетических ресурсов имеет свою размерность ( $\text{м}^3$ , кВт·ч, МДж), что затрудняет решение задачи, поэтому наиболее удобным для анализа является их приведение к размерности, в которой исчисляется энергетическая составляющая, например – МДж.

В современных сверхмощных дуговых печах с применением водоохлаждаемых панелей и газокислородных горелок потери энергии достигают 40 % [4]. Снижение величины потерь возможно с использованием инновационных методик теплоизоляции, усовершенствования систем газоудаления и применения технологий использования вторичных энергоресурсов [5]. Это влечет за собой большие финансовые вложения, необходимость переоборудования печи и снижение объемов производства на время реконструкции [6]. Учитывая данное обстоятельство, рассчитаем собственный КПД печи по формуле

$$\text{КПД} = \frac{C_{\text{МЕ}} M_{\text{МЕ}} \Delta T}{(E_{\text{ЭЭ}} + E_{\text{Г}}) \cdot 0,6}, \quad (1)$$

где  $C_{\text{МЕ}}$  – теплоемкость металла, МДж/т·°С;  $M_{\text{МЕ}}$  – масса металла, т,  $\Delta T$  – разность температур металла

Средние значения технологических параметров 180-тонной ДСП за плавку для различных марок стали

Технологические параметры	Марка стали				
	A500C	Ст3сп	Ст1сп	St 37-2	09Г2С
Загрузка лома, т	161,8	156,2	166,5	153,3	159,6
Удельное потребление электроэнергии, кВт·ч/т	321,7	308,8	314,7	304,9	325
Удельное потребление кислорода, м <sup>3</sup> /т	44,7	46,6	42,7	45,5	49,6
Удельное потребление природного газа, м <sup>3</sup> /т	5,7	5,5	5,6	4,8	6,3
Удельная энергия, выделенная электрической дугой, МДж/т	1158,4	1111,6	1133,1	1097,7	1170
Удельная энергия, выделенная горением природного газа, МДж/т	206,7	199,7	202,45	171,5	227,2

между завалкой и выпуском, °С;  $E_{ээ}$  – электрическая энергия, потребленная за плавку, МДж;  $E_{г}$  – энергия горения природного газа, потребленная за плавку, МДж.

Подставляя в выражение (1) значения данных из таблицы, получим среднее значение фактического собственного КПД печи, равное 91 %. Отсюда следует, что 9 % подводимой в печь энергии не усваивается металлическим расплавом. Это может быть связано с расходом энергетических ресурсов, не участвующих в технологическом процессе плавки, и нерациональным распределением количества используемых энергоносителей во время ведения самой плавки.

Рассмотрим возможные способы повышения собственного КПД на примере 180-тонной дуговой печи. В печи установлено шесть газокислородных горелок, мощности которых изменяются в диапазоне от 1 до 3,5 МВт. Производительность горелок по газу составляет 350 Нм<sup>3</sup>/ч, по кислороду – 800 Нм<sup>3</sup>/ч на горение и 2800 Нм<sup>3</sup>/ч на продувку [7]. По технологии выплавки одна из горелок остается в работе в периоды между выпуском стали и завалкой шихты новой плавки согласно техническим рекомендациям производителя го-

релок. Это делается для прогрева футеровки перед следующей плавкой и для предотвращения забивания сопла горелки. Также это мероприятие позволяет производить розжиг горелки за счет накопленной в футеровке тепловой энергии. За этот промежуток времени горелка выделяет 3150 МДж энергии и, если вычесть это значение из  $E_{г}$  в выражении (1), собственный КПД печи повысится до 92,4 %.

Помимо рассмотренных выше факторов, на собственный КПД печи достаточно сильно влияет значение энергии эндотермических реакций. При горении природного газа некоторая часть кислорода расходуется на окисление железа в расплаве [8]. Это приводит к образованию FeO, увеличению угара металла и тем самым к снижению выхода годного. Также увеличение концентрации FeO в шлаке ведет к увеличению его основности и росту удельного потребления электрической энергии (рис. 1а). Особенно сильно это проявляется в период рафинирования, когда производится увеличение подачи кислорода в горелки [9]. Зависимость КПД дуговой печи от доли химической энергии ( $E_{х}$ ) в общем тепловом балансе представлена на рис. 1б.

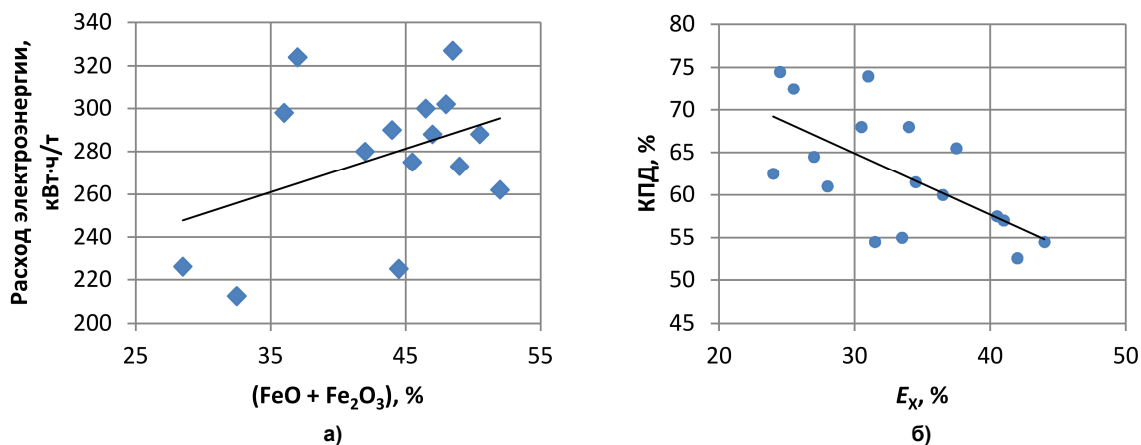


Рис. 1. Зависимость удельного расхода электроэнергии от общей окисленности шлака (а), зависимость КПД дуговой печи от доли химической энергии в общем тепловом балансе [10] (б)

Учитывая все вышеизложенное, выражение (1) примет вид:

$$\text{КПД} = \frac{C_{\text{МЕ}} \cdot M_{\text{МЕ}} \cdot \Delta T}{(E_{\text{ЭЭ}} + E_{\Gamma} - E_{\text{ГД}} + E_{\text{Х}}) \cdot 0,6} \quad (2)$$

где  $E_{\text{ГД}}$  – энергия, выделенная горелкой в период между выпуском и загрузкой шихты; МДж,  $E_{\text{Х}}$  – энергия эндотермических реакций, МДж.

На данный момент регулировка объема природного газа, подводимого в рабочее пространство печи, осуществляется на основе данных об объеме потребленной электрической энергии. Данный метод не позволяет достоверно судить о том, на какой стадии плавки находится печь в данный момент. Это может привести к тому, что газокислородные горелки будут работать на жидкий расплав металла, что приведет к увеличению энергии химических реакций и тем самым к снижению КПД.

Наиболее рациональным методом контроля стадии плавки является анализ гармонических составляющих тока дуговой печи. Этот метод позволяет определить, на какой из стадий плавки (прожигание колодцев, образование жидкой ванны, работа на жидкий расплав) находится печь в данный момент за счет сравнения значений четных и нечетных гармонических составляющих тока [11]. Используя данный метод контроля состояния плавки, можно построить систему автоматического управления (АСУ) подачей газа, кислорода и электрической энергии. Выражение для построения системы АСУ будет иметь следующий вид:

$$E_{\text{МЕ}} = \int_0^{t_{\text{пл}}} E_{\text{ЭЭ}}(t) dt + \int_0^{t_{\text{пл}}} E_{\Gamma}(t) dt, \quad (3)$$

где  $E_{\text{МЕ}}$  – энергия, необходимая для доведения металла до нужной температуры, МДж;  $E_{\text{ЭЭ}}(t)$  – энергия, выделяемая электрической дугой в определенный момент времени, МДж;  $E_{\Gamma}(t)$  – энергия, выделяемая газокислородными горелками в определенный момент времени, МДж;  $t_{\text{пл}}$  – время плавки, мин.

На выражение (3) накладываются следующие ограничения: максимальное и минимальное значения производительности газокислородных горелок

по газу и максимальное значение мощности электрической дуги.

На первоначальной стадии плавки, когда электрические дуги горят над твердым материалом, значение четных гармонических составляющих тока превышает значение нечетных. По мере расплавления шихты величина четных гармоник уменьшается интенсивнее, чем нечетных. При горении дуг на ванну жидкого металла значение нечетных гармонических составляющих тока превышает значение четных. Отношение величин четных гармонических составляющих к нечетным можно определить из выражения:

$$K_{\text{Ч/НЧ}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{2n}^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_{2n+1}^2}}. \quad (4)$$

Таким образом, анализируя относительные действующие значения токов четных и нечетных гармоник, возможно осуществить регулирующую подачу природного газа (рис. 2а). С учетом этого выражение для определения объема природного газа примет вид:

$$E_{\Gamma} = k_{\Gamma} \cdot V_{\Gamma} \cdot K_{\text{Ч/НЧ}}, \quad (5)$$

где  $k_{\Gamma}$  – переводной коэффициент для природного газа;  $V_{\Gamma}$  – производительность горелки, м<sup>3</sup>/мин.

Время ведения одной плавки от завалки до выпуска продукции устанавливается технологическим процессом и не должно выходить за его пределы. Для 180-тонной дуговой печи это время составляет 30–33 мин. Используя вышеуказанные технические данные печи и подставляя их в выражение (3) и (4), получим наиболее рациональное изменение энергии, выделяемой электрическими дугами во времени. Расчет произведен для марки стали 09Г2С (рис. 2б).

Если не брать в расчет значение потерь энергии в дуговой печи, то использование данного метода позволяет повысить значение собственного КПД на 3 % и снизить на 11 % долю электрической энергии в общем тепловом балансе печи. Его значение в этом случае будет ограничиваться до-

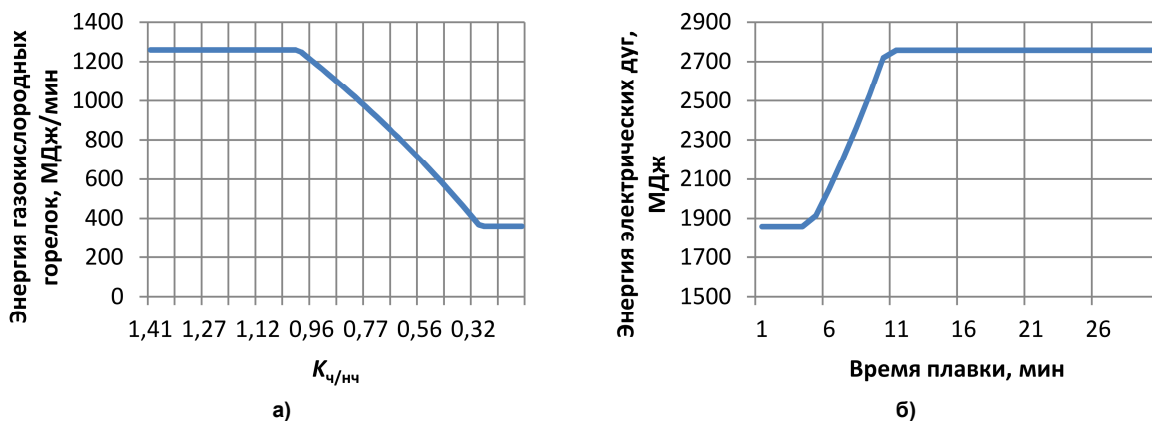


Рис. 2. Зависимость энергии, подводимой газокислородными горелками, от отношения значений четных и нечетных высших гармонических составляющих тока (а); значение энергии, выделяемой электрическими дугами при выплавке стали марки 09Г2С в ДСП-180 (б)

лей энергии химических реакций в общем энергобалансе и количеством тугоплавких примесей в шихте.

Большие затруднения вызывает определение объема подводимого кислорода с течением времени. В начальный период плавки, когда кислород подводится для обеспечения горения пламени горелки, его объем определяется из соотношения 1 доля природного газа на 2 доли кислорода [12]. На стадии рафинирования необходимо увеличивать объем подводимого газа для выжигания из расплава излишнего углерода и доведения его значения до заданных, что сопровождается увеличением доли энергии эндотермических реакций в общем энергобалансе печи. Однако зафиксировать инструментально это не представляется возможным, поэтому объем кислорода, вводимого в рабочее пространство печи, в период рафинирования определяют аналитически и на основе анализа химического состава отходящих газов.

### Выводы

1. В современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печах значение фактического КПД составляет порядка 55–60 %. Это обусловлено конструкцией и технологическим режимом печи, что вызывает значительные потери энергии в ее рабочем пространстве – это потери с отходящим газом, потери в водоохлаждаемых панелях и своде.

2. Повышение КПД за счет снижения потерь может быть достигнуто изменением конструкции и совершенствованием технологического режима посредством перераспределения основных энергетических составляющих теплового баланса.

3. Эта задача может быть решена внедрением систем автоматического управления, у которых одним из контролируемых параметров является относительное значение четных высших гармонических составляющих тока дуги.

4. Применение данных систем позволит повысить внутренний КПД печи на 3 % до значений, которые будут ограничиваться долей энергии химических реакций в общем тепловом балансе дуговой печи, и снизить на 11 % долю электрической энергии.

### Литература

1. Анализ состояния конструкции, основных параметров и показателей работы большегрузных ДСП, действующих на металлургических заводах России / И.Ю. Зинуров, С.Г. Овчинников,

А.М. Шумак и др. // *Электрометаллургия*. – 2013. – № 3. – С. 2–6.

2. Лисиенко, В.Г. *Хрестоматия по энергосбережению. Справочное издание: в 2 кн.* / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелоков. – М.: Теплоэнергетик. – 2002. – 688 с.

3. Управление тепловым и электрическим режимами агрегата ковш-печь / Е.Б. Агапитов, Г.П. Корнилов, Т.Р. Храмынин и др. // *Электрометаллургия*. – 2006. – № 6. – С. 11–16.

4. Рациональные способы интенсификации плавки в современных дуговых сталеплавильных печах / Ю.А. Гудим, И.Ю. Зинуров, А.Д. Киселев и др. // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2008. – № 9. – С. 10–13.

5. Шишимиров, М.В. Ресурсосбережение и резервы повышения эффективности выплавки стали в ДСП / М.В. Шишимиров, О.М. Сосонкин // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия»*. – 2015. – Т. 15, № 3. – С. 70–79.

6. Меллентин, И. Экономия затрат на электроэнергию и достижение прозрачности вместо уменьшения прибыли / И. Меллентин // *Черные металлы*. – 2014. – С. 73–77.

7. Анализ и оптимизация электрических режимов сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, А.А. Николаев, Т.Р. Храмынин и др. // *Электрометаллургия*. – 2013. – № 7. – С. 2–10.

8. Тимошпольский, В.И. Эффективность применения газообразного топлива в электродуговых печах / В.И. Тимошпольский, И.А. Трусова, С.В. Корнеев // *Литье и металлургия*. – 2009. – № 3 (52). – С. 305–310.

9. Корнеев, С.В. Взаимосвязь энергетического режима плавки с технологическими параметрами для условий электродуговых печей различной емкости / С.В. Корнеев, И.А. Трусова // *Литье и металлургия*. – 2012. – № 3 (67). – С. 209–217.

10. Тулуевский, Е.Н. Инновации для дуговых сталеплавильных печей. Научные основы выбора: моногр. / Е.Н. Тулуевский, И.Ю. Зинуров. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 210. – 347 с.

11. Экспериментальное исследование гармонического состава токов дуг для дуговых сталеплавильных печей различной мощности / А.А. Николаев, Ж.-Ж. Руссо, В. Сцымански и др. // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. – 2016. – № 5. – С. 106–120. DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

12. Корнилов, Г.П. Снижение затрат при эксплуатации сверхмощных дуговых сталеплавильных печей / Г.П. Корнилов, П.А. Шулепов // *Главный энергетик*. – 2015. – № 5–6. – С. 24–28.

**Корнилов Геннадий Петрович**, д-р техн. наук, заведующий кафедрой «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; korn\_mgn@mail.ru.

**Шулепов Павел Андреевич**, аспирант кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий», Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; pashulepov13@mail.ru.

Поступила в редакцию 1 июля 2017 г.

DOI: 10.14529/power170404

## ANALYSIS OF THE ACTUAL EFFICIENCY OF ELECTRIC ARC FURNACES

G.P. Kornilov, korn\_mgn@mail.ru,

P.A. Shulepov, pashulepov13@mail.ru

G.I. Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation

The article considers possible options for increasing the efficiency of an arc steel-making furnace due to redistribution of the volumes of energy resources used. The comparative analysis of technological parameters for melting various steel grades is carried out. The technique for determining the actual value of the efficiency of a 180-ton arc furnace is considered. The ways to increase the value of the internal efficiency of an arc furnace are proposed by means of the introduction of automatic regulation systems for the volumes of energy resources supplied. The option for regulating the volumes of energy carriers supplied is considered on the basis of analysis of the values of the higher harmonic current components.

*Keywords:* arc steelmaking furnace, energy efficiency, distribution of energy resources, coefficient of efficiency, harmonic composition of currents, automatic control system, diagnostics of melting stages.

### References

1. Zinurov I.Yu. [Analysis of the State of Construction, Basic Parameters and Performance Indicators for Heavy-Load EAFs Operating at Russian Metallurgical Plants]. *Electrometallurgy*, 2013, no. 3, pp. 2–6. (in Russ.)
2. Lisienko V.G. *Hrestomatija po Jenergoberezheniju. Spravochnoe Izdanie. V 2-h Knigah* [Reader on Energy Conservation. Reference Edition. In 2 books]. Moscow, Heat power engineer, 2002. 688 p.
3. Agapitov E.B., Kornilov G.P., Khrumshin T.R. [Control of the Thermal and Electrical Conditions of the Ladle-furnace Unit]. *Electrometallurgy*, 2006, no. 6, pp. 11–16. (in Russ.)
4. Gudim Yu.A., Zinurov I.Yu., Kiselev A.D., et al. [Rational Methods of Melting Intensification in Modern Arc Steel Smelting Furnaces]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2008, no. 9, pp. 10–13. (in Russ.)
5. Shishimirov M.V. [Resource Saving and Reserves to Increase the Efficiency of Steelmaking in EAF]. *Bulletin of South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2015, no. 3, pp. 70–79. (in Russ.)
6. Mellentin I. [Saving Electricity Costs and Achieving Transparency Instead of Reducing Profit]. *Black metals*, 2014, June, pp. 73–77. (in Russ.)
7. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Khrumshin T.R. [Analysis and Optimization of Electric Modes of Superpower Arc Steel Smelting Furnaces]. *Electrometallurgy*, 2013, no. 7, pp. 2–10. (in Russ.)
8. Timoshpol'skiy V.I., Trusova I.A., Korneev S.V. [Efficiency of Using Gaseous Fuels in Electric Arc Furnaces]. *Casting and Metallurgy*, 2009, no. 3, pp. 305–310. (in Russ.)
9. Korneev S.V., Trusova I.A. [Interrelation of the Energy Mode of Melting with Technological Parameters for the Conditions of Electric Arc Furnaces of Various Capacities]. *Casting and metallurgy*, 2012, no. 3, pp. 209–217. (in Russ.)
10. Tuluevskiy E.N., Zinurov I.Yu. *Innovatsii dlya dugovykh staleplavil'nykh pechey. Nauchnye osnovy vybora* [Innovations for Arc Steel Furnaces. The Scientific Basis of Choice]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2010. 347 p.

11. Nikolaev A.A., Russo Zh.-Zh., Stsymanski V., et al. [Experimental Study of the Harmonic Composition of Arc Currents for Arc Steel Furnaces of Various Capacities]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2016, no. 5, pp. 106–120. (in Russ.) DOI: 10.18503/1995-2732-2016-14-3-106-120

12. Kornilov G.P., Shulepov P.A. [Reduction of Costs in the Operation of Super-Power Arc Steel Furnaces]. Chief Power Engineer, 2015. no. 5–6, pp. 24–28. (in Russ.)

*Received 1 July 2017*

---

### ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Корнилов, Г.П. Анализ фактического КПД электродуговой сталеплавильной печи / Г.П. Корнилов, П.А. Шулепов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2017. – Т. 17, № 4. – С. 33–38. DOI: 10.14529/power170404

### FOR CITATION

Kornilov G.P., Shulepov P.A. Analysis of the Actual Efficiency of Electric Arc Furnaces. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 33–38. (in Russ.) DOI: 10.14529/power170404

---