ОТЗЫВ
официального оппонента Богомолова Александра Романовича
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 учёной степени доктора технических наук

Актуальность темы диссертации определяется направлением исследований в рамках перечня критических технологий Российской Федерации «Технология энергоэффективного производства и преобразование энергии на органическом топливе» и приоритетного направления по энергосбережению, связанных с развитием теории и технологии шахтной плавки, совершенствованием конструкций низкошахтных печей.

Традиционным топливом для шахтных плавильных печей является металлургический кокс. Стоимость кокса составляет 50% от себестоимости производимой продукции. Ввиду чего, замена кокса для низкошахтных печей на более дешевое и распространенное природное топливо, в частности антрацит, тощие угли и пылеугольное топливо, является одним из наиболее привлекательных с экономической точки зрения направлений ресурсосбережения.

В настоящее время стоимость антрацита по сравнению с коксом (в зависимости от месторождения, марки и свойств) в 4 – 8 раз меньше, а стоимость тощих углей почти в 2 раза меньше чем антрацита. Теплотехнические характеристики антрацита весьма высоки, его теплотворная способность выше, чем у кокса. Антрацит имеет меньшую по сравнению с коксом зольность и наибольший процент углерода из всех типов угля. Организация подачи его в печь, как правило, не требует дополнительных капитальных вложений. В то же время главной причиной ограничения его применения является склонность к растрескиванию и образованию мелких фракций в процессе нагрева. Это приводит к нарушению нормального хода плавки.

В связи с чем, необходимо разработать теорию тепловых процессов плавки материалов в низкошахтных печах при замене кокса; выполнить исследования влияния различных факторов и подтвердить теоретические зависимости на полупромышленном комплексе.

Основная идея диссертации заключается в использовании известных и разработанных автором мероприятий в виде определяющих зависимостей, характеризующих тепло-массообменные процессы в низкошахтных печах, с целью усовершенствовать существующую математическую модель для описания этих процессов, а также в проверке адекватности модели с результатами работы созданной полупромышленной установки, что в дальнейшем даст возможность использовать результаты исследований для проектирования новых низкошахтных печей, выходящих по размерам за пределы нормального ряда, как в меньшую, так и в большую сторону.

Наиболее значимыми результатами диссертации следует признать:

1. Научно обоснована и экспериментально подтверждена 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.

2. Выявлены особенности и установлены основные закономерности процессов горения пылеугольного топлива в не разрыхленном плотном слое очага горения низкошахтных печей. Установлено, что максимальный эффект от сжигания пылеугольного топлива достигается при его полном сгорании в пределах кислородно-окислительной зоны.

3. Спроектирован и введен в эксплуатацию исследовательский полупромышленный комплекс на основе твердотопливной низкошахтной печи. Определены рациональные соотношения содержаний антрацита и кокса в топливных колошах, 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 ряд соотношений содержаний кокса и антрацита с изменением их концентраций на 10 %.

4. 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 может быть достигнуто подогревом и увлажнением дутья по разработанным и внедренным в условиях промышленного производства технологическим регламентам дутьевых режимов.

5. Установлены закономерности взаимосвязи пиковых значений содержания газов и границ основных технологических зон (кислородной и восстановительной) при различных количествах в топливных колошах кокса и антрацита и разных дутьевых режимах, выявленные в результате газового анализа по содержанию CO, CO_2, O_2 рабочего пространства низкошахтной печи. Экспериментальные данные подтверждены результатами математического анализа по определению высоты топливной насадки, обоснованию высоты кислородной зоны, расчета температуры поверхности топлива. Установлено, что длина кислородной зоны соответствует максимуму содержания CO_2 в топливной насадке; сделан вывод о том, что длина кислородной зоны при плавке на антраците с применением подогретого и увлажненного дутья приближается к длине при плавке на коксе; температура поверхности куска топлива, достигаемая максимума в кислородной зоне на холодном дутье, составляет: для кокса $T_к$ = 2110°C, для антрацита $T_а$ = 2080°C; а при

использовании подогретого и увлажненного дутья в зависимости от его параметров температура может быть снижена на 150 ÷ 200°С.

6. Разработана усовершенствованная комплексная детерминированная математическая модель процесса плавки материалов в низкошахтных печах, позволяющая исследовать влияние подогрева, обогащения дутья кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печи. С использованием модели разработаны номограммы процесса плавки в диапазоне изменения основных входных параметров: расхода кокса – от 10 – 20%; количества дутья – от 30 до 120 $м^3/(м^2 \cdot мин)$.

8. 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 $(2{,}5 \div 2{,}8)\sqrt{D_{нп}}$, подогреве дутья до 450 – 550 ºС 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.

10. Результаты исследований с учетом разработанных мероприятий по методам интенсификации, энергоэффективности и ресурсосбережения в технологии плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах внедрены и используются на предприятиях – ЗАО «Изолит» (г. Новокузнецк); ЗАО «ЗАВОД УНИВЕРСАЛ» (г. Новокузнецк); ЗАО «ГМЗ» (г. Гурьевск), АО «ЕВРАЗ – Объединенный Западно–Сибирский металлургический комбинат» (г. Новокузнецк).

Новыми научными результатами, полученными автором, являются:

1. На основе теоретического анализа, с учетом требований теории подобия и натурного моделирования, научно обоснованы условия подобия физического моделирования теплообменных и аэродинамических процессов в низкошахтных печах, установлено, что температурный режим в холостой колоше и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных в работе основных соотношений между геометрическими параметрами печи (высотой топливной насадки, полезной высотой и внутренним диаметром печи), размерами кусков топлива и шихты.

2. 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 закономерности, позволяющие обосновать высоту кислородной зоны для слоевого горения твердого топлива в шахтных печах с учетом коэффициента формы куска, высоту топливной насадки, определить температуру поверхности твердого топлива, прогнозировать температуру расплава на выходе из печи.

3. На основе теоретических исследований выявлены особенности и установлены основные закономерности процессов горения пылеугольного топлива в не разрыхленном плотном слое очага горения низкошахтных печей.

4. Установлены закономерности влияние подогрева и увлажнения дутья на протекание основных тепло-массообменных и газодинамических процессов при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах, при использовании антрацита и тощих углей в качестве топлива.

5. По результатам анализа данных, полученных при математическом моделировании и промышленных экспериментах, установлены и научно обоснованы новые закономерности влияния обогащения дутья кислородом на температуру металла на выходе из печи, температуры и содержания CO_2 и CO в отходящих газах.

6. Обоснованы подходы к созданию новых конструкций теплообменных аппаратов рекуперативного типа для низкошахтных печей с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками.

7. Установлены закономерности влияния основных технологических и теплотехнических параметров плавки чугуна в низкошахтных печах, при использовании в качестве топлива антрацита и тощих углей, на химический состав, комплекс литейных и механических свойств чугуна, подтверждена возможность получения продукции заданного уровня качества.

Достоверность полученных результатов подтверждается совместным использованием современных методов теоретического анализа и экспериментального исследования процессов теплообмена, горения, газообразования, механики движения материалов, протекающих в низкошахтных печах; сочетанием воспроизводимых по точности методов физического и математического моделирования, сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей.

Диссертация содержит 312 с. общего объема машинописного текста, включая приложения на 29 с., список литературы из 312 наименований, 54 рисунка, 41 таблицу. Работа состоит из введения, 6-х глав, заключения.

По теме диссертации автором опубликовано 65 работ, из них 28 – в рецензируемых изданиях по списку ВАК, 2 монографии, 14 патентов на изобретение и полезную модель, 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных, в которых материалы диссертации отражены достаточно полно.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Замечания

1. В уравнении (2.5) для определения общей поверхности реагирования коэффициент формы частиц φ поставлен в числителе, а должен быть в знаменателе [118, М.Э. Аэров, О.М. Тодес, 1975]. Коэффициент формы для частиц неправильной формы всегда меньше 1. φ = 1 для сферической частицы, так как шар имеет минимальную поверхность при данном объеме, т.е. для тел другой формы $\varphi < 1$. На с. 61 введен коэффициент формы куска шихты, который обозначен $A = S_k / S_o$, и принимает значения больше 1. На с. 94 автор использует для обозначения

коэффициента формы $\psi_к$. На с. 145-146 коэффициент формы обозначен как Φ Почему в работе автор использует для обозначения коэффициента формы различные обозначения и различные подходы к его определению?

2. На с. 57 представлен критерий Рейнольдса в виде $\mathrm{Re} = \frac{q_0 d_k}{\nu} \frac{\overline{T}_g}{273}$. Изменение плотности газа от температуры при неизменном давлении зависит именно как указано в формуле. Изменение динамической вязкости зависит от отношения температур в степени, например, наиболее распространена степень 1,7 или 1,8. Почему принято отношение температур в первой степени?

3. На с. 67 приведен расчет коэффициента пропорциональности k в уравнении (2.28). Рассматриваются условия плавки на эталонной низкошахтной печи с эталонной шихтой. Геометрические размеры одной чушки: 550×90×50 мм. Автор приводит площадь поверхности чушки $S_т = 0{,}116$ м^2. Расчет показывает, что $S_т = 0{,}163$ м^2. Объем чушки $V = 0{,}002475$ м^3. Тогда эквивалентный диаметр шара этого объема равен $d_0 = 0{,}1675$ м. Поверхность эквивалентного шара $S_0 = 0{,}0881$ м^2. Коэффициент формы такой чушки равен $A = S_т / S_0 = 0{,}163/0{,}0881 = 1{,}85$. У автора коэффициент формы равен $A = 1{,}329$. Как повлияют вычислительные ошибки на дальнейшие расчеты и выводы, ведь коэффициент пропорциональности k в уравнении (2.28) будет иметь другое значение?

4. Выражение (2.37) описывает теплообмен между газом и зернистым слоем в каналах, как пишет автор, ***циклического*** сечения. О какой форме сечения идет речь? В (2.37) определяющим критерием является число Прандтля Pr. Логично, если определяющим критерием будет число Пекле $\mathrm{Pe} = \mathrm{Re}\,\mathrm{Pr}$. Автору необходимо привести пояснение.

5. На с. 112 записано (последний абзац), что частица пылеугольного топлива (ПУТ) проходит путь до соударения, равный двум диаметрам куска кокса, а на с. 116 (рис. 3.3), максимальный путь частицы ПУТ до соударения с куском кокса равен диаметру куска кокса. В чем причина такого разночтения?

6. В тексте диссертации приведена формула $H_{тн} = 0{,}45 + 0{,}7D$. В одном случае это (2.46) со ссылкой на источник [204], во втором случае – (3.149) со ссылкой на источник [126]. Что является истиной?

7. В разделе 3.5 по определению теплопотерь через стенки шахтной печи законченного выражения расчета тепловых потерь нет. Необходимо представить законченное уточнение.

8. На с. 128 (первый абзац) по обобщенной математической модели были рассчитаны тепловые потери $\Delta T_г$. Вероятнее всего это разность температур или можно назвать температурные потери. Автору следует раскрыть смысл $\Delta T_г$, так как по тексту нет пояснений более того, что это температурные потери.

9. На с. 41 (первый абзац) приведена зависимость по определению падения давления в слое кокса и шихтовых материалов по Эгону. В литературе на русском эту фамилию пишут и произносят как Эргун или Эрган (S. Ergun). Автору целесообразно сослаться на источники при написании уравнений (4.5) и (4.6). Автору следует пояснить, почему в разделе 4.2 при расчете номинальных

характеристик воздуходувных средств используется иное уравнение по определению коэффициента сопротивления кокса и шихты – уравнение Брауэра, а на с. 213 это уравнение из двух слагаемых записано с другим коэффициентом пропорциональности в одном из записанных?

Несмотря на высказанные критические замечания, официальный оппонент формулирует общее заключение, которое основано на практической значимости полученных результатах исследований автора.

Общее заключение по диссертации:

Диссертация Феоктистова Андрея Владимировича соответствует специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой, на основании выполненных автором исследований изложены научно обоснованные технические и технологические разработки, представляющие значительный интерес при плавке чугуна и производстве силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах при использовании в качестве топлива – антрацита, тощего угля и пылеугольного топлива. Полученные результаты имеют существенное значение для развития страны, в решении задач повышения энергетической эффективности промышленного комплекса, где используются низкошахтные печи.

Диссертация соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», постановления Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор Феоктистов Андрей Владимирович достоин присуждения учёной степени доктора технических наук.

Официальный оппонент,
ведущий научный сотрудник
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук

доктор технических наук,
доцент Богомолов Александр Романович

Адрес: 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 1
тел. +79235170303
E-mail: barom@kuzstu.ru

ЗАВЕРЯЮ
Зав. канцелярией ИТ СО РАН
Лисунова С.В.
«21» ноября 2016 г.