

УДК 669.162.2:536.7.001.5

Ю.Г.Ярошенко, Н.А.Спирин, В.С.Швыдкий

**ИССЛЕДОВАНИЯ З.И.НЕКРАСОВА И РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ
ТЕПЛООБМЕНА ДОМЕННОЙ ПЕЧИ**

Уральский государственный технический университет (УПИ)

Металлург–доменщик – Зот Ильич Некрасов, металлург–теплотехник Борис Иванович Китаев. Первый свою творческую деятельность связал с Украиной, второй – с Уралом. Что объединило этих больших ученых, ровесников по возрасту, столь непохожих по характеру? Ответ может быть только один – преданность металлургической науке.

Дружба З.И.Некрасов–а и Б.И. Китаева возникла после выхода в свет монографии Уральского ученого «Теплообмен в доменной печи» (1949 г.). По–видимому, интерес к научным исследованиям был взаимным. Зота Ильича интересовали новые подходы к анализу тепловой работы доменных печей, а Бориса Ивановича – результаты экспериментальных исследований температурных полей, процессов восстановления, распределения газов по высоте доменных печей. Их дружба была закреплена в 1954 году работой в Комиссии Правительства СССР по анализу и перспективам развития, так называемого, «Процесса Рёмина». Этот процесс должен был быть положен в основу технологии прямого получения стали в одном агрегате, представляющем собой комбинацию дуговой электропечи, над которой располагалась шахтная печь. Агрегат работал с использованием богатых железных руд и полукокса. Председателем Комиссии был З.И.Некрасов–, одним из её членов Б.И. Китаев. Заседания Комиссии проходили в октябре–ноябре в одном из зданий Кремля в закрытом режиме. Поэтому подробности анализа «Процесса Рёмина» неизвестны, а общая оценка была однозначной – «Исследования прекратить».

Параллельно с работой Комиссии в Москве проходило Всесоюзное совещание доменщиков, на котором Б.И.Китаев познакомил своего ученика Ю.Г.Ярошенко с З.И.Некрасовым. С тех пор каждый приезд Ю.Г.Ярошенко в Днепропетровск был связан с посещением Института черной металлургии АН УССР, встречей с З.И.Некрасов–ым и рассказом о результатах очередных исследований в области теплообмена в доменной печи.

Академик З.И.Некрасов– и наш учитель Б.И.Китаев регулярно обменивались публикациями по исследованию доменных печей. Под влиянием работ Зота Ильича по инъекции углеводородных добавок Борису Ивановичу удалось сформулировать условия стабилизации хода доменной печи при использовании любых добавок к доменному дутью.

В настоящей статье авторы стремились показать связь исследований температурных полей в действующих доменных печах, выполненных под

научным руководством академика З.И.Некрасова, с развитием теории теплообмена в доменной печи. Наибольший интерес представляют исследования З.И.Некрасова и Б.И.Китаева закономерностей теплообмена в различных вертикальных элементах доменной печи с учетом неравномерности распределения материалов и газов, а также при инъекции топлива и глубоком обогащении дутья кислородом [1–6].

Современный уровень математического описания явлений в доменной печи, в том числе явлений теплообмена, не позволяет вскрыть все тонкости доменного процесса. Надежды, связанные с тем, что удастся дать полное математическое описание доменного процесса, не оправдались. Сегодня мировая наука не знает таких примеров, когда описывалось бы трехмерное поле, которое улавливало бы все нюансы современного доменного процесса [7–10]. В свете недостаточности математических моделей результаты натурального эксперимента приобретают исключительно большое значение. Как часть этого целого, огромное значение приобретают экспериментальные данные по температурным полям в доменной печи.

В тоже время следует подчеркнуть, что не существует и такого положения, при котором какое-либо явление, обнаруженное в экспериментальных данных, не имело бы абсолютно никаких отзвуков в математических описаниях, в математических моделях. Наоборот, наблюдается удивительная согласованность данных, если при этом иметь в виду недостаточно высокий уровень полных математических моделей доменного процесса, существующих ныне. Далее следует отметить, что истинные, фактические температурные в действующих печах поля имеют сложный характер, и причиной тому является неравномерность в распределении потоков газа и шихты. Несмотря на то что неравномерность все усложняет, затушевывает простоту элементарной картины, которая наблюдается при одномерном потоке, все равно отчетливо можно рассмотреть закономерности одномерного теплообмена. Они проявляются везде. Например, при зондировании по какой-нибудь вертикали проявляются типичные закономерности одномерного теплообмена, которые можно считать, таким образом, фундаментальными. Сохраняется представление о завершенности теплообмена, верхней и нижней ступенях, зоне умеренных температур.

Под руководством академика АН Украины З.И.Некрасова сотрудниками Института черной металлургии МЧМ СССР в свое время совместно с Криворожским и Новолипецким металлургическими заводами были проведены уникальные исследования доменного процесса с целью выяснения особенностей восстановления в больших доменных печах при высоком обогащении дутья кислородом [1–4]. Для этих исследований использовали установленные во время строительства устройства, позволяющие отбирать пробы материала и газа, а также измерять температуры на различных горизонтах по высоте печи. Во время исследований вели наблюдения за температурами и содержанием отдельных компонентов в

газовой фазе, в том числе CO_2 , H_2 , H_2O . Результаты этих исследований имеют большое значение для анализа процесса и профиля современных мощных доменных печей.

На одной из доменных печей Криворожского металлургического завода объемом 2000 м^3 изучали состав и распределение твердых и жидких материалов, измеряли температуру, состав и влажность газа по радиусу печи на различных горизонтах [1]. В этих исследованиях зонды были установлены на четырех горизонтах: I горизонт находился на 3,5 м ниже уровня засыпки, II — на 8,3 м ниже первого, III — на 6 м ниже второго и IV — на 3,2 м ниже III и на 4,8 м выше горизонта фурм.

В результате исследований была выявлена существенная неравномерность распределения основных составляющих шихты по радиусу печи: максимальные рудные нагрузки наблюдались на расстоянии 1,0—1,5 м от кладки; к периферии и центру рудная нагрузка снижалась, причем в центре она была меньше, чем на периферии. Максимальное количество кокса, наоборот, обнаружили в центре и на периферии. Такой характер распределения шихтовых материалов сохранился на всех горизонтах печи.

Изменение температур на каждом из четырех горизонтов полностью подтвердило отмеченную неравномерность в распределении шихтовых материалов. Область минимальных температур находилась как раз в той части поперечного сечения, где наблюдались максимальные рудные нагрузки и было сосредоточено наибольшее количество мелких рудных фракций.

Академик З.И.Некрасов отмечал, что полученные по измерениям температур данные свидетельствуют об интенсивном теплообмене во всем объеме шахты доменной печи. Анализ распределения составляющих газовой фазы по радиусу печи привел авторов к выводу о том, что процессы восстановления и теплообмена в шахте доменной печи объемом 2000 м^3 протекают достаточно интенсивно, но все же имеются и значительные резервы снижения расхода кокса и повышения производительности, так как восстановительная энергия газового потока при условии сохранения хорошей газопроницаемости столба шихтовых материалов по всему сечению печи могла бы быть использована более полно [1].

Недостаточное использование восстановительной энергии газов на периферии авторы [1] объясняют перераспределением шихтовых материалов при опускании в постоянно расширяющуюся часть печи. При этом в периферийную зону, по-видимому, попадают преимущественно кусковые материалы, т. е. кокс. В этой работе отмечается, что в периферийной зоне наблюдается несоответствие между количеством протекающего здесь восстановительного газа и количеством железосодержащей части шихты, что приводит к недоиспользованию восстановительной энергии газа [1]. Для выявления особенностей работы доменной печи объемом 2700 м^3 , а также для определения возможностей строительства более мощных печей под руководством академика З.И.Некрасова сотрудниками

Института черной металлургии МЧМ СССР совместно с Криворожским металлургическим заводом были исследованы процессы плавки на этой печи и сопоставлены с результатами аналогичных исследований, проведенных на доменной печи объемом 2000 м³ [2–4].

Анализ результатов исследований по распределению материалов на колошнике доменной печи объемом 2700 м³ и сопоставление их с аналогичными результатами исследований на доменной печи 2000 м³ приводят авторов к выводу о том, что при одном и том же гранулометрическом составе агломерата рудная составляющая на колошнике печи 2700 м³ распределялась бы более равномерно [2–4].

Академик З.И.Некрасов считал, что для улучшения теплообмена в промежуточной зоне (имеется ввиду рудный гребень) необходимо увеличить количество дутья, улучшить кусковатость агломерата и организовать загрузку шихтовых материалов с таким расчетом, чтобы рудная часть равномернее распределялась по всему сечению печи, в том числе и в центре, без нарушения газопроницаемости столба материалов в осевой зоне. Сопоставив результаты исследований по составу газовой фазы и изменению температур по радиусу печи на доменных печах 2000 и 2700 м³, авторы [1] делают вывод о вполне удовлетворительной работе шахты и распара доменной печи 2700 м³, в том числе и осевой зоны этих элементов профиля.

Все экспериментальные данные, полученные З.И. Некрасовым и его сотрудниками, обработаны в традиционном стиле, установившемся среди технологов. Исследуемые величины: температура, содержание CO₂, H₂ и H₂O в газовой фазе представлены в виде графиков распределения этих величин по радиусу печи на различных исследовательских горизонтах. Однако для анализа теплообменных и восстановительных процессов необходимо знать распределение температур и концентраций различных составляющих газовой фазы и по высоте печи. Кроме того, для учета и анализа неравномерности газораспределения, теплообмена и восстановления необходимо представить эти распределения для отдельных вертикальных сечений доменной печи. Материалы обширных исследований вполне позволяют это сделать, что и было выполнено проф. Б.И.Китаевым с сотрудниками [5–7].

На этих графиках выбирали три точки: рудный гребень (наименьшая температура и наивысшее содержание CO₂ по сечению), периферия и центр. Таким образом, построенные нами по результатам исследования З.И.Некрасова и его сотрудников температурные поля представлены изменением температур по высоте печи на трех вертикалях: в рудном гребне, на периферии и в центре. Аналогичные кривые были построены нами и для CO₂. В результате получились типичные кривые температур и содержания CO₂ по высоте печи. Сопоставление полей концентраций CO₂ и температур позволяет объективно судить не только о ходе теплообменных процессов, но и о ходе процессов непрямого восстановления. Сопоставле-

ние этих полей дает возможность также судить о неравномерности газораспределения, теплообмена и восстановления.

Конечно, кривые распределения исследуемых величин по радиусу печи на отдельных горизонтах, представленные в исследованиях Института черной металлургии МЧМ СССР, дают не менее выразительное представление о неравномерности.

Полученные таким образом кривые приведены на рис.1, 2. Из них следует, что как при обычном, так и при обогащенном кислородном дутье поле температур выражено типичными S-образными кривыми. Особенно выразительны кривые для периферии. Кривые температур однозначно говорят о вполне удовлетворительной завершенности теплообмена. Наблюдаемую завершенность можно назвать типичной для доменных печей. Обнаруживается большая неравномерность теплообмена и восстановления по сечению, которая также типична для работы современных больших доменных печей.

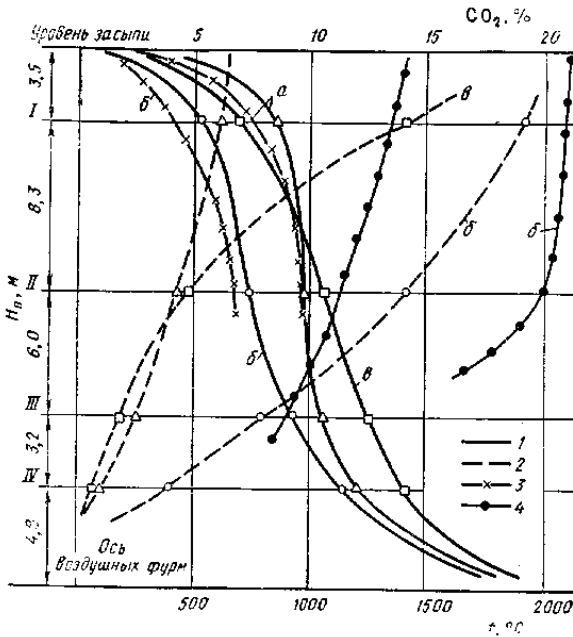


Рис. 1. Изменение температуры и содержания CO_2 в газовой фазе по высоте печи объемом 2000 м^3 :

1 — температура; 2 — содержание CO_2 при обычном дутье; 3 — температура; 4 — содержание CO_2 при содержании в дутье 29% кислорода; а — периферия; б — рудный гребень; в — ось

Как отмечалось, для доменной печи объемом 2000 м^3 наиболее типичная

S-образная кривая (рис.1) оказалась на периферии (10% CO_2): явно выражена зона умеренных температур, свидетельствующая о том, что на периферии вполне достаточное количество газов и отношение теплоемкостей потоков шихты и газа $W_{\text{ш}}/W_{\text{г}}$ далеко от единицы. Кривая же температур в рудном гребне не имеет столь ярко выраженной зоны умеренных температур, здесь очень мало газов (критическое количество) и отношение

$W_{ш}/W_{г}$ близко к единице. На доменной печи 2000 м^3 неравномерность привела к очевидному ухудшению теплообмена. На доменной же печи 2700 м^3 (рис. 2) общее развитие теплообменных и восстановительных процессов более благоприятно. Его можно назвать вполне удовлетворительным, отвечающим идеальным представлениям о зоне умеренных температур и завершенности теплообмена. Кривые CO_2 по высоте печи хорошо согласуются с температурными кривыми.

Несколько необычный на первый взгляд ход температурной кривой для оси также полностью соответствует установившимся представлениям о противоточном теплообмене в слое кусковых материалов при наличии химических реакций.

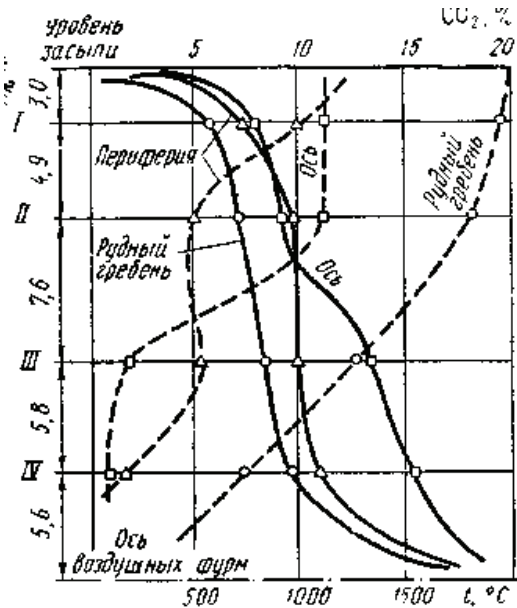


Рис.2. Изменение температур и содержания CO_2 по высоте печи объемом 2700 м^3 . Сплошные линии — температура, пунктирные — содержание CO_2

Кривая, аналогичная линии «ось» (рис. 2), была получена теоретическим путем еще в 1966 г. [5, с.258; рис. 118, кривые 2 и 3]. Если иметь в виду теоретические соображения [5], то исследования 3. И. Некрасова были интерпретированы профессором

Б.И.Китаевым и его учениками следующим образом [5–7]. Неравномерное распределение материалов на колошнике доменной печи 2700 м^3 привело к тому, что на оси рудная нагрузка на кокс [2–4, рис.1] приближается к нулю (содержание агломерата в шихте составляет 2–8%). Такое значительное снижение содержания железосодержащих материалов в шихте приводит к тому, что при хорошей газопроницаемости осевой зоны заметно снижается степень прямого восстановления r_d . Иначе говоря, большая часть окислов железа при наличии достаточного количества восстановительных газов успевает восстанавливаться непрямым путем еще в верхней ступени теплообмена. Снижение приводит к образованию в нижней ступени теплообмена избытка тепла. Более нагретые газы, поднима-

ясь вверх, разогревают вышележащие слои шихты, что приводит к увеличению высоты нижней ступени теплообмена. Область начала реакций прямого восстановления при этом также смещается вверх. Распространение зоны высоких температур в вышележащие слои шахты в свою очередь приводит к некоторому росту степени прямого восстановления r_d .

Противоположное влияние описанных факторов на степень прямого восстановления устанавливает некоторое динамическое равновесие, в результате которого температурная кривая приобретает характер, показанный на рис.2. Такой ход теплообменных процессов на оси печи идеально согласуется с ходом накопления CO_2 по высоте.

Зона начала реакций прямого восстановления, характеризующаяся увеличением градиента температур по высоте печи, на кривой CO_2 сопровождается резким увеличением содержания CO_2 в газовой среде. Отставание по накоплению CO_2 в центре и на периферии свидетельствует об избытке здесь газов. Очень характерно, что в рудном гребне и на оси наблюдается существенное замедление восстановления. Это дает достаточно веское основание, чтобы отметить некоторый избыток высоты для этих участков вертикальных сечений. В дополнение к этому отметим, что неравномерность на полях CO_2 сказалась во много раз больше, чем на температурных полях. Сопоставление кривых CO_2 по высоте печи в рудном гребне, на периферии и в центре свидетельствует о том, что весь объем и работает на восстановление неодинаково; имеются большие резервы, слабо работают периферия и центр. Использовать эти резервы можно уменьшением неравномерности в распределении потоков газа и шихты.

Исследования, проведенные на доменной печи при работе ее на обогащении дутья кислородом до 29%, позволяют сделать совершенно определенный вывод о том, что в рудном гребне (см. рис. 1) восстановительные процессы завершаются, и высота зоны умеренных температур достигает величин порядка 10 м. Эти данные указывают на излишнюю высоту доменной печи при работе на дутье, обогащенном кислородом до 29%.

На рис.3 приведены изменения температур (поля изотерм) в объемах доменных печей 2700 м³ и 2000 м³, построенные по результатам исследований Института черной металлургии МЧМ СССР. Анализ этих данных подтвердил, что теплообмен в доменной печи 2700 м³ развивается благоприятнее, чем на печи 2000 м³: зона умеренных температур (почти 13 м) и меньше неравномерность теплообмена. Восстановительные процессы развиваются также более благоприятно: круче поднимается кривая CO_2 в рудном гребне и меньше неравномерность распределения CO_2 по сечению. В целом более благоприятная картина по теплообмену и восстановлению на доменной печи объемом 2700 м³ подтверждается лучшим распределением потоков по горизонтальным сечениям печи. Учитывая, что современные мощные доменные печи будут работать на калиброванной шихте и высоком обогащении дутья кислородом, можно ставить вопрос о неко-

тором снижении высоты этих печей.

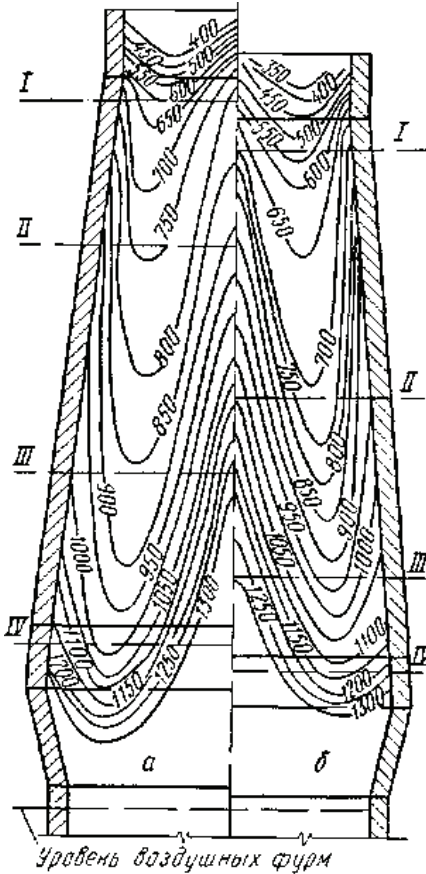


Рис. 3. Поля изотерм в шахте доменной печи: а — 2700 м³; б — 2000 м³; I–IV — горизонты исследований

Прошло почти 30 лет с того времени, когда профессором Б.И.Китаевым и его учениками были по новому интерпретированы результаты уникальных экспериментальных исследований, выполненных под руководством академика З.И.Некрасова на доменных печах. Подобного масштаба экспериментальных исследований не знает мировая доменная наука.

Идеи, изложенные в этих работах академика З.И.Некрасова и профессора Б.И.Китаева, оказались чрезвычайно оригинальными и плодотворными и на многие годы определили бурное развитие теории доменного процесса. Во многом именно в результате использования теории теплообмена удалось в последующий период

предложить методы контроля и управления тепловым состоянием доменной печи, разработать соответствующее математическое, алгоритмическое и программное обеспечения для решения целого комплекса технологических задач в области доменного производства [11–14].

1. *Исследование процессов восстановления в шихте доменной печи объемом 2000 м³.* Некрасов З.И., Бузовера М.Т. “Сталь”, 1969 г., №2, 110–115 с.
2. *Об оптимальном режиме и результатах исследования работы доменной печи объемом 2700 м³.* Некрасов З.И., Покрышкин В.Л., Нетребко П.Г., Залого А.А., Бузовера М.Т., Оськин В.Т., Аксенич Э.Я., Брайнин И.Я., Герашенко В.Е., Мардер Б.Ф., Бондаренко В.И. “Сталь”, 1970 г., №7, 584–592 с.
3. *Опытная плавка в доменной печи объемом 2000 м³ при обогащении дутья*

- кислородом до 30%. Некрасов З.И., Нетребко П.Г., Маскалина Ф.Н., Козаков Е.А., Можаренко Н.М. “Сталь”, 1971 г., №10, 887–894 с.
4. *Опытные* плавки в доменной печи объемом 2000 м³ на дутье с концентрацией кислорода до 35%. Некрасов З.И., Колпаков С.В., Андреев В.Ф., Рабинович Г.Б., Маскалина Ф.Н., Можаренко Н.М., Васильев С.В. “Сталь”, 1973 г., №2, 97–104 с.
 5. *Китаев Б.И.* Теплообмен в доменной печи / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Б.Д.Лазарев // М.: Metallургия, 1966. 355 С.
 6. *Китаев Б.И.* Теплотехника доменного процесса / Б.И.Китаев, Ю.Г.Ярошенко, Е.Л.Суханов, Ю.Н.Овчинников, В.С.Швыдкий // М.: Metallургия, 1978. 248 с.
 7. *Спирин Н.А.* Теплообмен и повышение эффективности доменной плавки /Н.А.Спирин, Ю.Н.Овчинников, В.С.Швыдкий, Ю.Г.Ярошенко Под ред. Ю.Г.Ярошенко // Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 1995. 243 С.
 8. *Юсфин Ю.С.* Metallургия чугуна // Е.Ф.Вегман, Б.Н.Жеребин, А.Н.Похвиснев, Ю.С.Юсфин, И.Ф.Курунов, А.Е.Пареньков, П.И.Черноусов. Под ред. Ю.С.Юсфина // М.:ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 С.
 9. *Рамм А.Н.* Современный доменный процесс /А.Н.Рамм //М.: Metallургия, 1980. 304с.
 10. *Товаровский И.Г.* Развитие расчетных методов анализа доменной плавки в XX веке / И.Г.Товаровский // Сталь. 2001. № 7. С. 8–10.
 11. *Спирин Н.А.* Информационные системы в metallургии // Н.А.Спирин, Ю.В.Ипатов, В.И.Лобанов [и др.]. Под ред. Н.А.Спирина. Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. 617С.
 12. *Спирин Н.А.* Компьютерные методы моделирования доменного процесса. // Онорин О.П., Спирин Н.А., Терентьев В.Л. [и др.]. Под ред. Н.А.Спирина // Екатеринбург, УГТУ–УПИ. 2005. 301С.
 13. *Ченцов А.В.* Балансовая логико–статистическая модель доменного процесса /А.В.Ченцов, Ю.А.Чесноков, С.В.Шаврин // М.: Наука, 1991, 92 С.; 2003, 163С.
 14. *Спирин Н.А.* Оптимизация и идентификация технологических процессов в metallургии: учебное пособие / Н.А. Спирин, В.В. Лавров, С.И. Паршаков, С.Г.Денисенко. Под ред. Н.А.Спирина // Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. 307 С.

Ярошенко Юрий Гаврилович – заслуженный деятель науки и техники РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в metallургии» Уральского государственного технического университета –УПИ.

Спирин Николай Александрович – профессор, доктор технических наук, зав. кафедрой «Теплофизика и информатика в metallургии» Уральского государственного технического университета –УПИ.

Швыдкий Владимир Серафимович – доктор технических наук, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор кафедры «Теплофизика и информатика в metallургии» Уральского государственного технического университета –УПИ.