

УДК 669.041:621.783

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук (НАН Беларуси),
В. А. МАТОЧКИН, канд. техн. наук (РУП «БМЗ»),
М. Л. ГЕРМАН, канд. физ.-мат. наук (РУП «БелТИ»),
С. М. КАБИШОВ, **Н. Л. МАНДЕЛЬ**, канд.-ты техн. наук (БНТУ),
С. В. КОРНЕЕВ (ИТМО НАН Беларуси)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ И РАБОТЫ СОВРЕМЕННЫХ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ДЛЯ НАГРЕВА ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК В ТРУБОПРОКАТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Анализ современных технологий металлургического производства позволяет сделать вывод, что для нагрева заготовок перед пластической деформацией наиболее предпочтительны методические печи. Среди них наибольшее распространение получили печи с механизированным подом, где перемещение заготовок осуществляется при помощи движения пода или отдельных его элементов. К таким агрегатам относятся кольцевые печи, печи с шагающим подом, шагающими балками и др.

Для нагрева заготовок под прокатку и прошивку могут применяться также секционные печи, имеющие преимущества в скорости нагрева, но обладающие более низким КПД. Еще одним существенным недостатком секционных печей является то обстоятельство, что температура рабочего пространства в них значительно выше необходимой температуры нагрева металла, вследствие чего возможны пережог металла и оплавление окалины, а также возникновение значительных температурных напряжений, что недопустимо для заготовок из трещиновувствительных марок сталей.

Методические печи с толкательным и перекатным способами перемещения металла также имеют значительные конструктивные

и технологические недостатки, приводящие к большим потерям металла с окалиной и не позволяющие обеспечить требуемое качество нагрева. В связи с изложенным далее будем рассматривать методические печи с механизированным подом.

Отопление методических печей. Современная методическая печь – это агрегат, в котором присутствуют четыре определяющие ее эффективность системы: система подвода и сжигания топлива, система рекуперации и утилизации теплоты, система перемещения заготовок внутри печи и система управления. Современные методические печи имеют полностью автоматическое управление технологическими параметрами. Основное отличие между ними – в количестве управляемых рядов горелок, вплоть до индивидуального управления каждой горелкой.

В методических печах могут применяться четыре вида отопления: торцевое, боковое, сводовое и комбинированное.

Преимуществом торцевого отопления является сосредоточение горелок в нескольких торцах, которое облегчает их обслуживание и обеспечивает равномерность нагрева по ширине печи. Недостатками торцевого отопления является падение температуры под пережимами между зонами, невозможность управления распределением температуры по длине зоны и невозможность обеспечения равномерного давления по длине печи, возможен перегрев отдельных поверхностей заготовок (кромки) при движении их в зонах перед пережимами.

Боковое отопление применяют либо при небольшой ширине печного пространства, либо в нижних зонах печи. Данный способ обеспечивает хорошую равномерность температур по длине зон печи, простую конструкцию печного пространства, малые затраты на строительство печи, равномерное давление по длине печи и уменьшение подсосов воздуха. Недостатки заключаются в трудности обеспечения равномерности нагрева по ширине печи, в усложнении обслуживания печи по сравнению с торцевым отоплением.

Интересным оказывается вопрос о влиянии скорости истечения газов из горелки на характер и степень выравнивания температур в объеме печи, а также на интенсификацию нагрева. В работе [1] отмечается, что исследования в этой области показали, что увеличе-

ние скорости струй мало сказывается на уменьшении расхода топлива, но при специальной ориентации факела можно организовать эффективный направленный теплообмен.

К достоинствам сводового отопления следует отнести высокую равномерность нагрева заготовок как по длине, так и по ширине, более гибкое управление тепловым и температурным режимами печи при изменяющихся условиях работы (переход на другую марку, размер, изменение производительности), равномерное давление по длине печи, что способствует уменьшению подсосов холодного воздуха в рабочее пространство печи через окно выдачи и различные неплотности в ограждающих конструкциях, простую конфигурацию рабочего пространства, которая позволяет уменьшить высоту стен и как следствие расход огнеупоров и потери теплоты через боковые стены. Результаты ряда исследований отечественных и зарубежных ученых [2 и др.] подтверждают преимущества отопления печей при помощи плоскопламенных горелок.

Несмотря на значительный перечень достоинств, данный тип нагревательных устройств имеет определенные недостатки: большое число горелок, что усложняет конструкцию и эксплуатацию печи; сложная система газо- и воздухораспределения; большие капитальные затраты; повышенная температура свода; повышенный расход электроэнергии на дутьевые вентиляторы для плоскопламенных горелок.

Как известно, тип горелок и их расположение влияют не только на энергетические, но и на экологические показатели печи. Использование плоскопламенных горелок позволяет минимизировать объем вредных выбросов [1].

Выбор способа отопления для конкретной печи осуществляется исходя из размеров печи и условий ее эксплуатации на основе технико-экономического анализа. С точки зрения качества нагрева и управляемости нагревательного устройства для печей с большой шириной наиболее эффективно сводовое отопление. Кольцевые печи по сравнению с печами с шагающим подом и балками имеют меньшую ширину пода (3–5 м) и, как правило, традиционно проектируются с боковым отоплением, что связано со сложностью системы газовой обвязки печи. Кроме того, при хорошей герметичности печи с кольцевым подом, обеспечиваемой при помощи водяных за-

творов, практически исключены подсосы воздуха, а следовательно, недостатки бокового отопления при малой ширине рабочего пространства практически исключаются. Поэтому для кольцевых печей применимость сводового отопления оценивается исходя из параметров конкретной печи.

Способы утилизации тепловой энергии. Очень важными параметрами с точки зрения экономичности работы печи являются температура отходящих газов и температура подогрева воздуха (газа). В связи с этим значительный интерес представляют вопросы выбора конструкции рекуператора, применение экономайзеров и котлоутилизаторов. В данном случае на первый план выходит уже не КПД печи, а общий КПД всей системы.

Тепловая энергия, покидающая печь с уходящими газами при любых оптимальных режимах, довольно значительна, и, следовательно, возникает необходимость в использовании ее различными способами. Существует три основных способа использования теплоты отходящих газов: удлинение методической зоны с целью более полного использования теплоты на прямой нагрев; подогрев в рекуператорах воздуха, подаваемого на горение, и реже низкокалорийного газа; утилизация тепла для выработки вторичных энергоресурсов.

Первый способ в комбинации с подогревом топлива и окислителя с технологической точки зрения является наиболее предпочтительным, однако удлинение печи негативно сказывается на капитальных затратах и увеличивает занимаемую агрегатом площадь. Подогрев до высоких температур воздуха, подаваемого на горение, при высокой температуре уходящих газов может оказаться нерациональным, так как высокая температура подогрева окислителя (и топлива) увеличивает температуру факела, что приводит к росту выбросов в окружающую среду оксидов азота. Утилизация тепла при помощи выработки пара не всегда удобна, так как требует строительства системы парораспределения, потребители которой могут быть удалены от печи на значительное расстояние. Другой вариант использования энергии пара – выработка электрической энергии в паротурбинной установке. Комбинация всех трех способов утилизации тепла уходящих из печи газов может позволить значительно увеличить общий КПД печи, а применение конвективных зон предвари-

тельного нагрева в сочетании с системой рециркуляции дымовых газов позволяет в зависимости от нагреваемого сортамента и материала достичь общего КПД на уровне 90% [3].

Оптимальный коэффициент рекуперации зависит от удельного расхода топлива и температуры дымовых газов и соответствует температурам подогрева воздуха в пределах 250–500 °С. При температурах подогрева ниже 250 °С срок окупаемости строительства системы рекуперации можем оказаться весьма значительным, а при температурах выше 500 °С увеличивается стоимость материалов, необходимых для изготовления рекуператора и воздухопроводов, а также топливосжигающих устройств.

Сравнительный анализ конструктивных особенностей печей с шагающим подом и балками и кольцевых печей. Наибольшее распространение в трубопрокатном производстве для нагрева цилиндрических заготовок перед прошивкой получили кольцевые печи, а также в некоторых случаях печи с шагающими балками и подом. В этой связи представляется интересным выявить преимущества и недостатки этих типов методических печей и возможности повышения эффективности их работы конструктивными и технологическими мероприятиями.

Главной конструктивной особенностью таких печей является перемещение заготовок по длине печи при помощи циклического движения пода либо его отдельных подвижных элементов с некоторым шагом, определяемым шагом раскладки заготовок.

Современные методические печи с шагающим подом (шагающий под, шагающие балки, комбинированный под) достигли высокого уровня использования теплоты в рабочем пространстве и высоких значений КПД. Кроме того, эти печи обладают многими технологическими преимуществами (высокой производительностью, низким уровнем угара металла и др.). С другой стороны, при нагреве заготовок цилиндрической формы в трубопрокатном производстве конструкцию таких печей необходимо усложнять, что повышает капитальные и эксплуатационные затраты.

Основными конструктивными элементами кольцевых печей являются вращающийся под, на котором неподвижно расположены заготовки, неподвижные ограждающие конструкции, сформированные сводом и боковыми стенками печи, совместно с горелочными уст-

ройствами, дымоотводами и комплектом загрузочных и разгрузочных механизмов. Горелки для отопления печи установлены как в наружной, так и во внутренней стене кольцевого рабочего пространства, реже применяется сводовое отопление. Дымовые газы удаляются из печи через дымоотбор, расположенный у окна загрузки. Возможны также варианты конструкций с промежуточными одним или несколькими дымоотборами. Загрузочный и разгрузочный механизмы только кладут заготовку на подину и снимают с нее, не передвигая заготовок.

Известно, что выбор типа печи для конкретных производственных условий осуществляется на основании анализа технологических и эксплуатационных параметров, а также стоимости ее проектирования, строительства и эксплуатации. Кроме параметров печи, характеризующих ее эффективность, на выбор влияют и другие характеристики: технология нагрева, удельные расходы огнеупоров и других материалов, надежность работы печи, стойкость элементов печи, уровень механизации работ по обслуживанию и ремонту, минимальное загрязнение окружающей среды, экономное использование площади цеха.

Для получения объективной оценки эффективности печей различных типов следует проанализировать такие технологические параметры, как производительность, напряженность активного пода, удельные расходы энергоносителей. При этом следует учитывать, что режимы нагрева заготовок в сравниваемых печах должны обеспечивать отсутствие перегрева поверхности заготовок в отдельных зонах печи и равномерность распределения температур по длине и сечению, требуемую температуру металла на выдаче, минимальные потери металла от окисления и обезуглероживания, отсутствие искривления заготовок и т. д.

Сравнение печей с шагающим подом и кольцевых печей по такому параметру, как напряженность активного пода при холодном посяде, показало, что у первых этот параметр, как правило, находится в пределах $0,6-1,1 \text{ т}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$, а у кольцевых печей – в пределах $0,3-0,6 \text{ т}/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ [4 и др.]. Это позволяет сделать вывод, что у кольцевых печей есть резервы повышения производительности за счет оптимизации режимов нагрева. Одним из наиболее распространенных ме-

тодов решения данной проблемы с целью сокращения продолжительности нагрева при обеспечении требуемого конечного перепада температур по сечению и коэффициента несимметричности нагрева является кантование заготовок. В этом случае эффективность нагрева заготовок в печи может быть значительно увеличена.

Согласно результатам анализа, проведенного институтом «Сталь-проект», оптимальное значение напряженности активного пода в зависимости от приведенных затрат на нагрев и удельного расхода топлива для печей с шагающими балками находится в пределах 0,6–0,75 т/(м²·ч). При этом с увеличением цены на топливо и продукцию оптимальное значение напряжения пода печи приближается к нижней границе этого интервала [5].

Оценка эффективности использования кольцевой печи и печи с шагающим подом в трубoproкатном производстве. Для трубoproкатного производства традиционно используют нагрев трубных заготовок в кольцевых печах либо в печах индукционного нагрева. Печи с шагающим подом и балками для нагрева трубных заготовок под прошивку применяют крайне редко. Практический интерес представляет сравнение режимов работы печи с шагающим подом с аналогичной ей по характеристикам кольцевой печью.

В работе [6] применимость нагревательных печей с шагающим подом и шагающими балками для нагрева трубных заготовок объясняется такими преимуществами, как возможность более рационально встраивать печь в технологический поток и уменьшение занимаемой производственной площади. Для обоснования эффективности нагрева цилиндрических заготовок в печи с шагающим подом были проведены опытные нагревы. Результаты эксперимента показали возможность использования печи с шагающим подом для нагрева цилиндрических трубных заготовок вместо печей с кольцевым подом [6]. В этом случае конструкцию печи необходимо усовершенствовать. Поду печи необходимо придать специальный профиль, высоту и шаг которого нужно выбирать с учетом сортамента и шага раскладки заготовок.

Несмотря на то что возможность эффективного применения печей с шагающим подом для нагрева заготовок под прошивку основана как на результатах теоретических исследований, так и на опыте

практического применения, использование кольцевых печей имеет неоспоримые преимущества.

1. При прошивке трубных заготовок они должны иметь определенную длину, поэтому нагрев длинных заготовок в печах с шагающим подом требует их дальнейшей порезки на выходе из печи, а следовательно, требуются технические решения, позволяющие производить порезку и при этом сохранять температуру поверхности отдельных заготовок. Нагрев коротких заготовок при многорядном расположении требует сложной конструкции шагающего пода и загрузочно-разгрузочных устройств. Использование однорядного расположения заготовок при одинаковой ширине и производительности кольцевой печи и печи с шагающим подом требует применения печи с шагающим подом большой длины для обеспечения одинаковых режимов нагрева. Кроме того, необходимый профиль шагающего пода для цилиндрических заготовок при эксплуатации печи требует постоянного обновления, что также свидетельствует в пользу применения кольцевых печей.

2. Применение конструкции пода с шагающими балками требует их охлаждения, следовательно, возрастают потери тепловой энергии с охлаждающей водой, которые составляют 5–15%. Кроме дополнительных потерь энергии, при применении конструкции печи с шагающими балками на заготовках появляются пятна с более низкой температурой, что неблагоприятно сказывается на уровне напряжений, возникающих в заготовках.

Для сравнения тепловой работы и эффективности печей с кольцевым вращающимся и с шагающим подом было рассмотрено два варианта: 1) печи, имеющие одинаковую площадь пода и длину и работающие с одинаковой производительностью; 2) реальные нагревательные печи, имеющие разные максимальные производительности и размеры, но работающие с одинаковой производительностью. При расчетах исходные условия принимали одинаковыми. Температуры по зонам печи выбирали согласно технологической инструкции и корректировали их, приводя к оптимальным режимам для конкретных условий.

За основу были взяты габариты кольцевой печи стана 250 ОАО «Днепровский металлургический комбинат». Общая длина тоннеля

такой печи составляет 56,6 м. Внутреннее пространство печи разделено на пять зон, длина каждой из которых составляет 15,3, 10,85, 10,85, 10,85 и 8,74 м. Ширина тоннеля печи – 3,5 м, высота – 1,57 м. Под печи толщиной 300 мм состоит из шамота. Свод и стенки являются комбинированными. Они состоят из двух слоев: слой минеральной ваты толщиной 50 мм и слой шамота толщиной 200 мм. При расчете печи с шагающим подом предполагалось, что она имеет точно такие же размеры и толщины стенок. Существенное различие между этими печами состоит в том, что тоннель кольцевой печи имеет форму кольца, а у печи с шагающим подом вытянут в прямую линию, при этом под кольцевой печи находится в нестационарном тепловом состоянии и испытывает циклический разогрев и охлаждение в процессе вращения. Расчеты выполнялись для производительности 40 т/ч. При расчетах использовали компьютерную программу, включающую расчет сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом, основанный на физико-математической модели радиационного теплопереноса в печах с учетом геометрии стальных заготовок [7] и решении задачи внутренней теплопроводности методом конечных элементов.

При проведении расчетов были использованы общие для всех режимов геометрические и физические свойства заготовки и ограждающих конструкций печи: материал заготовок – сталь 08; теплота окисления стали $Q = 5$ МДж/кг; под печи – огнеупорный бетон толщиной 200 мм; свод и стенки печи – огнеупорный бетон (200 мм) и легковесный шамот (50 мм); теплота сгорания газа – 33,7 МДж/м³; температура окружающей среды 20 °С. Для кольцевой печи длины зон взяты по средней линии.

Для варианта 1 для сравнения рассмотрена печь с шагающим подом с длинами зон, равными длинам зон кольцевой печи; для варианта 2 – с шагающим подом со следующими размерами: высота – 1,57 м; ширина – 12,4 м; четыре зоны длиной: 5, 5, 5 и 4,5 м; под печи – огнеупорный бетон толщиной 200 мм; свод и стенки печи – огнеупорный бетон (200 мм) и легковесный шамот (50 мм).

Входные параметры варианта 1: производительность 40 т/ч; сечение – круг диаметром 130 мм; длина заготовок 2 м; начальная температура заготовки 20 °С; конечная температура заготовки: 1210 ± 10 °С;

коэффициент избытка воздуха 1,05; температура подогрева воздуха 290 °С; максимально допустимый перепад температуры по сечению заготовки 150 °С; шаг раскладки 95 мм; скорость движения пода 12,4 мм/с. При одинаковых входных параметрах режима 1 были рассчитаны выходные параметры при различных температурах по зонам печи. Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов нагрева заготовок в печи с кольцевым и шагающим подом

Тип печи	Температура уходящих газов, °С	Максимальный перепад температур по сечению заготовки на выходе из печи, °С	Максимальный перепад температур по сечению заготовки в процессе нагрева, °С	Температура поверхности на выдвиге / средняя, °С	Потребление газа, м ³ /ч	УРУТ, кг у.т./т	Образование окислы, кг/т
Кольцевая	827	15	143	1218/1211	1993	57	6,9
	828	21	146	1213/1203	1986	56,7	6,7
С шагающим подом	683	8	144	1218/1214	1769	50,5	6,9
	669	5	139	1206/1203	1737	49,6	6,4

Входные параметры варианта 2: производительность 40 т/ч; сечение – круг диаметром 130 мм; длина заготовок – 5 штук по 2 м в один ряд; начальная температура заготовки 20 °С; конечная температура заготовки 1210±10 °С; коэффициент избытка воздуха 1,05; температура подогрева газовой смеси 290 °С; максимально допустимый перепад температуры по сечению заготовки 150 °С. Для входных параметров варианта 2 были рассчитаны выходные параметры при различных температурах по зонам печи, результаты расчетов приведены в табл. 2.

При сравнении результатов расчета, приведенных в табл. 1, очевидно, что при одинаковой температуре в момент выдачи заготовки потребление газа в печи с шагающим подом может быть меньше на 9–12%. При этом окиснообразование находится на том же уровне либо чуть меньше (1–3%), чем в кольцевой печи. Ниже также температура уходящих газов (на 15–18%) и неравномерность нагрева по сечению заготовки (на 30–50%). При сравнении кольцевой печи (табл. 1) с печью с шагающим подом, имеющей короткую длину (20 м)

и большую ширину (12,4 м), результаты расчетов нагрева заготовок в которой приведены в табл. 2, можно видеть, что потребление газа может быть меньше на 10–20%, а температура уходящих газов – на 20–30%. Следует отметить, что в процессе расчетов в печи с шагающим подом не учитывались потери с охлаждающей водой, величина которых составляет в среднем 3–7%.

Таблица 2. Результаты расчетов нагрева заготовок в печи с шагающим подом при различном шаге раскладки (S) и производительности 40 т/ч

Параметры режима	Температура уходящих газов, °С	Максимальный перепад температур по сечению заготовки на выходе из печи, °С	Максимальный перепад температур по сечению заготовки в процессе нагрева, °С	Температура поверхности на выдате / средняя, °С	Потребление газа, м ³ /ч	УРУТ, кг у.т./т	Образование окалины, кг/т
V = 2,48 мм/с, S = 95 мм	540	9	131	1217/1213	1563	44,6	9,9
	510	6	100	1205/1202	1487	42,5	8,3
V = 3,91 мм/с, S = 225 мм	585	6	145	1209/1206	1597	45,6	6,7
	583	7	144	1207/1204	1589	45,6	6,6
V = 4,185 мм/с, S = 250 мм	600	8	149	1210/1206	1625	46,4	6,4

Основным источником потерь тепловой энергии в исследуемых печах являются потери с уходящими газами, а в печах с шагающими балками – еще и потери на водоохлаждаемых элементах. Эти потери тепла зависят в первую очередь от качества изготовления изоляции данных элементов печи. Для охлаждения используются две различные системы: водяная и испарительная. Испарительная система охлаждения имеет преимущества перед водяной, так как резко сокращаются расходы воды и значительно расширяются возможности использования вторичных энергоресурсов. Кольцевая печь имеет малые потери через различные элементы, но высокую температуру уходящих газов (около 800 °С), поэтому основное внимание должно уделяться системе рекуперации и утилизации тепловой энергии уходящих газов.

Из анализа полученных результатов можно заключить, что печь с шагающим подом имеет более высокую эффективность нагрева по сравнению с кольцевой печью. С другой стороны, как это было отмечено выше, для нагрева заготовок круглого сечения требуется изготов-

ление специального профиля пода для исключения перекачивания заготовок, что является существенным недостатком данного типа печи перед кольцевой. Изменяя шаг раскладки, можно нагревать заготовки за одно и то же время, как при высокой, так и при низкой производительности. Это способствует уменьшению обезуглероживания и потерь от угара в периоды, когда стан, а соответственно и печь работают с пониженной производительностью. Если под имеет специальный профиль, то регулирование режима нагрева при помощи изменения шага раскладки существенно осложняется. Кроме того, при профильном поде условия теплообмена изменяются и неравномерность нагрева будет несколько выше, чем в модельных задачах. Также в модельных расчетах использовали одинаковые соотношения газ–воздух, подсосы воздуха принимались равными нулю, однако в кольцевой печи герметичность обеспечить легче, чем в печи с шагающим подом.

Сравнение режимов нагрева цилиндрических заготовок в печах с шагающими балками и кольцевых печах показывает, что нижний нагрев металла в печах с шагающими балками позволяет ускорить нагрев заготовок за счет исключения большого времени выравнивания температуры по сечению. В кольцевых печах интенсивный нагрев нижней стороны заготовки происходит только в начале методической зоны за счет высокой температуры пода, нагретого в зоне томления, а следовательно, ускорить нагрев можно только за счет применения операции кантования заготовки в процессе нагрева [8].

Таким образом, более высокая эффективность нагрева в печи с шагающим подом по сравнению с кольцевой печью связана с тем, что под находится в квазистационарном тепловом состоянии относительно зон печи. А в кольцевой печи, пройдя томильную зону, кольцевой под попадает в неотапливаемую зону предварительного нагрева, где его температура начинает уменьшаться, а теплота, накопленная подом, отдается не только металлу, но и уходящим газам, имеющим более низкую температуру относительно температуры пода.

Полученные при расчетах результаты позволяют сделать следующие выводы:

- 1) по конструктивным и технологическим параметрам для нагрева трубных заготовок под прошивку преимуществом обладает кольцевая печь;

2) по эффективности нагрева печь с шагающим подом (непрофилированным) имеет несколько лучшие показатели, чем кольцевая;

3) для кольцевой печи характерна высокая температура уходящих газов, поэтому особое внимание необходимо уделять системе рекуперации тепла.

Из анализа работы методических печей современных конструкций также можно заключить, что современные печи имеют сравнимые КПД и применимость их необходимо оценивать прежде всего возможностью обеспечения требуемых технологических параметров. Для нагрева цилиндрических трубных заготовок наиболее предпочтительна конструкция кольцевой печи с вращающимся подом, которая имеет резервы по повышению эффективности ее работы при применении кантователей заготовок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сорока Б. С. Интенсификация тепловых процессов в топливных печах. – Киев: Наук. думка, 1993. – 416 с.
2. Сорока Б. С., Еришов А. Е. // Прогрессивная технология и оборудование для нагрева под штамповку: Материалы конф. – М.: О-во «Знание» РСФСР (МДНТП), 1976. – С. 52–61.
3. Витте М. Новые разработки и тенденции в конструировании нагревательных печей для предприятий черной металлургии // Металлургическое производство и технология. – 2005. – № 1. – С. 64–65.
4. Гусовский В. Л., Ладыничев М. Г., Усачев А. Б. Современные нагревательные и термические печи (конструкции и технические характеристики). – М., 2001. – 656 с.
5. Кривошеин А. Д., Оркин Л. Г. Тенденция развития и анализ состояния нагревательных печей прокатного производства // Совершенствование системы отопления и повышение тепловой эффективности металлургических печей: Темат. отрасл. сб. – М.: Металлургия, 1984. – С. 7–15.
6. Денисов М. А., Кузовников А. А., Легенький В. И., Михалев Г. А. Конструктивные и режимные параметры печи с шагающим подом для нагрева трубных заготовок // Совершенствование системы отопления и повышение тепловой эффективности металлургических печей: Темат. отрасл. сб. – М.: Металлургия, 1984. – С. 7–15.
7. Тимошпольский В. И., Герман М. Л., Гринчук П. С., Кабишов С. М. Математическое моделирование сопряженного теплообмена в нагревательных печах с подвижным подом // Инж.-физ. журн. – 2006. – № 3, т. 79.
8. Тимошпольский В. И., Самойлович Ю. А., Трусова И. А., Андрианов Д. Н. Исследование процессов кантования цилиндрических заготовок в кольцевых печах. Сообщ. 1. Физ.-мат. моделирование // Литье и металлургия. – 2005. – № 3. – С. 93–97.