

ОТЗЫВ  
официального оппонента Султангузина Ильдара Айдаровича,  
доктора технических наук, профессора,  
кафедры промышленных теплоэнергетических систем,  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ», г. Москва  
на диссертацию Феоктистова Андрея Владимировича  
«Развитие теории тепловой работы и технологических основ  
ресурсосбережения в твердотопливных низкошахтных печах»  
по специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика  
на соискание ученой степени доктора технических наук

**Актуальность темы.** Низкошахтные печи являются распространенными теплотехническими агрегатами и нашли широкое применение для тепловой обработке кусковых материалов в различных отраслях промышленности. Только в России в настоящее время в эксплуатации находится несколько сотен низкошахтных печей, которые применяют для получения расплавов чугуна и силикатных материалов. Печи такого типа – это сложные технические устройства, проектирование которых и реализация в них различных технологий требует глубокого понимания физической природы процессов и явлений, протекающих в рабочем пространстве. В современной теории тепловой работы печей шахтным печам отводится целый раздел, однако в большей степени рассматриваются теоретические аспекты в привязке к металлургическим доменным печам. Автор диссертации в своей работе затрагивает относительно малоизученную область, в которой в качестве объекта исследования выступают технологии плавки материалов в низкошахтных печах, а предметом исследования – основополагающие тепломассообменные, газодинамические процессы и тепловая работа твердотопливных низкошахтных печей.

Прогрессивность подхода автора заключается в рассмотрении теории тепловой работы и технологий плавки с позиции ресурсо- и энергосбережения, иными словами повышения эффективности работы печей. Такой подход в настоящее время имеет особую актуальность и четкую ориентацию на практическое приложение теоретических разработок.

Проблема необходимости поиска и применения заменителей основного топлива низкошахтных печей – кокса глобальна и научной общественности известна достаточно давно, однако до настоящего времени в полном объеме не решена ни на теоретическом ни на технологическом уровне. В связи с этим тема диссертации и ее результаты актуальны, имеют важное научно-прикладное и хозяйственное значение.

**Общее содержание работы.** Материалы диссертации изложены на 312 страницах основного текста, включающего 54 рисунка, 41 таблицу. Работа состоит из введения, шести глав, заключения, приложений, список литературы из 312 наименований.

В целом диссертация имеет логичную структуру, материал изложен последовательно, практической реализации решений предшествует теоретическая проработка, научное обоснование, прогнозное моделирование с применением математических моделей.

**В введении обоснована** актуальность решаемой проблемы, сформулированы цель и задачи исследования, изложена научная новизна и практическая значимость работы, а также приведены основные положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** представлен обзор литературы и современное состояние вопроса в области основ теории теплообмена в плотном слое, математического аппарата процессов тепломассопереноса и газодинамических процессов, теории и практике плавки чугуна и силикатных материалов, теории горения топлива в слое, газодинамики и теплообмена в зернистом слое.

Низкошахтные печи выделены в отдельную группу шахтных печей. Для нее сформулированы и обоснованы характерные классификационные признаки: относительно небольшая высота столба шихтовых материалов (не более 4,5 – 5,0 м), ограниченные размеры горизонтального сечения (не более 2,0 – 3,0 м) используемого слоя, скорость движения вдуваемых газовых струй не более 75 – 80 м/с, низкая глубина физико-химических преобразований исходных материалов, относительно малая продолжительность пребывания шихты в шахте печи, как правило не более 2,5 – 3 ч. Показано, что одним из основных направлений ресурсосбережения является применение заменителей кокса для низкошахтных печей, переход на более дешевое и распространенное природное топливо, в частности антрацит, тощие угли и пылеугольное топливо.

Автором показана особая актуальность разработки новых способов и технологий эффективного ведения плавки в низкошахтных печах, обеспечивающих полную замену кокса. В качестве основных заменителей кокса предлагаются антрацит или тощие угли. При этом одним из основных преимуществ позиционируется экономический фактор (стоимость антрацита по сравнению со стоимостью кокса в 4 – 8 раз ниже, а стоимость тощих углей почти в 2 раза меньше, чем антрацита). Теплотехнические характеристики антрацита высоки, он имеет меньшую по сравнению с коксом зольность и наибольший процент углерода из всех типов угля. Автором подробно рассмотрены научно-технологические проблемы сдерживающие применение антрацита, которые связаны с его склонностью к растрескиванию и образованию мелких фракций в процессе нагрева.

Автором детально проанализирован имеющийся материал, литературные источники и практический опыт в области теории, технологии, конструкций и особенностей эксплуатации низкошахтных печей, способов интенсификации и повышения эффективности тепловой работы. Рассмотрены фундаментальные труды московских, уральских и сибирских ученых теплоэнергетиков и теплотехников.

На основе проведенного обзора литературы и анализа современного состояния вопроса сформулированы задачи диссертационного исследования.

**Во второй главе** приведены данные физического моделирования теплообменных и газодинамических процессов в низкошахтных печах, установлено, что

геометрическое подобие выполняется четким соотношением между высотными параметрами печи (полезной высотой печи, высотой топливной насадки, высотой зоны подогрева) и ее внутренним диаметром. Установлено, что удельная производительность печи не зависит от ее диаметра, а определяется удельной подачей дутья, расходом кокса, содержанием кислорода в дутье, углерода в топливе,  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ , % в отходящих газах.

Диссертантом проведены серии многовариантных расчетов сил давления столба шихты на топливную насадку для печей различного диаметра при использовании в качестве топлива кокса и антрацита. Анализ данных, показывает, что для всех вариантов отопления печи увеличение диаметра приводит к росту силы давления. При работе печи на коксе силы давления на топливную насадку почти в 2 раза выше, чем при работе печи на антраците для всех исследованных диаметров. Установлено, что при переходе от кокса к использованию в качестве топлива антрацита или тощих углей на неподготовленной шихте высота печи уменьшается и составляет  $H_n = 3,249\sqrt{D}$  вместо  $H_n = 4,345\sqrt{D}$ .

**Третья глава** посвящена разработке усовершенствованной комплексной детерминированной математической модели процесса плавки материалов в низкошахтных печах. Модель позволяет исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи. Автором проведена настройка и верификация математической модели с использованием результатов промышленных экспериментов по плавке чугуна в низкошахтных печах с применением дутья, обогащенного кислородом. Погрешность расчета температуры чугуна не превышает 12 °С. Математическая модель признана достоверной, а ее точность удовлетворительной для прогнозных и инженерных расчетов.

Вторая и третья главы фактически представляют теоретическую часть диссертации и содержат современные подходы к теоретическим исследованиям тепловой работы печей – применение теории подобия с ориентацией на физическое моделирование и математическое моделирование с применением детерминированных математических моделей.

**Четвертая глава** посвящена проектированию, конструированию исследовательского полупромышленного комплекса (ИПК) на основе низкошахтной печи. Разработанные методы расчета могут служить основой для проектирования промышленных плавильных комплексов на основе низкошахтных печей.

**В пятой главе** представлены результаты экспериментов, проведенных диссидентом на ИПК. Анализ плавок, проведенных на холодном дутье с использованием в качестве топлива антрацита, показывает, что последний сильно растрескивается на мелкие куски. Растрескивание происходит за счет высоких механических и термических напряжений по объему куска топлива в кислородной зоне, где его поверхность разогревается до 2000 – 2100 °С. Для снижения термических напряжений в кусках антрацита, автором предложено производить уменьшение градиентов температуры на его поверхности, что возможно при подогреве и увлажнении дутья. В главе приведены результаты газового анализа, измерений температуры различных топлив в процессе плавки и произведено

обоснование ресурсосберегающих технологий плавки в твердотопливных низкошахтных печах.

**В шестой главе** представлены результаты промышленного освоения разработанных технологий.

Для оценки экономической эффективности применения кислорода проведено исследование влияния соотношения цен на топливо и кислород на общие затраты при проведении плавки. Результаты исследования показали, что экономически целесообразно (увеличение затрат на применение кислорода меньше, чем снижение затрат от сокращения расхода кокса) использовать обогащение дутья кислородом при превышении стоимости 1 кг кокса над стоимостью 1 м<sup>3</sup> кислорода минимум примерно в 7 – 8 раз. Учитывая, что стоимость кокса значительно выше чем стоимость антрацита и тощих углей, то обогащение дутья кислородом в большей степени ориентировано на низкошахтные печи, работающие на коксе.

Автором убедительно проиллюстрировано повышение тепловой эффективности работы печи при применении разработанных технологий. Сопоставление результатов расчетов теплового баланса и результатов промышленных экспериментов по обогащению дутья кислородом при плавке чугуна в низкошахтных печах показывает, что на практике обогащение дутья кислородом при сохранении расхода кокса оказывает влияние одновременно на температуру расплава и производительность печи. Оценка изменения физического тепла чугуна, например, при повышении производительности печи на 20 % и снижении температуры расплава на 50 °C (с 1300 до 1350 °C) (показатели, полученные при промышленных экспериментах) показывает, что в первом случае оно увеличится примерно на 220 – 230 кДж/кг расплава, а во втором снижается примерно на 30 кДж/кг, что обеспечивает положительный совокупный эффект в 190 – 200 кДж/кг и подтверждает повышение тепловой эффективности печи при обогащении дутья кислородом.

В главе проведены исследование и анализ свойств чугуна, выплавляемого по разработанным технологиям. Установлено, что химический состав и литейные свойства чугуна, полученного с применением в качестве топлива антрацита, находятся на высоком технологическом уровне. Из полученного расплава можно изготавливать отливки, соответствующие по своему химическому составу и механическим свойствам требованиям ГОСТов.

**Наиболее значимые результаты диссертации.** В результате проведенных исследований разработаны теоретические и технологические основы ресурсосбережения и повышения энергоэффективности твердотопливных низкошахтных печей на основе интенсификации тепломассообменных процессов и замены топлива с кокса на антрацит и тощие угли. Доказана и научно обоснована эффективность и перспективность замены кокса на антрацит и тощие угли при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах. Получены основные зависимости и закономерности для расчета конструктивных, технологических и теплотехнических параметров низкошахтных печей при переходе на другие виды твердого топлива.

Определены рациональные соотношения содержаний антрацита и кокса в топливных насадках, позволяющие обеспечить устойчивую работу низкошахтных печей. Разработана методика аттестации топлив, основанная на определении относительной прочности топлива, зависящей от горения, разрушения и газификации топлива. Проведенные на спроектированной установке исследования прочности твердого топлива позволили сформировать критериальный ряд соотношений содержаний кокса и антрацита с изменением их концентраций на 10 %.

Установлен механизм влияния подогрева и увлажнения дутья на процесс плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах при использовании в качестве топлива антрацита, произведено его теоретическое и технологическое обоснование. Применение холодного дутья и антрацита в качестве топлива негативно сказывается на технологическом режиме плавки из-за высоких градиентов температуры, механических и термических напряжений по объему куска топлива в кислородной зоне. Снижение температуры поверхности антрацита, напряжения в поверхностных слоях куска топлива в кислородной зоне достигается за счет подогрева и увлажнения дутья по разработанным и внедренным в условиях промышленного производства технологическим регламентам дутьевых режимов.

Обоснован уровень загрузки материалов в низкошахтную печь и определены рациональные расходы дутья при двухрядной подаче, установлено, что плавку чугуна и силикатных материалов в печах, использующих антрацит в качестве топлива, необходимо вести при уровне загрузки материалов в печь, составляющем  $(2,5 \div 2,8)\sqrt{D_{\text{ин}}}$ , подогреве дутья до  $450 - 550^{\circ}\text{C}$  с одновременным его увлажнением до 10 – 15 %. В этом случае достигаются рациональные параметры плавки по температуре расплава и производительности печи. Подачу в кислородную зону подогретого дутья необходимо осуществлять в равных количествах на двух горизонтах с расстоянием между ними, равным длине кислородной зоны. Замена кокса на антрацит в качестве топлива для низкошахтных печей в совокупности с подогревом до температур не ниже  $400^{\circ}\text{C}$  и увлажнением дутья до 10 – 15 % обеспечивает высокие показатели шахтной плавки (температуру расплава и производительность печи), повышение тепловой эффективности печи (экономию 12,5 кг у.т./т чугуна и повышение КПД на 5,5 %), снижение себестоимости производимой продукции за счет использования более дешевого топлива.

Результаты получены лично автором или при непосредственном его участии и подтверждают весомый личный вклад автора в разработку проблемы повышения энергоэффективности твердотопливных низкошахтных печей.

**Новые научные результаты, полученные автором.** На основе теоретического анализа, с учетом требований теории подобия и натурного моделирования, научно обоснованы условия физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов в низкошахтных печах. Разработаны научные основы сбережения энергетических ресурсов путем замены кокса на антрацит и тощие угли при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах, которые включают установленные и научно обоснованные новые и уточненные известные закономерности, позволяющие определять высоту кислородной зоны

для слоевого сжигания твердого топлива в шахтных печах с учетом коэффициента формы кусков, высоту топливной насадки, температуру поверхности кусков твердого топлива, прогнозировать температуру расплава на выходе из печи, в частности, установлено, что высоты низкошахтных печей связаны с механикой движения шихтовых материалов к очагам горения по плоскостям скольжения, расположенным под углом внутреннего трения к горизонтальной плоскости, который для обеспечения стабильного движения шихты к очагу горения должен составлять  $54 \pm 2^\circ$ . На основе теоретических исследований и математического моделирования выявлены особенности и установлены основные закономерности процессов сжигания пылеугольного топлива в неразрыхленном плотном слое очага горения низкошахтных печей. По результатам анализа данных, полученных при математическом моделировании и промышленных экспериментах, установлены и научно обоснованы новые закономерности влияния обогащения дутья кислородом на температуры расплава, отходящих газов и содержание в них  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ .

Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации научно обоснованы.

**Практическая значимость работы.** Практическая значимость работы очевидна. Результаты диссертационного исследования имеют широкую область практического применения.

Для промышленных предприятий, эксплуатирующих низкошахтные печи, разработаны ресурсосберегающие энергоэффективные технологии плавки силикатных материалов и чугуна, позволяющие за счет замены кокса на антрацит и интенсификации тепломассообменных процессов снизить себестоимость производимой продукции.

Для проектных организаций практический интерес представляют полученные автором соотношения, зависимости и закономерности для осуществления проектных расчетов низкошахтных печей, работающих на антраците и тощих углях.

Для научно-исследовательских организаций разработана новая методика аттестации топлив, комплексная детерминированная математическая модель процессов плавки кусковых материалов в твердотопливных низкошахтных печах.

Практическая значимость работы подтверждается актами внедрения разработок в действующее производство и экономическими эффектами, полученными по результатам внедрения.

**Достоверность результатов работы** обеспечена представительным объемом расчетов, результатов экспериментов, а также использованием методов исследования, соответствующих современному состоянию в области процессов теплообмена, горения, газообразования, механики движения материалов, протекающих в низкошахтных печах и подтверждается удовлетворительным совпадением расчетных данных с экспериментальными результатами, полученными на физических моделях и действующем промышленном оборудовании. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследо-

вателями, и не противоречат физическим закономерностями в смежных областях знаний.

По материалам диссертации опубликовано 65 печатных работ, в том числе 28 в изданиях, рекомендованных ВАК, две монографии, 14 патентов на изобретение и патентов на полезную модель, 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Наиболее принципиальные замечания и вопросы по диссертационной работе:

1. В диссертации приводятся характеристики металлошихты и кокса, одно не отражены в полной мере результаты по оценке влияния качества кокса на технологию плавки.

2. Какая взаимосвязь вводимых автором понятий прочности кокса (топлива), относительной прочности твердого топлива, степени измельчения кокса с общепринятыми прочностными характеристиками кокса: истираемость кокса М10, холодная прочность М25, горячая прочность CSR, реакционная способность кокса?

3.П. 4.7 посвящен описанию свойств антрацитов и тощих углей и содержит хорошо известные литературные данные, логичнее было бы рассмотреть этот вопрос в первой главе, в литературном обзоре.

4.При проведении промышленных плавок с обогащением дутья кислородом автор зафиксировал интересное с теплотехнической точки зрения явление. При подаче дополнительного кислорода температура расплава повышалась, достигла максимума и далее стала снижаться. Автор с позиции теории объяснил причины этого явления, однако следовало бы установить его закономерности, которые имеют большое практическое значение, например связать расход кислорода с временем наступления максимума температур и непосредственно значение максимальной температуры расплава и т.п.

5. В п.6.6 автор рассматривает вопрос повышения эффективности работы печи при применении в качестве топлива антрацита, подогреве, увлажнении и обогащении дутья кислородом. Поскольку одним из ресурсосберегающих мероприятий автор заявляет вдувание пылеугольного топлива, целесообразно было в этом разделе рассмотреть вопрос тепловой эффективности печи при использовании пылеугольного топлива.

6.В п.6.7 автор анализирует качество чугуна, выплавленного по разработанным технологиям, однако в диссертации отсутствует информация о качестве силикатных материалов получаемых с использованием разработок автора.

Отмеченные замечания не снижают общего положительного впечатления от диссертационной работы.

## **Заключение**

Диссертация Феоктистова Андрея Владимировича соответствует специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором

исследований решена научная проблема – повышение энергоэффективности твердотопливных низкошахтных печей посредством замены кокса, используемого в качестве топлива, на антрацит и тощие угли и интенсификации тепломассообменных процессов, имеющая важное хозяйственное значение.

Актуальность темы исследований, достоверность полученных результатов, научных положений работы и личный вклад автора в разработку данной научной проблемы несомненны, публикации полностью отражают её содержание.

Диссертация соответствует требованиям, установленным п.9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» постановления Правительства Российской Федерации №842 от 24.09.2013 г., а её автор достоин присуждения учёной степени доктора технических наук по 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика.

Профессор кафедры  
промышленных теплоэнергетических  
систем ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ»,  
доктор технических наук, профессор

Султангузин Ильдар Айдарович

111250, Россия, г. Москва,  
ул. Красноказарменная, д. 14  
Тел.(495) 362-72-17  
E-mail: SultanguzinIA@mpei.ru

«01» ноября 2016 г.

Подпись И.А. Султангузина удостоверяю

Начальник Управления  
по работе с персоналом НИУ «МЭИ»



Н.Г. Савин