ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Феоктистова Андрея Владимировича «Развитие теории тепловой работы и технологических основ ресурсосбережения в твердотопливных низкошахтных печах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика

Актуальность темы диссертационного исследования бесспорна, так как она направлена на решение крупной научно-технической проблемы повышения энергоэффективности производства в условиях преобразования в теплоту скрытой энергии органического топлива, что имеет важное экологическое, социальное и хозяйственное значение для развития экономики России. Снижение энергоемкости производства всего за счет совершенствования и разработки новых энергоэффективных технологий особенно важно для нашей страны, поскольку энергоемкость отечественного внутреннего валового продукта выше, чем в развитых странах Европы в 3 раза, а в сравнении с США - почти в 2 раза. Десятилетия неэффективного использования энергетических ресурсов создали огромный неиспользованный потенциал энергосбережения, достигающий 30-40% существующего энергопотребления.

В себестоимости получаемой продукции энергетические затраты составляют 50-60%. Энергетические затраты на выплавку чугуна в шахтных печах остаются еще высокими и значительно превосходят теоретические значения. При этом основная доля энергетических затрат приходится на дорогостоящий и дефицитный кокс, на экономию которого и направлены основные мероприятия по совершенствованию технологии плавки в шахтных твердотопливных печах.

Стратегическими задачами совершенствования конструкций низкошахтных печей, технологий плавки и повышения эффективности их тепловой работы являются: интенсификация тепломассообменных процессов,

переход на более дешевые виды топлива, снижение потребления энергоресурсов и вредных выбросов в атмосферу, обеспечивающие снижение себестоимости готовой продукции и, как следствие, повышение ее конкурентоспособности на отечественном и зарубежном рынках.

Особенность работы шахтных печей заключается, в частности, в том, что твердое топливо в них выполняет различные функции: источника тепла; химического реагента-восстановителя; механической насадки для фильтрации расплава, а комплекс сложных взаимосвязанных процессов существенно распределен по пространственным координатам. В то же время большая часть пути развития теории шахтных печей пройдена и мероприятия, связанные с решением относительно простых задач, уже внедрены в практику выплавки чугуна. Поэтому новые достижения в развитии теории могут быть получены только на основе глубокого и всестороннего исследования тепловых, физико-химических и газодинамических явлений в твердотопливных низкошахтных печах, от результатов которого зависит разработка рекомендаций, направленных на улучшение технико-экономических и экологических показателей производства металла.

Рецензируемая квалификационная работа непосредственно связана с этим исключительно актуальным, сложным и относительно новым направлением исследований.

Цель исследований заключалась, по мнению диссертанта, в развитии теории тепловой работы, технологических основ ресурсосбережения и повышения энергоэффективности твердотопливных низкошахтных печей на основе интенсификации тепломассообменных процессов и замены топлива с кокса на антрацит и тощие угли.

Замечу, что диссертантом весьма удачно выбрано интереснейшее и наукоемкое направление исследований, сформулирован и в целом успешно решен комплекс сложных научно-технических проблем. Это свидетельствует о широкой эрудиции и глубоких знаниях соискателя в различных областях науки

и техники: тепломассопереноса, механики сплошных сред, теории и техники теплотехнического эксперимента.

Переходя к анализу содержания исследования, представленного в диссертации, следует подчеркнуть широту затронутых проблем, комплексность и всесторонность их решения.

В диссертации в той или иной мере успешно использованы и отражены все элементы триады настоящей научной работы: теория – эксперимент - практика.

При оценке научной новизны квалификационного исследования отмечу, прежде всего:

- разработку научных основ энергосбережения при замене кокса на антрацит и тощие угли, а также инжекции пылеугольного топлива при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах;
- разработку математической модели и ее использование для установления закономерностей процессов сжигания пылеугольного топлива в плотном слое;
- результаты исследования и анализ влияния параметров комбинированного дутья (обогащения дутья кислородом, инжекции пылеугольного топлива, подогрева и увлажнение дутья) на процессы тепломассообмена и газодинамики при плавке чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах при использовании антрацита и тощих углей в качестве топлива;
- установление закономерностей влияния основных технологических и теплотехнических параметров плавки в низкошахтных печах при использовании в качестве топлива антрацита и тощих углей на химический состав, комплекс литейных и механических свойств чугуна, результатами анализа которых доказана возможностью получения продукции заданного уровня качества.

Достоверность и обоснованность полученных результатов исследования, выводов и рекомендаций подтверждается использованием

современных методов теоретического анализа и экспериментального исследования процессов тепломассобмена, механики движения материалов, протекающих в низкошахтных печах; сопоставлением полученных результатов с данными других исследователей; высокой эффективностью предложенных технологических решений, внедрение которых в производство осуществлено после промышленных испытаний.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в следующем:

- разработаны и внедрены в производство ресурсосберегающие энергоэффективные технологии плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах, основанные на замене кокса другими видами топлива и обогащении дутья кислородом;
- предложена новая методика для аттестации топлив, используемых в низкошахтных печах, основанная на определении относительной прочности топлива при сжигании под нагрузкой;
- получены основные соотношения, зависимости и закономерности для осуществления инженерных расчетов конструктивных, технологических и теплотехнических параметров низкошахтных печей при переходе с кокса на другие виды твердого топлива;
- разработан и внедрен исследовательский полупромышленный комплекс, оснащенный устройствами для подогрева дутья, воздуходувными средствами, контрольно-измерительной аналогово-цифровой аппаратурой, позволяющий моделировать процессы тепломассобмена в различных технологических условиях работы низкошахтных печей, обладающий широкими функциональными возможностями;
- разработаны новые способы плавки чугуна и оксидных материалов, конструкции рекуператоров с улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками, конструкции питателя пневмотранспорта мелкодисперсных материалов.

Основные результаты работы достаточно полно отражены в 65 печатных работах, в том числе в 28 изданиях, рекомендованных ВАК, двух монографиях, 14 патентах на изобретения и на полезную модель, 5 свидетельствах государственной регистрации программ для ЭВМ и базы данных. Результаты исследований прошли широкую апробацию на ряде Международных и Всероссийских конференциях.

В первой главе диссертации «Анализ современного уровня теории тепловой работы, практики эксплуатации твердотопливных низкошахтных печей и постановка задач исследования» диссертантом квалифицировано выполнен анализ классификации шахтных печей, рассмотрены перспективы применения этого класса печей в промышленности и сформулированы направления энерго-, ресурсосбережения и интенсификации тепломассообменных процессов.

Вполне логичным и научно обоснованным следует считать и общий вывод диссертанта о том, что низкошахтные печи представляют собой группу тепловых аппаратов, входящих в существующее в настоящее время многообразие тепловых устройств. Они получили широкое распространение в различных отраслях промышленности. Одним из основных направлений ресурсо - и энергосбережения является замена дефицитного и дорогостоящего кокса антрацитом, тощими углями, пылеугольным топливом, а вторым - подогрев и обогащение дутья кислородом. Следует отметить, что именно эти пути ресурсо - и энергосбережения достаточно глубоко научно обоснованы в трудах выдающихся отечественных ученых применительно к доменному процессу и широко используются в мировой практике.

Научной новизной отличаются материалы **второй главы диссертации «Развитие теоретических основ повышения эффективности плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах с использованием физического моделирования».** В данной главе проведен анализ условий подобия при переходе от печей малого диаметра шахты к печам

большего диаметра. Сделан вывод, что температурный режим в топливной насадке и в зоне нагрева шихты не зависит от диаметра печи при условии выполнения полученных в работе основных соотношений между геометрическими параметрами печи, размерами кусков кокса и шихты, вытекающих из главных требований (теорем) теории подобия и натурного моделирования. Важным аспектом технологии плавки в низкошахтной печи является возможность выбора технологических решений при проектировании новых и модернизации действующих низкошахтных печей, выходящих за нормальный ряд. В главе рассмотрены возможности такого выбора на основе критериев конвективного теплообмена между теплоносителем и компонентами шихты. Проведен анализ сил, действующих на коксовую или угольную топливную насадку при замене используемого в качестве топлива кокса на антрацит и тощие угли. Полученные данные позволяют по размеру и форме кусков шихты спрогнозировать ход шахтной плавки. Сделан вывод о том, что при переходе на антрацит и тощие угли для увеличения силы трения шихты о стенки необходимо тщательно подготавливать шихту до получения минимальных размеров кусков (0,07–0,08 м), что резко снижает угол зацепления, а следовательно, угол внутреннего трения и увеличивает коэффициент бокового давления на стенки шахты. В целом следует отметить, что материалы этой главы свидетельствуют о системном подходе соискателя к исследованию сложных процессов тепломассообмена в противотоке.

Третья глава работы - «Развитие теоретических основ повышения эффективности плавки чугуна и силикатных материалов в твердотопливных низкошахтных печах с использованием математического моделирования и анализа влияния теплотехнических параметров на технологический процесс». Одной из наиболее полных и комплексных моделей плавки материалов в низкошахтных печах является математическая модель, разработанная ранее коллективом ученых СибГИУ, однако она не позволяет исследовать влияние подогрева, обогащения дутья

кислородом, применения пылеугольного топлива на тепловую работу печей. В связи с этим на ее основе была разработана новая усовершенствованная математическая модель, отличающаяся наличием дополнительных блоков, обеспечивающих учет этих технологических особенностей. С использованием этой модели установлено, что обогащение дутья кислородом способствует росту производительности печи, увеличению скорости схода шихты и, как следствие, ведет к уменьшению времени нагрева шихты до температуры плавления, при этом одновременно растет высота зоны нагрева по отношению к начальной высоте, а высота топливной насадки уменьшается. Для разработки детерминированной математической модели потребовалось уточнение ряда известных и получение новых расчетных соотношений для определения высоты окислительной зоны и температуры поверхности кусков топлива в слое топливной насадки.

Четвертая глава диссертации «Создание исследовательского полупромышленного комплекса на основе низкошахтной печи» посвящена проектированию, конструированию исследовательского полупромышленного комплекса. Конструктивные и режимные параметры исследовательской печи были выбраны исходя из сложившейся проектной практики, характерной для промышленных печей, полученных зависимостей, связывающих высоту топливной насадки с внутренним диаметром печи. 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.

В пятой главе «Анализ результатов экспериментальных исследований плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах с использованием в качестве топлива антрацита и тощих углей» приведены результаты экспериментов, проведенных на исследовательском

полупромышленном комплексе. В результате лабораторных экспериментов была определена степень измельчения кокса и антрацита и установлено, что на степень измельчения кусков кокса подогрев и увлажнение дутья практически не влияют, небольшие изменения размеров куска кокса связаны в большей степени с его выгоранием и в меньшей – с его растрескиванием. Для определения рациональных соотношений различных видов топлива в топливных колошах и обеспечения устойчивой работы низкошахтных печей разработана методика аттестации топлив, основанная на определении относительной прочности топлива при горении под нагрузкой и относительной прочности, зависящей от разрушения и газификации. Проведен термогравиметрический анализ образцов литейного кокса и антрацита. Показана применимость метода для сравнительной оценки свойств различных углеродистых материалов. Установлено, что в процессе нагрева до 1500°С поведение кокса и антрацита отличается незначительно, что свидетельствует о возможности замены кокса антрацитом.

Заключительная шестая глава посвящена разработке, промышленной апробации и внедрению энергоэффективных ресурсосберегающих технологий плавки чугуна и силикатных материалов в низкошахтных печах. В результате промышленных экспериментов установлено, что шихта в процессе опускания в низкошахтной печи разрыхляется, при этом порозность слоя шихты, оказывающая большое воздействие на аэродинамические и теплотехнические параметры плавки, зависит от скорости ее опускания: с увеличением этой скорости происходит наибольшее разрыхление шихты. Обоснован уровень загрузки материалов в печь и определен рациональный расход дутья при его подаче через фурмы, установленные в два ряда. Замена кокса на антрацит в качестве топлива в совокупности с подогревом до 400 – 500°С 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. В результате внедрения результатов исследований были разработаны ресурсосберегающие технологии, нашедшие отражение в комплектах нормативно-технической документации, переданных и внедренных на ряде промышленных предприятий России.

Рассмотрев работу в комплексе и положительно оценивая ее содержание, следует сделать **некоторые замечания**.

1. Автор выделяет низкошахтные печи в отдельную группу печей с указанием конкретных геометрических размеров, при этом указывая их основное назначение - расплавление металлов и силикатных материалов. Такой подход, в основном геометрический, без глубокого учета физики явлений, происходящих в этих печах, требует дополнительного обоснования. Наиболее общей и корректной является классификация по общности теплофизических процессов и индивидуальных технологий, реализуемых в этих печах. Это обусловлено тем, что они применяются для тепловой обработки кусковых материалов в различных отраслях промышленности - металлургии, машиностроении, химии, промышленности строительных материалов и многих др., каждые из которых имеют свои принципиальные различия в физических процессах, происходящих в этих агрегатах. Именно требования технологии во многом определяют выбор той или иной схемы тепловой обработки материалов.
2. При разработке основ теории фактически не только не развиты, но и практически не рассматриваются закономерности процессов теплообмена и схемы теплообмена по высоте шахтного противоточного реактора для современных условий работы вагранок, не учитывается неравномерность распределения газов, что несколько обедняет научное содержание работы. Анализ полей температур по высоте печи, представленных на рис.1.2, указывает на сложный характер изменения

отношения теплоемкостей потоков шихты и газа по высоте печи. При анализе же тепловой работы печи по умолчанию автор использует допущения о постоянстве отношения теплоемкостей потоков по высоте рассматриваемого слоя. В то же время, современный уровень развития теории теплообмена и газодинамики в шахтных печах при практическом отсутствии восстановительных процессов в вагранках позволяет решать эти задачи. Примером такого подхода являются реализованные детерминированные фундаментальные математические модели доменного процесса.

3. Требуется более строгое физическое обоснование возможности выбора высоты низкошахтной печи при наличии принципиально различных теплотехнических и технологических зон (подогрева, плавления, горения, перегрева). Выбор высоты сделан на основании анализа интенсивности конвективного теплообмена в слое по критерию Nu. Дополнительный вопрос: почему в Nu входит виртуальная теплопроводность слоя, а в Re - скорость движения слоя, а не газа?
4. Следовало бы обосновать именно для вагранок необходимость и методику оценки качества твердого топлива именно и нецелесообразность использования для этих целей современных методов оценки качества доменного кокса. Качество кокса для доменной плавки в настоящее время оценивается целым комплексом параметров, среди них: технический состав кокса; гранулометрический состав кокса; «холодная» прочность кокса; реакционная способность кокса (показатель CRI); «горячая» прочность CSR. Последний (CSR) характеризует устойчивость кокса к воздействию комплекса нагрузок: термической, химической и механической. Этот показатель используется на зарубежных и отечественных доменных цехах, отражая высокую представительность оценки свойств кокса именно в высокотемпературной зоне при наличии указанного комплекса нагрузок.

Оценка диссертантом применимости комплекса этих параметров кокса для низкошахтных печей вскрыла бы возможность его применения к исследованным печам или подтвердила бы принципиальную неприменимость этих показателей.

5. В ряде наших работ и в работах зарубежных учёных чётко показано, что для сжигания угольной пыли необходимо пространство в виде полости и горение пыли должно завершаться в пределах этой полости. Практика работы доменных печей полностью подтверждает этот вывод. В разработанной же автором математической модели сжигания угольной пыли непосредственно в плотном слое такая полость не предусмотрена, как и расчет полей скоростей и состава газовой фазы.

Заключение

Отмеченные выше замечания ни в какой мере не могут изменить общую положительную оценку рецензируемой диссертации, которая является научным исследованием, выполненным на высоком научном уровне. Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений. Материалы исследований внедрены в промышленности со значительным экономическим эффектом, достаточно полно опубликованы в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, в том числе в двух монографиях. Новизна и оригинальность технических и технологических решений подтверждена патентами России. Автор вынес на защиту оригинальные результаты собственных разработок, достаточно полно освещенных в научной печати и прошедших апробацию на научно-технических конференциях самого высокого уровня. Диссертация оформлена в соответствии с требованиями ВАК России. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание квалификационного исследования.

Считаю, что диссертационная работа «Развитие теории тепловой работы и технологических основ ресурсосбережения в твердотопливных

низкошахтных печах» является законченной научной квалификационной работой. В ней представлены научно обоснованные технологические решения и практические рекомендации, совокупность которых можно квалифицировать как решение крупной научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение, направленной на повышение энергоэффективности и ресурсосбережения твердотопливных низкошахтных печей, что вносит значительный вклад в развитие экономики России.

Таким образом, диссертационная работа соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней от 24 сентября 2013 года №842 (пункты 9-14), а ее автор, Феоктистов Андрей Владимирович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика за развитие теории тепловой работы и совершенствование технологии твердотопливных низкошахтных печей, реализация рекомендаций которой обеспечивает энергоэффективаность их работы и ресурсосбережение.

Официальный оппонент:
Спирин Николай Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», заслуженный работник высшей школы РФ
E-mail: n.a.spirin@urfu.ru
Тел./факс: +7 (343) 375-48-15
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира 19

7 ноября 2016 года

Подпись заверяю

Начальник общего отдела УДКОВ А.М.Косачева