

УДК 669.018.8

А.С. Ткачев, А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер, И.В. Рябинин

Старооскольский технологический институт

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭЛЕКТРОДОВ

Аннотация. Разработана методика расчета рациональных энергетических режимов работы современных дуговых сталеплавильных печей, работающих по технологии с непрерывной загрузкой окатышей при использовании электродов различной конструкции. Разработан алгоритм расчета и создана компьютерная программа, позволяющая рассчитать рациональный режим работы дуговой сталеплавильной печи, а так же рациональную скорость загрузки металлizadosанных окатышей в ванну печи. На основе расчета установлено, что использование полых (трубчатых) электродов позволяет сократить общее время плавки на 5,9 мин в сравнении с типовыми (сплошными) электродами. Результаты моделирования на ЭВМ качественно согласуются с данными, полученными на физических моделях, что свидетельствует о перспективности применения полых (трубчатых) электродов в производственных условиях.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, металлizadosанные окатыши, полый (трубчатый) электрод.

MODERN ARC FURNACES WORK ENERGY REGIMES AT DIFFERENT TYPE ELECTRODES USE STUDY

Abstract. The article discusses the increase in efficiency of the modern EAF working on technology to non-continuous load metallized pellets. The method of calculation of rational energy regimes of modern EAF working on energy-technology with continuous loading of pellets using different electrode design. The algorithm for calculating and created computer program that calculates the rational mode of arc steel-smelting furnace, as well as rational download speed metallized pellets in the bath furnace. On the basis of calculations that the use of hollow (tubular) electrodes can reduce the total melting time of 5.9 min in comparison with the standard (solid) electrodes. In this case, the average download speed of metallized pellet stoves can be increased to 183 kg/min, which in turn will reduce the specific energy consumption of 63 kW·h/t. The results of computer simulations are in qualitative agreement with the data on physical models, thus promising applications of hollow (tubular) electrodes in a production environment.

Keywords: arc furnace, metalized pellets only (tubular) electrode.

На сегодняшний день одной из наиболее прогрессивных технологий выплавки стали в сверхмощных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) является технология, в основе которой лежит использование в качестве шихтовых материалов металлizadosанных окатышей [1], загружаемых в печь непрерывно через свод или стены печи. Использование в качестве шихтовых материалов металлizadosанного сырья позволяет получать высококачественный металл с минимальным содержанием цветных металлов [1 – 3]. В то же время данная технология требует совершенствования энергетического режима работы печи в направлении быстрого и экономичного расплавления шихты, что является основой современной технологии выплавки стали в ДСП.

Повышение эффективности периода плавления непрерывно загружаемых в печь металлizadosанных окатышей, как наиболее энергоемкого и длительного периода, связано в первую очередь с выбором оптимальных условий их плавления, а именно интенсивности обезуглероживания, температуры ванны, скорости и времени начала непрерывной загрузки окатышей в печь [1 – 3]. Анализ энергетических режимов работы современных сверхмощных ДСП в период плавления окатышей показывает, что существует множество факторов, влияющих на эффективность работы ДСП, при

этом одним из главных факторов, влияющих на время начала и скорость загрузки металлizadosанных окатышей в печь, является характер теплообмена в рабочем пространстве печи.

Одним из перспективных направлений улучшения условий теплообмена в рабочем пространстве ДСП является применение полых (трубчатых) электродов. Как показывает анализ научно-технической литературы [4 – 6] и результаты математического моделирования, применение полых (трубчатых) электродов позволяет повысить коэффициент мощности $\cos\varphi$ в период расплавления и улучшить работу ДСП в период жидкой ванны за счет создания более направленного теплообмена от электрических дуг на металлическую ванну.

В связи с этим представляется актуальным оценить скорость рациональной загрузки металлizadosанных окатышей в печь при использовании традиционных и полых (трубчатых) электродов. Для расчета рациональных энергетических режимов работы ДСП, времени начала загрузки металлizadosанных окатышей и скорости их подачи необходимо рассчитать скорость их плавления. Известно, что основным источником энергии в ДСП в каждый момент времени является энергия, выделяемая электрической дугой (P_d). При этом часть энергии электрической дуги расходуется на нагрев сво-

да и стен печи, а часть поглощается в процессе передачи излучения. В этом случае полезная мощность $P_{\text{пол}}$, которая непосредственно расходуется на нагрев и плавление металла, определяется средним коэффициентом использования тепла электрических дуг [7]. Чтобы нагреть и расплавить 1 кг металла, необходимо затратить количество энергии, равное энтальпии металла. Поэтому путем сравнения величины энергии, выделившейся на электрической дуге, и энергии, необходимой для нагрева и расплавления металла, можно вычислить скорость расплавления стального лома и металлизированных окатышей в рабочем пространстве ДСП и, соответственно, сделать вывод о том, насколько рационален энергетический режим работы печи. Для этого первоначально рассчитаем количество энергии $Q_{\text{л}}$, необходимое для расплавления заданной доли стального лома по следующему выражению:

$$Q_{\text{л}} = Q_1 + Q_2 = i_{\text{л}} \Delta m_{\text{л}}, \quad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты, необходимое для нагрева стального лома до температуры плавления; Q_2 – количество теплоты, необходимое для расплавления стального лома; $i_{\text{л}}$ – энтальпия стального лома; $\Delta m_{\text{л}}$ – масса расплавленного стального лома до загрузки окатышей.

Массу расплавленного стального лома до загрузки окатышей в печь определим из следующего выражения:

$$\Delta m_{\text{л}} = k m_{\text{лом}}, \quad (2)$$

где k – доля расплавленного лома; $m_{\text{лом}}$ – масса стального лома, загруженного в печь.

Величину энтальпии стального лома можно определить по выражению

$$i_{\text{л}} = c_{\text{л}} \Delta T + \lambda_{\text{л}}, \quad (3)$$

где $c_{\text{л}}$ – удельная теплоемкость стального лома; ΔT – разность конечной и начальной температуры стального лома; $\lambda_{\text{л}}$ – скрытая теплота плавления стального лома.

Количество полезной энергии, идущей на расплавление $P_{\text{пол}}$, определим следующим образом:

$$P_{\text{пол}} = \eta P_{\text{д}}, \quad (4)$$

где η – средний коэффициентом использования тепла электрических дуг; $P_{\text{д}}$ – мощность электрических дуг.

Время $t_{\text{л}}$, необходимое для расплавления заданной доли стального лома, определим из выражения

$$t_{\text{л}} = Q_{\text{л}} / P_{\text{пол}}. \quad (5)$$

Расчет скорости совместного плавления металлизированных окатышей и оставшегося лома производится аналогично расчету скорости плавления начальной

доли лома. В зависимости от скорости загрузки окатышей $v_{\text{ок}}$ определяем массу окатышей, подаваемых в ДСП за единицу времени (Δt):

$$\Delta m_{\text{ок}} = v_{\text{ок}} \Delta t. \quad (6)$$

Количество энергии, необходимое для нагрева и полного расплавления массы загружаемых окатышей, определим по формуле

$$Q_{\text{ок}} = i_{\text{ок}} \Delta m_{\text{ок}}, \quad (7)$$

где $i_{\text{ок}} = c_{\text{ок}} \Delta T + \lambda_{\text{ок}}$ – величина энтальпии металлизированного окатыша; $c_{\text{ок}}$ – удельная теплоемкость металлизированного окатыша; $\lambda_{\text{ок}}$ – скрытая теплота плавления металлизированного окатыша.

Тогда количество энергии, которое будет расходоваться на расплавление лома, можно определить из выражения

$$Q_{\text{л}} = P_{\text{пол}} \Delta t - Q_{\text{ок}}. \quad (8)$$

Массу лома, расплавленного совместно с окатышами, определим из выражения

$$m_{\text{л.сов}} = Q_{\text{л}} / c_{\text{л}}. \quad (9)$$

Расчет скорости совместного плавления ведется до тех пор, пока масса расплавленного лома не достигнет величины массы загруженного лома в печь. После каждого шага по времени производится увеличение скорости загрузки окатышей на $\Delta v_{\text{ок}}$ и суммирование массы загруженных окатышей ($m_{\text{ок.сов}}$), массы расплавленного лома ($m_{\text{л}}$), времени совместного плавления ($t_{\text{ок.сов}}$).

После доплавления оставшегося лома, вычислим полное время плавления лома по формуле

$$t_{\text{л.пол}} = t_{\text{ок.сов}} + t_{\text{л}}. \quad (10)$$

Далее определим массу оставшихся металлизированных окатышей и необходимое количество энергии для их расплавления:

$$m_{\text{ок}} = m_{\text{окат}} - m_{\text{ок.сов}}, \quad (11)$$

где $m_{\text{окат}}$ – общая масса окатышей, загружаемых в печь;

$$Q_{\text{ок}} = c_{\text{ок}} m_{\text{ок}}. \quad (12)$$

Время, необходимое для расплавления оставшихся металлизированных окатышей, и скорость их загрузки определим из следующих выражений:

$$t_{\text{ок}} = Q_{\text{ок}} / P_{\text{пол}}; \quad (13)$$

$$v_{\text{ок}} = P_{\text{пол}} / c_{\text{ок}}. \quad (14)$$

Таким образом, с использованием данных уравнений можно рассчитать скорость плавления лома до загрузки окатышей в печь, а также сделать вывод о том, насколько рациональна скорость загрузки металлizedованных окатышей в печь.

Расчет рациональной скорости загрузки окатышей удобно выполнять с помощью ЭВМ, что позволяет достичь высокой точности расчетов путем установки произвольного шага изменения скорости загрузки окатышей, отследить удельный расход электроэнергии на

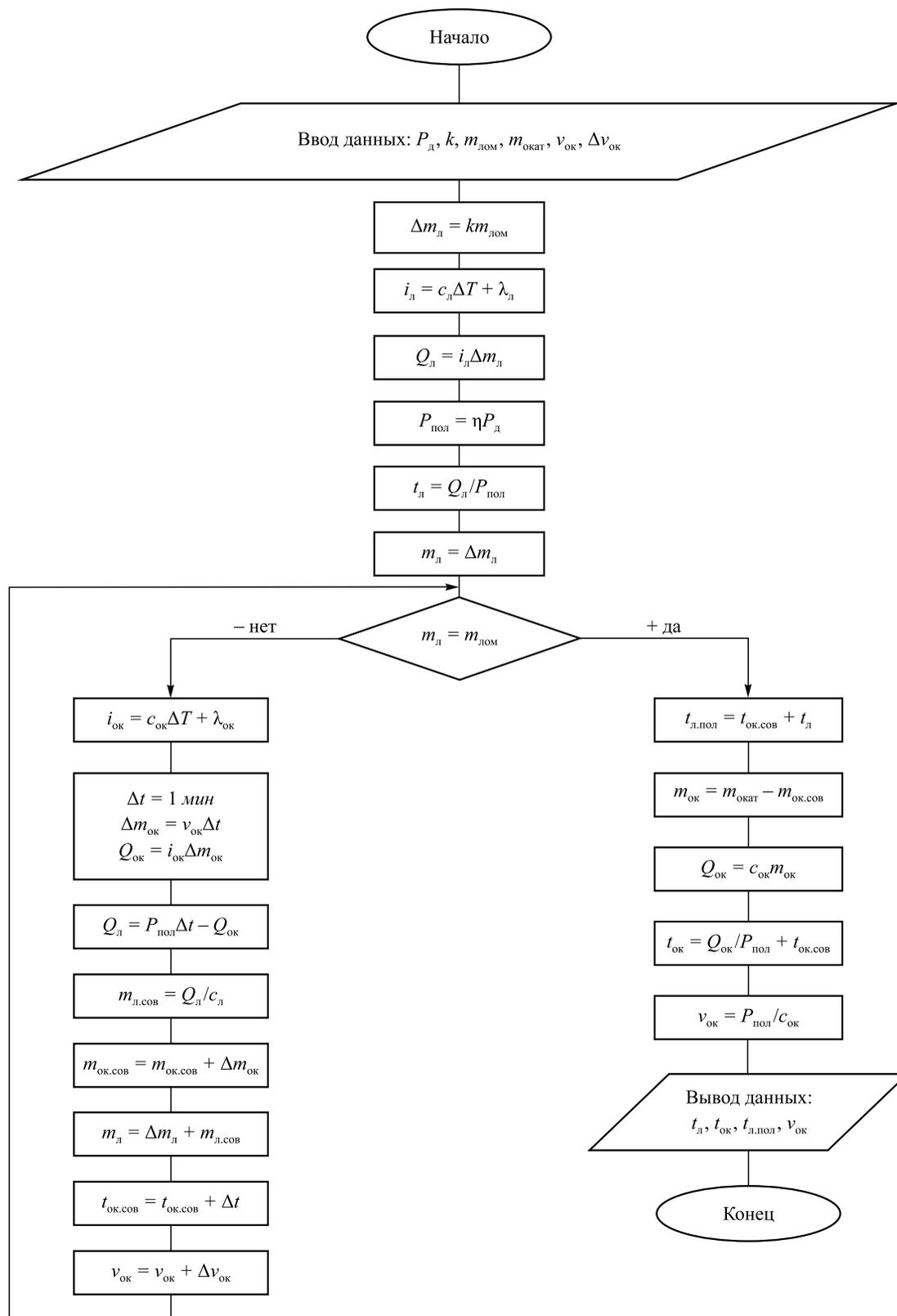


Рис. 1. Алгоритм расчета рациональной скорости загрузки металлizedованных окатышей

1 т выплавляемого металла в зависимости от скорости загрузки окатышей.

Для определения рациональной скорости подачи металлizadosанных окатышей в ДСП, а также для расчета режимов работы печи в зависимости от времени начала загрузки и скорости загрузки окатышей была разработана компьютерная программа с использованием пакета MatLAB. Исходными данными для расчета являются: масса лома, масса окатышей, момент начала загрузки окатышей, начальная скорость подачи окатышей, мощность электрических дуг. Расчетная часть программы поделена на два блока: в первом блоке осуществляется расчет параметров плавки стального лома до начала загрузки металлizadosанных окатышей, во втором блоке осуществляется расчет параметров плавки в период загрузки металлizadosанных окатышей и расчет оптимальной начальной и конечной скорости загрузки окатышей. Алгоритм расчета рациональной скорости загрузки металлizadosанных окатышей представлен на рис. 1. Представленный алгоритм предназначен для управления процессом плавки стального лома и металлizadosанных окатышей в ванне ДСП. С интервалом в 1 мин компьютер рассчитывает полез-

ную мощность электрических дуг, массу нерасплавленного лома, скорость плавления лома и рациональную скорость загрузки металлizadosанных окатышей в ванну ДСП.

Результаты расчета рациональной скорости загрузки металлizadosанных окатышей в ванну ДСП при использовании электродов различной конструкции представлены на рис. 2 и в таблице.

Анализ полученных результатов позволяет сказать, что использование полых (трубчатых) электродов позволяет сократить общее время плавки на 5,9 мин в сравнении с типовыми (сплошными) электродами. При этом среднюю скорость загрузки металлizadosанных окатышей в печи можно увеличить на 183 кг/мин, что в свою очередь приведет к снижению удельного расхода электроэнергии на 63 кВт·ч/т. Данный факт можно объяснить лучшими условиями теплообмена в рабочем пространстве ДСП и более высоким коэффициентом использования тепла электрических дуг при использовании полых (трубчатых) электродов.

Выводы. Рассмотрены вопросы организации рациональных энергетических режимов работы современных ДСП, работающих по технологии с непрерывной

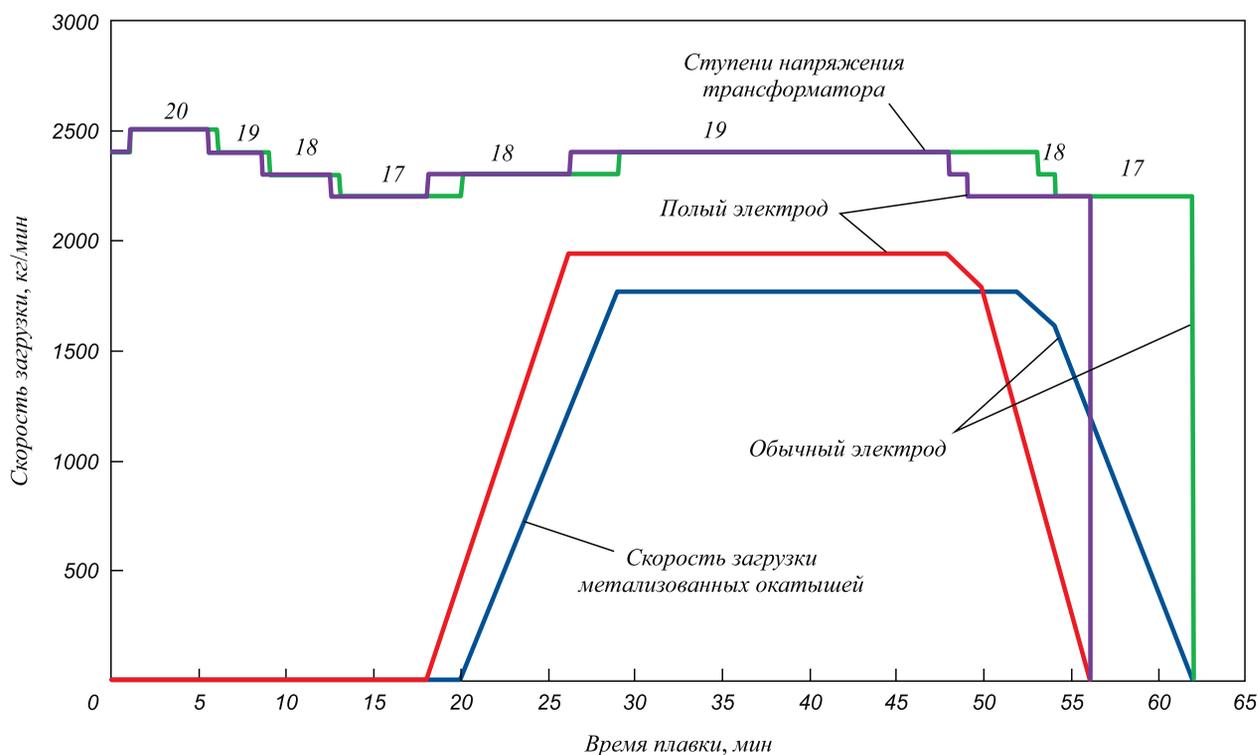


Рис. 2. Изменение скорости подачи окатышей в зависимости от типа электрода

Результаты расчета скорости расплавления лома и металлizadosанных окатышей в 150-т ДСП при работе на различных типах электродов

Масса, т		k, %	Общее время плавки, мин	Удельный расход электроэнергии, кВт·ч/т	Максимальная скорость подачи окатышей, кг/мин	Тип электрода
шихта	окатыши					
60	115	40	62	564	1763	Обычный
60	115	40	56,1	501	1946	Полый

загрузкой окатышей при использовании электродов различной конструкции. Разработан алгоритм расчета и создана компьютерная программа, позволяющая рассчитать рациональный режим работы, а так же рациональную скорость загрузки металлизированных окатышей в ванну печи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трахимович А.Е., Шалимов А.Г. Использование железа прямого восстановления при выплавки стали. – М.: Металлургия, 1982. – 248 с.
2. Федина В.В., Меркер Э.Э., Кочетов А.И. и др // Изв. вуз. Черная металлургия. 2003. № 11. С. 24 – 26.
3. Кожухов А.А., Меркер Э.Э., Федина В.В. Совершенствование режима электроплавки металлизированного железорудного сырья в дуговой сталеплавильной печи. // Сб. тр. IV Междунар. научно-техн. конф., посвященной 120-летию

- И.П. Бардина «Прогрессивные процессы и оборудование металлургического производства» – Череповец, 2003. С. 48 – 51.
4. Егоров А.Е., Никольский Л.Е., О कोरोков Н.В. // Электротермия. 1962. № 9. С 27 – 31.
5. Ткачев А.С., Кожухов А.А., Сазонов А.В. Особенности теплообмена в дуговой сталеплавильной печи при работе на полых электродах. // Сб. тр. Всерос. научно-практич. конф. «Череповецкие научные чтения – 2010» – Череповец, 2010.
6. Ткачев А.С., Кожухов А.А., Меркер Э.Э., Сазонов А.В. Расчет распределения потоков излучения дуг в дуговой сталеплавильной печи при их работе на полых электродах. // Сб. тр. III Всерос. научно-практич. конф. «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии 2011» – Новокузнецк, 2011.
7. Макаров А.Н. Теплообмен в электродуговых и факельных печах и топках паровых котлов ТГТУ. – Тверь, 2003. – 348 с.

© 2013 г. А.С. Ткачев, А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер, И.В. Рябинин
Поступила 31 июня 2012 г.

УДК 669.018.8

А.С. Ткачев, А.А. Кожухов, Э.Э. Меркер

Старооскольский технологический институт

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ ВОДООХЛАЖДАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДУГОВОЙ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ ПРИ РАБОТЕ НА ЭЛЕКТРОДАХ РАЗЛИЧНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Аннотация. Рассмотрены вопросы повышения эффективности тепловой работы водоохлаждаемых элементов современных дуговых сталеплавильных печей методом математического моделирования при использовании электродов различной конструкции, а именно традиционных (сплошных) и полых (трубчатых). Установлено, что использование полых (трубчатых) электродов позволяет существенно улучшить тепловую работу водоохлаждаемых элементов дуговых сталеплавильных печей, снизить величину тепловых потерь на 120 кВт/м². Результаты моделирования на ЭВМ качественно согласуются с данными, полученными на физических моделях, что свидетельствует о перспективности применения полых (трубчатых) электродов в производственных условиях.

Ключевые слова: дуговая сталеплавильная печь, электрод, водоохлаждаемый элемент.

ARC FURNACE WATER COOLED ELEMENTS HEAT WORK ESTIMATION AT DIFFERENT CONSTRUCTION ELECTRODES APPLICATION

Abstract. The article discusses the increase in efficiency of the water-cooled heat elements of modern electric arc furnaces using mathematical modeling using electrodes of different design, namely conventional (solid) and hollow (tubular). In the mathematical modeling showed that the use of hollow (tubular) electrodes can significantly improve the thermal performance of water-cooled elements arc steel furnaces, reduce the amount of heat loss of 120 kW/m². The results of computer simulations are in qualitative agreement with the data on physical models, thus promising applications of hollow (tubular) electrodes in a production environment.

Keywords: arc furnace, electrode, water-cooled element.

Для интенсификации выплавки стали в современных сверхмощных дуговых сталеплавильных печах (ДСП) применяется большой комплекс энергетических и технологических мероприятий, которые включают в себя тщательную подготовку металлошихты и рациональную загрузку ее в печь, использование кислорода для расплавления шихты, вспенивание шлака и увеличение активной мощности, вводимой в печь. Все эти мероприятия направлены, прежде всего, на уменьшение длительности и снижение степени облученности фу-

теровки излучением электрических дуг. В то же время рост вводимой в печь удельной электрической мощности до $1 \div 1,5$ МВт/т наряду с использованием альтернативных источников энергии приводит к значительному увеличению тепловых нагрузок на водоохлаждаемые элементы (ВЭ) футеровки ДСП, что приводит к повышению отказов в работе ВЭ.

Наиболее часто отказы в работе ВЭ связаны с их прожогом вторичными электрическими дугами, что в значительной степени является случайным фактором,