

УДК 669.1.01:536.4

## ТЕПЛОФИЗИКА – НАУЧНАЯ БАЗА ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

*Ярошенко Ю.Г., д.т.н., профессор кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» (yury-y@planet-a.ru)*

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Мира, 28)

**Аннотация.** В работе представлены достижения Уральской школы ученых и инженеров металлургов-теплотехников в совершенствовании широкого спектра металлургических технологий, достигнутых на научной базе творческого союза двух наук – теплофизики и информатики. В последние годы математическое моделирование в сочетании с физическим позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемых технологий и оборудования. Модернизация агломерационных машин осуществлялась путем внедрения систем автоматического управления тепловыми и газодинамическими процессами, а также за счет оснащения машин зажигательными горнами нового типа. Эти мероприятия, наряду с интенсификацией тепло-массообменных процессов, обеспечили улучшение технико-экономических и экологических показателей работы агломерационных фабрик в России и за рубежом. Технологические и теплофизические решения при обжиге окатышей связаны с организацией переточной системы газовых потоков и реконструкцией газоходной системы. В результате реконструкции производительность машин увеличилась на 10 – 17 %, удельный расход топлива снизился на 8 – 15 %, а сброс газов после их очистки уменьшился на 50 – 58 %. Реконструкции подверглись обжиговые машины в России, Бразилии, Иране. В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат». Новые воздухонагреватели дутья для доменных печей способны обеспечить нагрев до 1300 °С и более за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа. Проблема по переработке металлургических жидких шлаков решена созданием на заводах черной металлургии России, Украины, Индии и Китая установок, которые способны обеспечить высокую производительность по скорости слива шлака (от 3 до 15 т/мин) и по годовым объемам получения гранулированного шлака (от 0,66 до 2,0 млн т). Успешно работает и установка на предприятии «Норильский никель». Совершенствование тепловых режимов и оборудования нагревательных печей и установок различного назначения опирается на математическое моделирование теплофизических процессов, основу которого составляет созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного теплообмена. Этот метод успешно развивается. За последние годы разработаны новые конструкции печей, модернизированы сотни нагревательных печей. Организация тепловых режимов их работы привела к существенному снижению удельных расходов топлива, повышению качества нагрева металла, а при термообработке – качества готовой продукции.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, агломерат, окатыши, доменное производство, воздухонагреватели, жидкий шлак, нагревательные печи и установки, оснащение оборудованием.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-8-587-602

Авторство первой теории металлургических печей принадлежит В.Е. Грум-Гржимайло. Его гидравлическую теорию печей [1] образно можно считать «первым камнем» в металлургическую отрасль науки, которая сегодня получила название теплофизика. Для того, чтобы теплофизика завоевала сегодняшние рубежи в металлургии, потребовались десятилетия упорных теоретических, экспериментальных и промышленных исследований.

Теплофизика, как наука, изучающая металлургические технологии, объединяет четыре достаточно широкие области научных знаний: термодинамику, теорию тепломассообмена, молекулярную физику (для металлургии – теорию металлургических процессов), механику жидкости и газов, а также механику движения материалов (шихты) в печах.

Творческий союз теплофизики и информатики в последние годы обеспечил успешное совершенство-

вание металлургических технологий. Математическое моделирование позволило существенно сократить время и область поиска оптимальных решений и тем самым обеспечить более надежное проектирование и наладку тепловых режимов создаваемой технологии и оборудования. Физическое моделирование процессов металлургических технологий, с одной стороны, обеспечивает математические модели необходимыми теплофизическими характеристиками – коэффициентами теплопроводности, теплоемкости, теплопередачи и пр., а с другой – адаптацию модели к конкретным производственным условиям.

Естественно, что для разработки путей повышения энергоэффективности ресурсосбережения металлургических технологий необходимы кадры, владеющие техникой постановки физического, как лабораторного, так и промышленного эксперимента, а также методами математического моделирования и анализа получаемых

результатов. К настоящему времени сформировалась Уральская научная школа металлургов-теплотехников (теплофизиков), которая является одной из старейших в России. Ее создателем и организатором был д.т.н., профессор Б.И. Китаев. Творческое ядро этой школы составляют выпускники кафедры «Металлургические печи» и «Металлургия чугуна» УГТУ-УПИ и в последние годы (с 1998 г.) – кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» и «Металлургия железа и стали» УрФУ. В создании и развитии научной школы активное участие принимают сотрудники ОАО «НИИ металлургической теплотехники» (ОАО «ВНИИМТ»), Института металлургии УрО РАН, ОАО «Уральский институт металлов», «Уралмеханобр», «НПВП ТОРЭКС», ПКБ «Энергоцветмет». Благодаря их научному творчеству, достигнуты значительные результаты в области развития теории и математического моделирования теплофизических процессов, обеспечившие возможность совершенствования металлургических технологий и оборудования с позиций энерго- и ресурсосбережения не только в России, но и за рубежом.

### Развитие теории и математического моделирования теплофизических процессов

На современном этапе развития технологий одной из главных проблем является максимальное использование объема агрегатов, теплового и восстановительного потенциала газов и, в конечном счете, достижение максимальной эффективности тепловых агрегатов в металлургии. С точки зрения этой проблемы исключительно большое значение имеет разработка теории металлургических объектов, т. е. математического описания физико-механических, тепловых и химических процессов, протекающих в этих объектах, создание математических моделей агрегатов различного назначения.

Несмотря на информатизацию, развитие вычислительной математики и алгоритмов идентификации, банки сертифицированных (верифицированных) математических моделей остаются слабо заполненными. Это связано с большими интеллектуальными и временными затратами на создание адекватных математических моделей сложных процессов и систем. Для новых процессов и систем высокой сложности это создает большие трудности, так как эти процессы и системы, как правило, не могут функционировать без управления, а математическая модель часто не может быть идентифицирована и сертифицирована без реально функционирующей системы.

Развитие математического моделирования теплофизических процессов в металлургии связано:

– с широким использованием общей теории систем и системного анализа. Необходимость решения задач в самых разных сферах человеческой деятельности потребовала разработки приемов, способов, подходов,

которые, в конечном счете, позволили бы разработать единую технологию исследований применительно к объектам любой природы. Общая теория систем возникла как обобщение именно тех принципов и закономерностей, которые в значительной степени могут быть применимы к объектам разной природы. Металлургическая теплотехника, или, как ее сейчас называют, теплофизика и является составным элементом общей теории систем [2 – 4];

– с развитием и широким использованием численных методов решения задач теплопереноса. Аналитические решения уравнений, описывающих сложные явления теплопереноса в металлургических процессах, получить практически невозможно. Как правило, использование только численных методов позволяет решить эти задачи. Состояние, развитие и использование численных методов решения задач теплопереноса представлены в работах [4 – 5];

– с совершенствованием моделей путем более полного учета особенностей дутьевого, газодинамического, шлакового режимов, механики движения материалов, а также реально доступной информации о работе тепловых агрегатов металлургии значительно расширили возможности этих моделей [6 – 14];

– с появлением коммерческих пакетов программного обеспечения теплофизических расчетов. Несмотря на вполне естественные ограничения постановки граничных условий и описания реальных металлургических объектов, существенную помощь в изучении и совершенствовании технологий оказывают такие программные продукты, как ANSYS различных релизов, COMSOL Multiphysics, MatLAB, Maple, STAR – CD, Flow Vision, SolidWorks и др. Однако доступными в учебном процессе являются только пакеты Mathcad, Maple и MatLAB, остальные лицензионные продукты очень дороги для вузов. В научном и практическом плане отдельные пакеты являются несколько избыточными по возможностям, однако это скорее можно отнести к их недостаточной изученности;

– с использованием современных технологий и программных средств разработки программного обеспечения для управления теплофизическими процессами в металлургии [15 – 18]. Так, для формализации математических моделей и проектирования алгоритмического обеспечения широко используют функциональное моделирование, в основу которого положены идеи и нотации методики структурного анализа и проектирования IDEF0, а также принципы структурного системного анализа и формализации процедурно-ориентированного подхода в виде диаграмм потоков данных (Data Flow Diagram, DFD). Использование этих методов обеспечивает возможность эффективного обмена информацией по описанию и анализу модельных систем между специалистами в области теплофизики, металлургических технологий и разработчиками информационных систем. Реализация программного кода модельных систем

выполняется на основе Agile-метода – гибкой методологии разработки программного обеспечения, ориентированной на использование итеративной разработки, динамического формирования функциональных требований и обеспечение их программной реализации в результате постоянного взаимодействия с пользователями системы.

### Подготовки железорудного сырья

**Технологии производства агломерата.** ОАО «ВНИИМТ» один из немногих институтов, активно сотрудничающих с УрФУ и сохранивший свои научные возможности в области теплофизики в металлургии после развала прикладных научных организаций России. Институт, используя и развивая достижения высокотемпературной теплофизики и информатики в металлургии, обеспечивает реализацию достижений теоретической теплофизики на заводах и фабриках всего металлургического передела, начиная с теплотехнической подготовки железорудного сырья и заканчивая получением высококачественной стали и изделий из нее с самыми лучшими потребительскими свойствами. За последние годы ОАО «ВНИИМТ» разработана и реализована в промышленности теплотехническая схема агломерационной машины с установкой рециркуляции агломерационного газа и системой автоматического управления ею, устройством для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты [19] и автоматикой безопасности, способной обеспечить в рабочей зоне концентрацию СО не выше ПДК для этого газа. После реализации проекта на четырех машинах агломерационной фабрики № 2 ОАО «Челябинский металлургический комбинат» существенно были снижены такие показатели работы агломерационной машины, как удельный расход топлива (на 3,6 – 3,8 кг/т агломерата), содержание мелочи в выходе годного (на 2,0 – 2,5 % (абс.)) и выбросы пыли и СО в окружающую среду (на 26 – 28 %).

Не менее эффективными оказались результаты физического и математического моделирования при создании способа зажигания агломерационной шихты [20 – 22] и конструкций зажигательных горнов, оснащенных системами автоматического управления тепловыми и газодинамическими режимами. Исследованиям были подвергнуты агломерационные машины разных типоразмеров, эксплуатация которых связана с использованием различных видов газообразного топлива. Новые зажигательные горны обеспечивают:

- минимальный расход тепла сжигания топлива на зажигание шихты и повышение качества агломерата;
- увеличение срока эксплуатации бортов и роликов спекательных тележек за счет их обдува вентиляторным воздухом и отсутствия водяных холодильников горна;
- уменьшенный объем топочного пространства, низкие потери тепла в окружающую среду за счет конструктивных особенностей свода горна.

Итоги этих исследований внедрены на 13 агломерационных машинах металлургических предприятий – ПАО «Челябинский металлургический комбинат», ОАО «Высокогорский горно-обогатительный комбинат», АО «Уральская сталь» (Россия), ОАО «Запорожсталь» (Украина) совместно с ПАО «Уралмашзавод» на ОАО «ММК», на заводе Визакхапатнам, Бокаро (Индия) и Аксуском ферросплавном заводе (Казахстан). В результате эксплуатации этих горнов экономия газообразного топлива достигла 7 кг/т агломерата.

Сотрудники ООО «НПВП ТОРЭКС», опираясь на математическую модель, отражающую особенности процесса спекания железорудных материалов различных месторождений, работу зажигательного горна и устройств по охлаждению готового агломерата и газодинамические характеристики агломерационной шихты и тракта агломерационных машин, предложили три варианта тепловых схем работы агломерационных машин с совмещенным охлаждением [23]. Эти схемы учитывают необходимость разделения отходящих с агломерационной машины газов на два, три и более потоков, которые характеризуются индивидуальными свойствами по температуре, влажности, составу газа. Один из потоков можно вернуть в агломерационный процесс, другой – использовать в энергетических целях, третий – направить в аппараты для улавливания и последующего производства отдельных элементов, таких как S, Zn и др. [23].

Их реализация на агломерационных фабриках ОАО «Северсталь», ОАО «Мечел» (Россия) и АО «ИСПАТ-Кармет» (Казахстан) подтвердили высокую эффективность этих схем. За рубежом решение подобных задач достигается в несколько иной, менее эффективной форме [24].

Значительными возможностями для анализа агломерационного процесса и разработки мероприятий с целью ресурсосбережения и улучшения энергоэффективности технологии получения агломерата обладает модель, названная трехмерной математической (динамической) моделью процесса агломерации [25 – 27]. В этой модели учтены все основные теплофизические явления, отражающие особенности практически всех этапов технологии производства агломерата. Расчеты процесса агломерации с использованием этой модели, как отмечают авторы, «по точности и объему его описания превосходят все локальные балансовые методики и известные комплексные модели» [27]. Теплофизический анализ работы агломерационных машин на основе результатов математического моделирования позволил получить технические решения для проектирования, реконструкции агломерационных фабрик в России и за рубежом (Украине, Казахстане, Индии, Югославии, Египте, Венгрии, Иране, Алжире). Примером может служить совершенствование технологии спекания и реконструкция агломерационной машины № 7 на агломерационной фабрике № 2 металлургического завода

«Арселор Миттал Темиртау». В результате внедрения технических решений производительность машины увеличилась на 30 %.

Положительный эффект при совершенствовании технологии производства агломерата может быть достигнут в результате наложения акустического поля на слой спекаемой шихты. Оценку влияния энергии акустического поля произвели сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» в процессе исследований на крупненной лабораторной установке типа «Аглочаша» и в промышленных условиях на агломерационной машине агломерационной фабрики ОАО «Серовский металлургический завод» [28]. Акустические излучатели, представляющие собой волноводы трубчатой конструкции (свистки Гартмана), устанавливали в первых двух вакуум-камерах. При этом давление компрессорного воздуха составляло 3,0 атм., а общий расход компрессорного воздуха на один излучатель не превышал 50 м<sup>3</sup>/ч. При исследовании влияния энергии акустического поля на слой шихты все технологические операции, как и состав шихты, соответствовали традиционной технологии.

Образующееся акустическое поле вовлекает в колебательный процесс колосниковую решетку, пронизывает нижние горизонты обрабатываемой агломерационной шихты (сырой и высушиваемый слои), достигает зоны горения и расплавления. Частицы слоя и пыли также вовлекаются в колебательный процесс, в результате этого в поровых каналах на поверхностях твердых компонентов слоя уменьшается толщина пограничного слоя и усиливаются массообменные процессы. При этом происходит разрыхление слоя мелкодисперсных частиц, благодаря чему появляются условия по увеличению расхода газа для тепловой обработки слоя шихты, что дополнительно активизирует развитие и тепловых, и массообменных процессов в слое шихты с одновременным уменьшением выноса пыли за счет ее осаждения в самом слое шихты и за его пределами – в вакуум-камерах.

Промышленные испытания при установке в вакуум-камерах акустических излучателей суммарной мощностью звука 1,0 – 1,2 кВт/м<sup>2</sup>, перекрывающих акустическим полем не более 15 – 20 % площади спекания агломерационной машины, а также в объеме сборного коллектора со стороны его торца при мощности звука 0,3 – 0,4 Вт/м<sup>3</sup>, показали рост производительности в пределах 3,2 – 8,3 %, снижение запыленности агломерационных газов на 29,2 – 36,2 % и концентрации монооксида углерода в них на 26,7 – 33,4 %.

Подобные результаты по энергоэффективности и выбросам в окружающую природную среду могут быть получены и в технологиях обжига окатышей.

Улучшение показателей процесса агломерации железорудного сырья может быть достигнуто, если будут обеспечены одинаковые температурно-временные условия спекания по высоте слоя агломерируемой шихты.

С целью создания теплового режима, способного удовлетворить этим условиям, на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны способ и конструкция устройства для совместного сжигания твердого и газообразного (комбинированного) топлива в слое агломерируемой шихты, а также проведены испытания этого способа в промышленных условиях [29].

Специальное устройство для подачи в надслоевое пространство природного газа и воздуха для его горения – газо-воздушно-распределительное устройство (ГВРУ), устанавливается за зажигательным горном. К этому времени в спекаемом слое уже сформировалась устойчивая зона горения твердого топлива. После смешения газовых сред в надслоевом пространстве между ГВРУ и поверхностью слоя шихты образовавшаяся газо-воздушная смесь, проходя через горячий слой агломерата верхнего горизонта слоя шихты, подогревается до температуры воспламенения (450 – 600 °С) с образованием активной зоны горения протяженностью 40 – 60 мм с температурами 1100 – 1150 °С. Выделяемая при этом теплота обеспечивает дополнительный подогрев верхних горизонтов слоя до требуемой температуры спекания шихтовых материалов.

Промышленные испытания разработанной конструкции ГВРУ проведены на агломерационной машине Серовского металлургического завода. В ходе исследований было установлено, что при использовании комбинированного топлива в слое происходит выравнивание температурно-временных условий нагрева в объеме слоя шихты как по его высоте, так и ширине. При увеличении доли природного газа на ГВРУ до 40 % от его общего расхода повышается производительность агломерационной машины на 30 – 35 % и сокращается выход мелких фракций в барабанной пробе.

**Технологии производства окатышей.** Качеству железорудных окатышей, как перспективному виду металлургического сырья для доменных печей и для альтернативных технологий получения железа, в последние годы уделяется повышенное внимание. В этом направлении работают и другие научные и проектные организации как в нашей стране [30 – 31], так и за рубежом [32].

С целью устранения неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшения качества окатышей на кафедре «Теплофизика и информатика в металлургии» были разработаны устройства для сжигания газа в слое и тепловые схемы обжиговых конвейерных машин, а также проведены испытания этого способа в промышленных условиях. Поскольку при технологии сжигания газа в слое появляется еще один источник тепловой энергии, дополняющий основной, расположенный в зоне обжига, то такой технологический способ обжига получил название комбинированного [33].

Технология такого способа обжига окатышей организуется в следующей последовательности: сушку

и подогрев слоя окатышей осуществляют также, как описано выше, а обжиг окатышей верхних горизонтов при температуре 1200 – 1300 °С на глубину 75 – 100 мм ведут просасываемыми продуктами факельного сжигания газа в горновом пространстве. После этого в слой подают холодную газо-воздушную смесь (коэффициент расхода воздуха  $\alpha = 3,0 - 5,0$ ), которая, проходя через нагретый материал, подогревается до температуры воспламенения. При этом начинается устойчивый процесс горения газа в слое. Продукты горения газо-воздушной смеси проходят через нижележащие слои окатышей и нагревают их. По мере нагрева окатышей до температуры, при которой происходит воспламенение газо-воздушной смеси, процесс горения распространяется ниже, что обеспечивает равномерный нагрев окатышей до заданной технологической температуры по всей высоте слоя.

Реализация комбинированного способа обжига окатышей на двух обжиговых конвейерных машинах Качканарского ГОКа показала надежность использованного газо-горелочного устройства, обеспечившего устойчивое и безопасное сжигание газа в слое окатышей. Новая технология термообработки шихты по сравнению с технологией обжига окатышей без сжигания газа в слое, наряду с устранением неравномерности термообработки окатышей по высоте слоя на обжиговых машинах конвейерного типа и улучшением качества окатышей, обеспечила увеличение производительности агрегатов на 10 – 12 %, снижение расхода природного газа на 10 – 15 %, электроэнергии на 6 – 8 % [33].

Разработанные специалистами ООО «НПВП ТОРЭКС» и реализованные в новой тепловой схеме МОК-1-592 Михайловского ГОКа основные технологические и теплофизические решения [34, 35] связаны с организацией трехсекционной зоны сушки [36, 37], переточной системы газовых потоков и реконструкцией газовой системы. Решения затронули реконструкцию оборудования новой обжиговой машины МОК-1-592, которая введена на Михайловском ГОКе. В результате реконструкции производительность машины увеличилась на 10 – 17 %, удельный расход топлива снизился на 8 – 15 %, а общий сброс газов в атмосферу после их очистки уменьшился на 50 – 58 %. Реконструкция также проведена на обжиговых машинах № 1, 2 Михайловского ГОКа [37, 38]. Опыт и технико-экономические показатели работы обжиговой машины четвертого поколения послужили примером для реконструкции всех обжиговых машин металлургических предприятий России. Более того, к подобной реконструкции проявили интерес и за рубежом – Бразилии и Иране, где в настоящее время активно ведутся реконструктивные монтажные работы под руководством специалистов ООО «НПВП ТОРЭКС».

Глубокие научные исследования по обжигу окатышей проведены и в ОАО «ВНИИМТ». Сотрудниками этого института научно обоснован, разработан и внед-

рен комплекс новых технических решений на обжиговой конвейерной машине АО «Соколовско-Сарбайское горно-обогатительное производственное объединение», позволивший увеличить ее производительность на 24,6 %, уменьшить расход природного газа более, чем в 2 раза, электроэнергии на привод тягодутьевых установок на 21,3 %, а также снизить техногенное давление на окружающую среду благодаря установке газоочисток на газопотоках, сокращению расходов топлива и электроэнергии, что позволило приблизить показатели ее работы к уровню лучших современных обжиговых машин [39, 40].

### Доменное производство

Кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» Института новых материалов и технологий УрФУ [41 – 51] тесно связана с доменным цехом ОАО «ММК». В последние годы разработано программное обеспечение для решения комплекса задач в области доменного производства, внедряемое в промышленную эксплуатацию на крупнейшем металлургическом предприятии России – ОАО «ММК». Результаты этой работы включают:

- интегрированный пакет прикладных программ автоматизированного рабочего места инженерно-технического персонала доменной печи;
- интегрированный пакет для инженерно-технического персонала доменного цеха;
- программное обеспечение для моделирования технологических процессов и аналитической оценки отчетных показателей работы доменного цеха;
- комплекс программ распознавания образов для прогноза теплового состояния технологических процессов в металлургии (на примере доменной плавки);
- пакет программ для оптимального распределения природного газа и технологического кислорода в группе печей;
- пакет программ выбора поставок сырья и оптимального состава шихт в аглодоменном производстве;
- программное обеспечение для управления объектами в металлургии во время их пуска (на примере пуска доменной печи);
- программное обеспечение для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки при использовании пылеугольного топлива.

Внедрение современной информационно-моделирующей системы позволило повысить эффективность принятия решений инженерно-техническим персоналом цеха в условиях нестабильности состава и качества проплавляемого железорудного сырья, топливно-энергетических ресурсов и изменений в конъюнктуре рынка. Программное обеспечение при использовании пылеугольного топлива предназначено для моделирования теплового, газодинамического режима доменной плавки и решения комплекса технологических задач.

Кафедрой «Металлургия железа и сплавов» Института новых материалов и технологий УрФУ на основе современных представлений о закономерностях тепло- и массообмена (с учетом термодинамики и кинетики поведения оксидов примесных элементов) разработана математическая модель теплового состояния нижней зоны доменной печи, позволяющая рассчитывать распределение температурных полей газа, кокса, шлака и чугуна по высоте печи. С использованием этой модели выполнен комплексный анализ восстановления примесей из оксидов в чугун. Это позволило реализовать выплавку чугуна из ванадийсодержащих титаномагнетитов с содержанием кремния в чугуне менее 0,1 %, а также провести комплекс мероприятий, обеспечивающих подавление процессов образования карбидов титана и оптимизировать шлаковый режим [52 – 55]. Реализация этих мероприятий позволила снизить удельный расход кокса более, чем на 10 кг/т чугуна и достигнуть удельной производительности более 3,0 т/м<sup>3</sup>.

В Институте металлургии УрО РАН разработана методика [56] оценки влияния металлургических характеристик железорудного сырья (восстановимость, прочность, температура размягчения и плавления) на технико-экономические показатели доменной плавки, в основе которой лежат математические модели доменного процесса [57, 58]. Эта методика использована для совершенствования технологии переработки железорудной базы черной металлургии, а также для ее расширения. Этим институтом совместно с Институтом горного дела УрО РАН предложена схема отдельной добычи низкотитанистых и высокотитанистых руд Гусевогорского месторождения [59]. Имет УрО РАН совместно с АО «ЕВРАЗ КГОК» и ОАО «ЕВРАЗ НТМК» выполнены работы по повышению качества агломерата и снижению расхода кокса в доменной плавке [60], а совместно с ОАО «Уралмеханобр» предложена технология переработки титаномагнетитовых руд Тебинбулакского месторождения (Республика Узбекистан) по схеме «доменная печь – конвертер» [61]. Успешно на пяти доменных печах Китая работает разработанная в институте система мониторинга состояния огнеупорной футеровки горна доменной печи [62], которую планируется внедрить и на одной из доменных печей ОАО «ММК».

### Доменные воздухонагреватели

Устойчивая тепловая работа доменных печей, которая определяет их производительность и удельный расход кокса, зависит от многих факторов. Одним из главных среди них является использование высоконагретого дутья. В последние годы широкое распространение для нагрева доменного дутья получили воздухонагреватели бесшахтного типа Калугина (ВНК). Сегодня на металлургических заводах мира работает

194 ВНК, обеспечивая доменные печи горячим воздушным дутьем, температурный уровень которого достигает 1000 – 1150 °С, а на некоторых заводах России и Китая температуру воздушного дутья удалось увеличить до 1200 – 1250 °С [63].

Исследователи доменного процесса указывают на целесообразность нагрева дутья до 1300 °С и более. Реализация такого предложения способна обеспечить достижение этой цели, что приведет к значительному экономическому эффекту. Об этом свидетельствует теплофизический анализ, выполненный ЗАО «Калугин», который показал реальную возможность достижения указанных температур, если под куполом воздухонагревателя Калугина (ВНК) поддерживать температуру на уровне 1430 °С за счет подогрева доменного газа и воздуха, используемых для отопления воздухонагревателей при отказе от добавок природного газа к доменному газу. Технологически это достигается с помощью компактных теплообменников – термосифонов, устанавливаемых в боровых перед дымовой трубой. Подобные тепло-утилизационные аппараты требуют на установку и эксплуатацию меньше финансовых средств, чем затраты на добычу топлива, его переработку и доставку к металлургическим предприятиям с последующим использованием в виде топливных добавок к доменному газу – основному виду топлива при нагреве насадки воздухонагревателя [64].

Для подтверждения энергоэффективности подобных решений проведено исследование рабочего цикла «нагрев насадки – нагрев доменного дутья» для условий работы доменной печи объемом 2700 м<sup>3</sup>, выплавляющей обычный чугун. Производительность доменной печи обеспечивается подачей дутья, расход которого составляет 5400 м<sup>3</sup>/мин. Для базового периода температура дутья принята 1250 °С, доменный газ и воздух для нагрева ВНК не подогреваются, а расход природного газа для обогащения доменного газа составил более 5600 м<sup>3</sup>/ч. Для перспективного периода может быть организован подогрев до 200 °С доменного газа и воздуха для отопления ВНК продуктами горения с температурой 300 °С без добавок природного газа. В этих условиях температура купола ВНК составит 1430 °С, а нагрев доменного дутья – 1310 °С. Следует подчеркнуть, что для перспективного периода достигается экономия топлива на нагрев 1000 м<sup>3</sup> дутья, величина которой несколько превышает 2,0 %. В условном топливе годовая экономия составляет 4210,7 т.

Компанией ЗАО «Калугин» накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению, монтажу и вводу в эксплуатацию теплообменных аппаратов на термосифонах. Этот опыт обеспечивает в настоящее время успешную работу систем утилизации тепла на термосифонах, установленных на 48 доменных печах России и Китая [65].

## Переработка жидких шлаков и расплавов

В этом направлении развития теплофизики ОАО «ВНИИМТ» является одним из первых как в России, так и за рубежом.

Коллективу ОАО «ВНИИМТ» удалось решить на мировом уровне сложную теплофизическую проблему по переработке жидких шлаков черной и цветной металлургии, используя для этого достижения теплофизики и ее главных разделов – теплообмена и гидродинамики. Главными на этом пути были задачи распыления шлака и организация движения охлажденной шлаковой пульпы. При изучении теплообменных процессов дробления и охлаждения струи жидкого расплава водой были установлены удельные расходы воды и предельные размеры частиц шлака. Даже значительное количество чугуна, которое может быть увлечено из печи шлаком, не создает взрывоопасной обстановки: чугун под воздействием струй воды также подвергается дроблению на мелкие капли, причем каждая из них располагает значительным запасом тепла, которое не способно вызвать парообразование взрывного характера. Изучение гидродинамических явлений, связанных с движением шлаковой пульпы, привело к разработке эрлифтной транспортной системы. Исследования в итоге явились причиной создания в комплексе оборудования доменной плавки установки припечной грануляции жидкого шлака [66]. Эта установка обеспечивает:

- более благоприятные санитарные и гигиенические условия труда;
- относительно простое управление, возможность полной автоматизации работы установки;
- полную переработку всего шлака доменной плавки в продукт высокого качества для цементной промышленности;
- локализацию вредных парогазовых выбросов и их организованное удаление;
- нейтрализацию сернистых соединений, содержащихся в парогазовых выбросах;
- взрывобезопасное получение высококачественных гранул;
- дробление и охлаждение шлакового расплава оборотной (слабо осветленной) водой;
- эвакуацию загущенной шлаководяной пульпы надежным, абразивостойким, эрлифтным способом;
- обезвоживание шлаководяной пульпы в непрерывно действующем агрегате карусельного типа;
- подсушку гранулированного шлака за счет его физического тепла.

Анализ работы этих установок на металлургических заводах России, Украины, Индии, Китая подтвердил их высокую производительность по скорости слива шлака (от 3 до 15 т/мин) и по годовым объемам переработки шлаков (от 0,66 до 2,0 млн т) [67]. Длительной эксплуатацией установок была подтверждена их полная взрывобезопасность. Накопленный опыт грануляции

жидких шлаков в черной металлургии с успехом использован при проектировании, строительстве и эксплуатации подобной установки в цветной металлургии на ПАО ГМКЗФ «Норильский никель» [68]. В настоящее время этот коллектив является основным разработчиком подобных установок для доменных печей объемом 2000 – 6000 м<sup>3</sup> [67].

Жидкий шлак обладает высокопотенциальным физическим теплом, утилизация которого является актуальной научно-технической проблемой. В настоящее время в ОАО «ВНИИМТ» разработана и опробована технология и установка для сухой грануляции шлакового расплава, основанная на кристаллизации жидкого шлака твердым теплоносителем. Эта технология готова к внедрению на металлургических предприятиях.

## Газо-печное хозяйство

Особое внимание на кафедрах университета и ОАО «ВНИИМТ» уделяется математическому моделированию теплофизических процессов в рабочем пространстве нагревательных печей и установок различного назначения. Так, созданный динамический зонально-узловой метод моделирования радиационного и сложного высокотемпературного теплообмена продолжает успешно развиваться [69]. Осуществленное совместное УрФУ и ОАО «ВНИИМТ» математическое моделирование процессов нагрева труб и трубных заготовок в секционных печах Северского трубного и Первоуральского новотрубного заводов подготовило научную основу реконструкции этих печей. На реконструированных печах достигнуто снижение удельных расходов топлива на 15 – 20 %, увеличена производительность печей на 20 – 30 % и снижена эмиссия оксидов азота. Метод был испытан в Институте технологий газа (США) с положительным результатом [70] и в настоящее время получил во всем мире широкое распространение с аббревиатурой DFI-method (Direct Flame Impingement Heating method).

Этот перечень внедренческих работ может быть продолжен:

- на термических печах Первоуральского новотрубного завода внедрены прогрессивные режимы термообработки труб, непосредственное измерение температуры металла и управление газодинамикой рабочего пространства печей, а на кольцевых печах Северского трубного завода для увеличения срока их службы установлены ребристые подины [70];
- разработан и внедрен модельный метод экспертной системы доменной печи [71];
- получили дальнейшее развитие методы энергоэкологического анализа процессов с определением технологических топливных чисел (ТТЧ), вредных и парниковых выбросов, с использованием этих методов выполнен анализ целого ряда металлургических процессов [72];

– проанализированы коксовые и бескоксовые металлургические технологии и разработаны рекомендации по развитию технологий с наименьшими энерго-экологическими выбросами. В частности, проработан в деталях ЛП-процесс (процесс прямого легирования стали ванадием), элементы которого нашли применение как в России, так и за рубежом при сокращении потерь ванадия в 3 – 4 раза [73, 74].

Исторически сложилось, что сотрудники кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии», развивая исследования по нагреву и охлаждению металла, традиционно уделяют внимание совершенствованию конструкций и тепловых режимов нагревательных печей. Эта работа проводится совместно с проектными и исследовательскими организациями, что обеспечивает проектирование, и строительство тепловых агрегатов по новейшим технологиям. Уделяется также серьезное внимание решению задач по улучшению энергоэффективности тепловых режимов за счет внедрения новейших газовых горелок скоростного типа с глубокой утилизацией тепла отходящих из печи продуктов горения, благодаря чему достигается экономия до 50 % природного газа по сравнению с аналогичными показателями работы печей устаревших конструкций [75].

Активная научная деятельность сотрудников кафедры с научно-производственной компанией «УралТермоКомплекс» может быть проиллюстрирована следующими результатами:

– на Кировском заводе по обработке цветных металлов построены по новым технологиям и запущены в эксплуатацию две толкательные и одна с шагающим подом методические печи для нагрева слябов (2 – 5 т) из медных сплавов. Для футеровки печи использованы волокнистые блоки. Печи оснащены современными скоростными горелками и комплексной системой автоматического управления тепловым режимом [76];

– на заводе металлоконструкций (г. Кашира, Московская область) спроектирована и построена уникальная камерная термическая печь с применением современных волокнистых футеровок и скоростных рекуперативных горелок. Уникальность этой печи заключается в том, что она создана с изменяющейся геометрией рабочего пространства в зависимости от объема нагреваемой садки, что обеспечивается устройством выкатного пода, который может перемещаться на расстояние до 60 м [77];

– на Уралмашзаводе (г. Екатеринбург) построена и введена в эксплуатацию вертикальная термическая печь для обработки длинномерных крупногабаритных изделий машиностроения переменного поперечного сечения (роторы турбин, валки прокатных станков). Эта печь футерована современными блочными керамоволокнистыми материалами. На печи установлены скоростные рекуперативные горелки. Контроль и управление тепловыми режимами термической обработки металлоизделий полностью обеспечивается комплекс-

ной автоматизированной системой. В тепловом режиме работы печи реализована новая более совершенная технология охлаждения изделий после их нагрева в печи до технологически заданных температур. Охлаждение металла обеспечивается с помощью воздуха, поступающего от вентилятора в печь через рекуперативные горелки. Такой цикл системы охлаждения связан с непрерывным снижением температуры металла и соответственно воздуха. В результате такого «мягкого» охлаждения исключается возможность образования в изделиях термических напряжений, способных вызвать появление трещин [78, 79].

Широкого внедрения комплексных систем автоматического управления тепловыми режимами печей удалось достичь за счет разработки математических моделей для каждой технологии нагрева металлоизделия и в случае необходимости – его охлаждения, в результате чего организация технологических процессов нагрева металла осуществляется без участия человека. Реализованные на всех агрегатах новые тепловые режимы привели к значительному снижению удельных расходов газа (до 50 %) и сокращению выбросов парниковых газов, среди которых наибольшую опасность представляют загрязнители атмосферы – CO, NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> и др.

Не менее успешной является деятельность творческих коллективов ОАО «ВНИИМТ» и УрФУ, связанная с разработкой комплекса мероприятий по модернизации металлургических печей различного назначения. Основными из них являются: выбор регенеративной или рекуперативной системы отопления с соответствующими горелочными устройствами, определение оптимального числа зон теплового регулирования, применение для футеровки керамоволокнистых материалов, оптимизация размеров рабочего пространства (в основном, высота свода), контроль состава продуктов горения по зонам и в боровых, автоматизация систем управления на базе программируемых контроллеров, моделирование и расчетный анализ для разработки и внедрения рациональных температурно-тепловых режимов работы печей [80]. При термообработке металлов достаточно часто применяются электрические печи. Использование электрической энергии имеет свои преимущества, но вместе с тем и более высокие показатели по расходам энергии. Себестоимость электронагрева в 1,5 – 2 раза, а капитальные затраты в 7 – 8 раз выше, чем при газовом нагреве. Институт накопил опыт перевода печей с электрического обогрева на газовый.

ОАО «ВНИИМТ» значительное внимание уделяет изучению теплофизических процессов горения газообразных видов топлива. Достижения в этом направлении используются для разработки и сертификации различных видов газо-горелочных устройств как по видам газообразного топлива, так и по области их применения. Созданная в институте рекуперативная горелка превосходит по основным показателям работы

(температуре подогрева воздуха и расходу воздуха на отсос дымовых газов) известные зарубежные аналоги [81]. Рекуперативные горелки применяются при температуре греющих газов печи не более 1000 – 1050 °С. Сотрудники этого института разработали и освоили производство малогабаритных регенеративных горелочных устройств, используемых в печах различного назначения. Первая отечественная камерная печь, на которой были установлены эти горелки, была сооружена на заводе в Верхней Салде (ВСМПО) в 2000 г. [82]. Процесс управления работой горелок полностью автоматизирован. Экономия топлива (природного газа) при этом составила 55 %. Всего выполнены и реализованы более 10 проектов реконструкции для печей различного назначения.

Роль достижений теплофизики в создании новых технологий и устройств в области термической обработки изделий из металлов и сплавов трудно переоценить. Особенно это связано с необходимостью подвергать термической обработке изделия разной термической массивности, формы, добиваясь при этом получение высоких механических свойств. Традиционные способы объемной закалки изделий в водяных, масляных, селитровых и щелочных баках не способны обеспечить для них требуемые заказчиком показатели прочности, структуры и т. п. Новые технологии ОАО «ВНИИМТ» регулируемого высокоскоростного водо-воздушного охлаждения опираются на закономерности изменения температурного поля на поверхности изделия (конвективный теплообмен) и внутри его (теплообмен теплопроводностью). Таким образом, контролируются температурные напряжения в изделии. Управление скоростями охлаждения различных элементов изделия в широком диапазоне температур осуществляется изменением плотности водо-воздушного орошения, которую можно менять в цикле термообработки, не допуская развития нежелательных явлений (по механическим свойствам, структуре и пр.). Активная работа по разработке и внедрению технологий водо-воздушного охлаждения проводится металлургами-теплотехниками ООО «ВНИИМТ» в сотрудничестве с работниками заводов и кафедры «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ [83]. Водо-воздушные технологии с успехом внедрены при термообработке различных видов проката – железнодорожных колес, рельсовых накладок и подкладок, листа из различных сплавов, труб, подшипниковых колец из стали ШХ-15, изделий машиностроения. Технология упрочнения листового стали на стане 5000 «Северсталь» не имеет аналогов в мировой практике. Термообработка по такой технологии рельсовых подкладок позволяет увеличить прочностные характеристики в 3 раза, твердость – в 1,2 – 2,5 раза, длительность эксплуатации на железнодорожных путях – в 2 – 5 раз [84]. Столь значительные успехи обусловлены тем, что возможности теплофизики водо-воздушного охлаждения использованы на

все 100 % [83 – 86]. Оно обеспечивает значительное снижение себестоимости термообработки за счет отказа от масла, селитры и моечных агрегатов. Являясь перспективной технологией, она активно и плодотворно будет развиваться и в дальнейшем.

ОАО «ВНИИМТ» и кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии» УрФУ активно сотрудничают в развитии теплофизики металлургических технологий и в других областях металлургии, что проявляется либо в разработке новых технологий, либо в существенном совершенствовании традиционных:

- в технологиях сушки измельченных сырьевых материалов достигнуты значительные успехи. Например, технология сушки сыпучих материалов с использованием твердого теплоносителя позволяет сократить время сушки от 10 до 20 раз, что обеспечивает компактность оборудования также до 10 раз [87];

- новая технология металлизации железорудного концентрата и руды в измельченном состоянии с использованием электрической дуги обладает преимуществами перед известными технологиями благодаря компактности, исключению переделов окомкования и обжига окатышей, а также разделению металла и шлака [88];

- новые технологии сушки футеровки чугуновозных, сталеразливочных и других типов ковшей и стелды для их реализации разработаны на основе теплофизического анализа процессов нагрева и охлаждения футеровки. Благодаря научному подходу к решению проблемы стойкости футеровки достигнуто двух- трехкратное увеличение срока службы ковшей при 5 – 10-кратном снижении расхода топлива [89];

- усовершенствованы установки металлизации окатышей по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате. В результате модернизации увеличена их производительность от 15 до 50 % и снижен расход природного газа на 5 – 7 % [90];

- технология и установка для переработки замасленной окалины реализованы на Синарском трубном заводе. Получаемый продукт по своей себестоимости в 2 – 2,5 меньше себестоимости рудного концентрата без учета положительного экологического эффекта [91].

**Выводы.** Область теплофизики, охватывающая технологии черной и цветной металлургии, активно развивается в направлениях:

- математического моделирования характерных для металлургии тепловых и массообменных процессов с учетом особенностей движения газа и материалов;

- физического моделирования процессов металлургических технологий для определения необходимых параметров, используемых при математическом моделировании как при разработке математических моделей, так и при их адаптации в ходе исследований промышленных технологий;

- изучения развития процессов различных металлургических технологий, что необходимо для более глубокого их понимания;

– анализа металлургических технологий с позиций энергоэффективности, ресурсосбережения и снижения техногенного давления на окружающую природную среду;

– разработки мероприятий по совершенствованию металлургических технологий и оборудования, обеспечивающих улучшение технико-экономических и экологических показателей после их внедрения в производство;

– создания научной базы для разработки систем управления технологическими процессами.

Научные и промышленные исследования последних лет, основу которых составляют достижения теплофизики, обеспечили значительное улучшение показателей работы металлургических технологий по качеству получаемых продуктов, производительности агрегатов, удельному расходу топлива, выбросам парниковых газов, а также вовлечению в современные технологии вторичных ресурсов различного происхождения. Об этом свидетельствуют успехи исследователей Уральской школы металлургов теплотехников (теплофизиков), представленные материалами как данной работы, так и других, опубликованных в этом номере журнала. В заключение важно отметить, что результаты развития теплофизики в области металлургии обогащают знаниями и студентов – будущих работников отрасли.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грум-Гржимайло В.Е. Пламенные печи. В 3-х томах. – М.: Издание теплотехнического института имени профессоров В.И. Гриневецкого и К.В. Кирша, 1925. – 104 с.
2. Швыдкий В.С., Ладыгичев М.Г., Шаврин В.С. Математические методы теплофизики: Учеб. пособие. – М.: Машиностроение-1, 1-е изд., 2001. – 232 с., 2-е изд., 2005. – 231 с.
3. Спиринов Н.А., Швыдкий В.С., Лобанов В.И., Лавров В.В. Введение в системный анализ теплофизических процессов металлургии. – Екатеринбург: УГТУ, 1999. – 205 с.
4. Элементы теории систем и численные методы моделирования процессов тепломассопереноса / В.С. Швыдкий, Н.А. Спиринов, М.Г. Ладыгичев и др. – М.: «Интермет-Инжиниринг», 1999. – 520 с.
5. Швыдкий В.С., Дзюзер В.Я. Методы численного решения инженерных задач. – Екатеринбург, 2010. – 396 с.
6. Информационные системы в металлургии / Н.А. Спиринов, Ю.В. Ипатов, В.И. Лобанов и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ, 2001. – 617 с.
7. Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2014. – 558 с.
8. Frolov Y.A., Polotsky L.I. Mathematical three-dimensional and dynamic model of sintering process and its use in theoretical and practical purposes // VI International Congress on the Science ICSTI. 14 – 18 October. 2012. Rio de Janeiro. P. 1447 – 1459.
9. Yaroshenko Yu.G., Shvydkiy V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Steady heat transfer in melt-irrigated blast-furnace zone // Steel in Translation. 2016. Vol. 46. No. 2. P. 88 – 92.
10. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию шахтных печей с плавлением материалов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 6. С. 424 – 430.
11. Shvydkiy V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Mathematical model of layered metallurgical furnaces and units // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012013.
12. Shvydkiy V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Gazification of coal dust particles in the blast furnace tuyere apparatus // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 150. P. 012021.
13. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 1 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 9. С. 634 – 638.
14. Швыдкий В.С., Фатхутдинов А.Р., Девярых Е.А. и др. К математическому моделированию слоевых металлургических печей и агрегатов. Сообщение 2 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 1. С. 19 – 23.
15. Рыболовлев В.Ю., Краснобаев А.В., Спиринов Н.А., Лавров В.В. Проблемы создания современных информационно-моделирующих систем технологических процессов в металлургии // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 10. С. 61 – 65.
16. Rybolovlev V.Yu., Krasnobayev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Principles of the development and introduction of an automated process control system for blast-furnace smelting at the Magnitogorsk Metallurgical Combine // Metallurgist. 2015. Vol. 59. No. 7 – 8. P. 653 – 658.
17. Спиринов Н.А., Швыдкий В.С., Лавров В.В. Современные принципы построения и реализации информационно-моделирующих систем в металлургии (на примере доменного производства): достижения и проблемы // Сб. тр. Междунар. науч.-практич. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей». – М.: Изд. Дом МИСиС, 2016. С. 166 – 168.
18. Модельные системы поддержки принятия решений в АСУ ТП доменной плавки / Н.А. Спиринов, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др.; Под ред. Н.А. Спиринова. – Екатеринбург: УрФУ, 2011. – 462 с.
19. Пат. 2432538 РФ. Устройство для подачи теплоносителя в слой спекаемой шихты на агломерационной машине / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.10.2011. Бюл. № 30.
20. Пат. 2275435 РФ. Способ зажигания агломерационной шихты, перемещающейся на спекательных тележках / Л.К. Герасимов, Г.М. Дружинин, В.А. Чистополов и др.; опубл. 27.04.2006. Бюл. № 12.
21. Винтовкин А.А., Чистополов В.А., Чистополов А.В., Денгуб В.В. Разработка и внедрение нового зажигательного горна для агломерационных машин // Сталь. 2015. № 3. С. 6 – 8.
22. Герасимов Л.К., Дружинин Г.М., Хамматов И.М. и др. Опыт разработки и освоения зажигательных горнов агломерационных машин // Сталь. 2010. № 3. С. 12 – 14.
23. Клейн В.И., Майзель Г.М., Ярошенко Ю.Г., Авдеев А.А. Теплотехнические методы анализа агломерационного процесса / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: УГТУ–УПИ. 2004. – 224 с.
24. Akiyama Y., Oyama N., Ivami Y. etc. Development of gas fuel injection technology in iron ore sintering process (reduction of CO<sub>2</sub> emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines) // VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil. P. 1043 – 1055.
25. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть I // Металлург. 2014. № 12. С. 42 – 47.
26. Фролов Ю.А., Полоцкий Л.И. Трехмерная математическая (динамическая) модель агломерационного процесса. Часть II // Металлург. 2015. № 1. С. 27 – 31.
27. Фролов Ю.А. Агломерация. Технология. Теплотехника. Управление. Экология. – М.: Металлургиздат, 2016. – 672 с.

28. Матюхин В.И., Ярошенко Ю.Г., Матюхин О.В. Снижение пылевых выбросов при агломерации железных руд с использованием энергии акустического поля // *Металлург*. 2016. № 4. С. 26 – 30.
29. Лобанов В.И., Гольцев В.А. Теплотехнические и технологические аспекты использования слоевого способа сжигания природного газа в металлургических агрегатах // *Тр. Междунар. науч.-технич. конф. «С творческим наследием Б.И. Китаева в XXI век»*. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 1998. С. 122 – 125.
30. Физико-химические и теплотехнические основы производства железорудных окатышей / В.М. Абзалов, В.А. Горбачев, С.Н. Евстюгин и др.; Под ред. акад. Л.И. Леонтьева. – Екатеринбург, УрО РАН, 2012. – 340 с.
31. Теплофизические закономерности термообработки железорудных окатышей на конвейерной машине (математическое моделирование) // Б.А. Боковиков, В.В. Брагин, С.Н. Евстюгин и др.; Под ред. Б.А. Боковикова. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. – 200 с.
32. Morales B., Contini A., Trindade L. etc. // *VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*. P. 61 – 68.
33. Лобанов В.И., Гольцев В.А. Возможности использования комбинированного способа сжигания природного газа при обжиге железорудных окатышей на обжиговой машине ОК-228 // *Вестник ГОУ ВПО УГТУ УПИ № 13. Металлургия и образование на Урале. Тр. I науч.-практич. конф.* – Екатеринбург: УГТУ-УПИ. 2005. С. 139 – 152.
34. Боковиков Б.А., Брагин В.В., Солодухин А.А., Ярошенко Ю.Г. Повышение энергоэффективности обжиговых конвейерных машин путем минимизации сбросов на дымовую трубу // *Сталь*. 2016. № 8. С. 81 – 84.
35. Абзалов В.М., Брагин В.В., Вяткин А.А. и др. Разработка обжиговой конвейерной машины нового поколения // *Сталь*. 2008. № 12. С. 13 – 14.
36. Пат. 2350664 РФ. Способ трехстадийной сушки окатышей на обжиговой конвейерной машине / В.М. Абзалов, С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн и др. Опубл. 27.03.2009. Бюл. № 9.
37. Абзалов В.М., Брагин В.В., Бруев В.П., Неволин В.Н. Модернизация обжиговых машин ОК-520 ОАО «Михайловский ГОК» // *Сталь*. 2005. № 2. С. 3 – 4.
38. Абзалов В.М., Борисенко Б.И., Брагин В.В., Евстюгин С.Н. и др. Эффективность модернизации фабрики окомкования ОАО «Михайловский ГОК» // *Сталь*. 2006. № 6. С. 9 – 10.
39. Буткарев А.А. Исследование и совершенствование процесса управления термообработкой окатышей на обжиговых конвейерных машинах // *Сталь*. 2011. № 5. С. 4.
40. Буткарев А.А., Ащеулов В.Н., Жомирук П.А. и др. Оптимизация работы тракта эксгаустера обжиговой машины ОК-108 АО «ССГПО» для увеличения производства окатышей // *Сталь*. 2015. № 3. С. 12 – 15.
41. Компьютерные методы моделирования доменного процесса / О.П. Онорин, Н.А. Спиринов, В.Л. Терентьев и др.; Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2005. – 301 с.
42. Спиринов Н.А., Лавров В.В., Паршаков С.И. Оптимизация и идентификация технологических процессов в металлургии / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2006. – 307 с.
43. Lavrov V.V., Spirin N.A. Automated information system for analysis and prediction of production situations in blast furnace plant // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012010.
44. Spirin N.A., Gileva L.Y., Lavrov V.V. Information modeling system for blast furnace control // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012011.
45. Spirin N.A., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Lavrov V.V. Mathematical model and software for control of commissioning blast furnace // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 150. P. 012012.
46. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y. etc. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process // *Metallurgist*. 2016. Vol. 1. P. 1 – 7.
47. Spirin N.A., Lavrov V.V., Istomin A.S. etc. Software for the raw-materials management system in blast-furnace smelting // *Metallurgist*. 2015. Vol. 59. No. 1 – 2. P. 104 – 112.
48. Щипанов К.А., Спиринов Н.А., Бурыкин А.А. и др. Технологические особенности и программное обеспечение расчета задувочной шихты доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2015. Т. 58. № 2. С. 134 – 139.
49. Щипанов К.А., Спиринов Н.А. Расчет задувочной шихты доменной печи. Свидетельство государственной регистрации программы для ЭВМ № 2012612255 от 20.02.2012.
50. Онорин О.П., Спиринов Н.А., Лавров В.В. и др. Оценка формы зоны вязкопластичных масс железорудных материалов в доменной печи методом математического моделирования // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 6. С. 24 – 29.
51. Лавров В.В., Спиринов Н.А., Бурыкин А.А. Разработка моделирующей системы расчета теплообменных процессов и оценки параметров зоны вязко-пластичного состояния железорудных материалов в доменной печи // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2013. № 4. С. 34 – 38.
52. Кушнарев А.В., Филатов С.В., Киричков А.А. и др. Внедрение технологии выплавки низкремнистых чугунов на НТМК // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2011. № 3. С. 42.
53. Zagainov S.A., Filatov S.V., Sobianina O.N., Gordon Yu.M. Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite // *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and XIII International Symposium on iron Ore, 14 – 18 October, 2012. Rio de Janeiro, RJ, Brazil*. P. 1406 – 1415.
54. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ особенностей восстановления титана в доменной печи // *Сталь*. 2012. № 3. С. 9 – 11.
55. Собянина О.Н., Филатов С.В., Загайнов С.А. Анализ условий движения расплава в горне доменной печи при плавке титаномагнетитов // *Изв. вуз. Черная металлургия*. 2008. № 4. С. 69 – 71.
56. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical Basis of Investigation of Influence of the Iron Ore Materials and Coke Metallurgical Characteristics on the Blast Furnace Smelting Efficiency // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 602 – 604. P. 365 – 375.
57. Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
58. Дмитриев А.Н. Математическое моделирование доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2011. – 163 с.
59. Дмитриев А.Н. Современное состояние, перспективы развития и освоения базы титаносодержащих руд Урала // *Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2015. № 12. С. 36 – 40.
60. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V. etc. The characteristic of ores and concentrates of the open society “EVRAZ KGOK” // *Advanced Materials Research*. 2014. Vol. 834 – 836. P. 364 – 369.
61. Dmitriev A.N., Sheshukov O.Yu., Gazaleeva G.I. etc. Development of metallurgical processing technology the titanomagnetite concentrate of the Tebinbulak deposit // *Applied Mechanics and Materials*. 2014. Vol. 670 – 671. P. 283 – 289.
62. Дмитриев А.Н., Чесноков Ю.А., Чэнь К. и др. Система контроля разгара огнеупорной футеровки горна доменной печи // *Сталь*. 2013. № 11. С. 8.
63. Kalugin, Ya. P. High-temperature shaftless hot stoves for blast furnaces // *Proc. of VI International Congress on the Science and Technology of Ironmaking (VI ICSTI), Associaçao Brasileira de Metalurgia Materiais e Mineracao (ABM): Rio de Janeiro, 2012*. P. 2774 – 2783.
64. Ярошенко Ю.Г., Гордон Я.М., Ходоровская И.Ю. Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии черной металлургии / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2012. – 670 с.

65. Prokofiev B.N., Kalugina M.Ya., Murzin Ya.A. etc. Development of hot blast stove design without conventional combustion chamber // Proc. of METEC and the 2nd European Steel Technology and Application Days, METEC & 2nd ESTAD: Dusseldorf, 2015. P. 24; pdf 18.06.2015 12:00.
66. Пат. 101445 РФ. Установка для переработки шлакового расплава / Л.А. Зайнуллин, А.Б. Бычков, Г.И. Чеченин, В.Г. Грезнев. Опубл. 20.01.2011. Бюл. № 2.
67. Зайнуллин Л.А., Сухобаевский Ю.Я., Давыдов А.А. Использование установки припечной грануляции шлаков в цветной металлургии // Сталь. 2000. № 3. С. 18 – 20.
68. Зайнуллин Л.А., Дружинин Г.М. 85 лет научно-исследовательскому институту металлургической теплотехники (ВНИИМТ) // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 2015. № 4. С. 3 – 8.
69. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Интегрированный энерго-экологический анализ. Т.1. – М.: Теплотехник, 2010. – 688 с.
70. Лисиенко В.Г. Совершенствование и повышение эффективности энерготехнологий и производств. Т. 2. Кн. 2. Ч. 1. Анализ режимных параметров и конструкций в энерготехнологиях. – Екатеринбург: УрФУ, 2014. – 560 с.
71. Сучков А.В., Лисиенко В.Г., Сучков В.А. Совершенствование управления многомерным технологическим объектом на примере доменной печи. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – 126 с.
72. Lisienko V.G., Lapteva A.V. Energy-ecological analysis and assessment of developed metallurgical technologies // IV European Congress “Economics and Management of Energy in Industry” Portugal. Porto, Report 4. 2007. P. 7.
73. Лисиенко В.Г., Соловьева Н.В., Трофимова О.Г. Альтернативная металлургия: проблема легирования, модельные оценки эффективности / Под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2007. – 440 с.
74. Лисиенко В.Г., Шлеймович Е.М., Ладыгичев М.Г. и др. Температура: теория, практика, эксперимент. Справ. изд. в 3-х томах. Т. 1. Кн. 1. Методы контроля температуры / Под. ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплотехник, 2010. – 549 с.
75. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. и др. Комплексная модернизация нагревательных печей // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 12. С. 56 – 59.
76. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Казяев Д.М. и др. Модернизация проходной печи для нагрева медных слябов под пластическую деформацию // Цветные металлы. 2011. № 4. С. 85 – 89.
77. Вохмяков А.М., Казяев М.Д., Казяев Д.М. Камерная печь с разделяющимся рабочим пространством // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 9. С. 30 – 33.
78. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В., Спитченко Д.И. Методика и результаты исследования сложного внешнего теплообмена в вертикальной камерной печи для термообработки длинномерных изделий // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 667 – 671.
79. Казяев М.Д., Вохмяков А.М., Киселев Е.В. и др. Влияние конструкции футеровки и типа топливосжигающих устройств на тепловую работу камерных вертикальных печей // Тр. VII Международн. науч.-практич. конф. «Энергосберегающие технологии в промышленности. Печные агрегаты. Экология», посвященной 150-летию великого русского металлурга В.Е. Грум-Гржимайло (15 – 17 октября 2014 г.). – М.: НИТУ МИСиС, 2014. С. 224 – 235.
80. Дружинин Г.М., Баргаш М.Р., Леонтьев В.А., Мартынов А.П. Основы методологии модернизации конструкций и режимов работы нагревательных и термических печей // Сб. докл. НТК «Металлургическая теплотехника как основа энерго- и ресурсосбережения в металлургии». – Екатеринбург: ОАО «ВНИИ-МТ», 2010. С. 44 – 49.
81. Баргаш М.Р., Дружинин Г.М., Лошкарев Н.Б., Попов А.Б. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах // Сталь. 2010. № 3. С. 125 – 127.
82. Дистергефт И.М., Дружинин Г.М., Щербинин В.И. и др. Регенеративные системы отопления для нагревательных печей прокатного и кузнечного производства (история развития, теория и практика) // Металлургическая теплотехника: Сб. научн. тр. Национальной металлургической академии Украины. Т. 5. – Днепропетровск: НМетАУ, 2002. С. 44 – 57.
83. Ярошенко Ю.Г., Липунов Ю.И., Захарченко М.В. и др. Разработка нового способа термического упрочнения для решения экологических задач металлургического производства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 4. С. 221 – 225.
84. Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Некрасова Е.В. и др. Струйное водяное охлаждение при термоупрочнении проката несимметричного профиля // Сталь. 2015. № 3. С. 83 – 86.
85. Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. и др. Термоупрочнение рельсовой накладки струйным водяным охлаждением // Сталь. 2014. № 8. С. 3 – 8.
86. Жилияков А.Ю., Липунов Ю.И., Эйсмодт К.Ю., Ярошенко Ю.Г. Влияние технологии термоупрочнения на структуру рельсовой накладки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 9. С. 682 – 687.
87. Зайнуллин Л.А., Карелин В.Г., Артов Д.А. и др. Сушка угля твердым теплоносителем // Металлург. № 9. 2016. С. 23 – 25.
88. Зайнуллин Л.А., Епишина А.Ю., Артов Д.А. и др. Высокотемпературное углетермическое восстановление сидеритовых руд в электрической дуге // Металлург. 2016. № 11. С. 31 – 34.
89. Рязанов В.Т., Хохлов В.А., Шульгин С.С., Оганесян Ю.М. Опыт модернизации стенов сушики футеровки чугуновозных ковшей // Сталь. 2015. № 3. С. 39 – 41.
90. Мехряков Д.В., Грезнев В.Г., Малей И.В. и др. Опыт проведения модернизации установок металлизации по технологии «Мидрекс» на Оскольском электрометаллургическом комбинате // Сталь. 2015. № 3. С. 25 – 27.
91. Подковыркин Е.Г., Коршунова Н.Г., Баков А.В. и др. Роторно-вихревые установки для тепловой обработки шихтовых материалов металлургического передела // Сталь. 2015. № 3. С. 98 – 99.

Поступила 12 апреля 2017 г.

## ТHERMOPHYSICS – RESEARCH BASE OF ENERGY- AND RESOURCE-SAVING METALLURGICAL TECHNOLOGIES

*Yu.G. Yaroshenko*

Ural Federal University named after the first President of Russia  
B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The article presents the achievements of the Ural scientific school of scientists and metallurgists-heating engineers in improving a wide spectrum of metallurgical technologies determined on a scientific basis

of the creative union of two sciences – physics and computer science. In recent years, mathematical modeling in combination with physical significantly reduce the time and scope of the search for optimal solutions and thereby provide more reliable design and commissioning of thermal regimes of established technologies and equipment. Modernization of sintering machines was carried out by introduction of automatic control systems of thermal and gas-dynamic processes and by equipping them by the ignition furnaces of new type. These

activities with the intensification of heat-mass transfer processes have improved the feasibility and environmental performance of the sinter plants in Russia and abroad. Technological and thermo-physical solutions during the pellets firing are associated with organization of the transfer system of gas flows and reconstruction of gas duct system. As a result of reconstruction, the productivity of machines increased by 10–17 %, the specific fuel consumption decreased by 8–15 % and the discharge of gases after their treatment decreased by 50–58 %. Such reconstruction was made for firing machines in Russia, Brazil, Iran. In recent years, the software has been developed for the solution of complex problems in blast furnace production. It was introduced into commercial operation at the largest metallurgical enterprise in Russia – JSC “MMK”. New Cowper blast heaters for blast furnaces are able to provide heating up to 1300 °C or more by the heating of blast furnace gas and air used for heating of Cowper blast heaters at failure from supplements of natural gas. The problem of processing of metallurgical liquid slag is solved by the creation at factories of ferrous metallurgy of Russia, Ukraine, India and China of units, which are capable to provide high productivity rate of slag discharge from 3 to 15 t/min and by annual volumes of granular slag production – from 0.66 to 2.0 million tons. The installation of the company “Norilsk Nickel” also works successfully. The improvement of thermal modes and equipment of heating furnaces and installations for various purposes is based on mathematical modeling of thermophysical processes, the basis of which is the created dynamic zonal-node method of modeling radiative and complex heat transfer. This method is successfully developing. In recent years, new designs of furnaces are developed, hundreds of furnaces were upgraded. The organization of thermal modes of their operation has led to a significant reduction in specific fuel consumption, improving the quality of metal heating and during heat treatment – the quality of the finished product.

**Keywords:** mathematical modeling, agglomerate, pellets, blast furnaces, air heaters, liquid slag, heating furnaces and installations, equipping.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-587-602

## REFERENCES

1. Grum-Grzhimailo V.E. *Plamennye pechi: v 3 t.* [Combustion furnace: in 3 vols.]. Moscow: Izdanie teplotekhnicheskogo instituta imeni professorov V.I. Grinevetskogo i K.V. Kirsha, 1925, 104 p. (In Russ.).
2. Shvydkii V.S., Ladygichev M.G., Shavrin V.S. *Matematicheskie metody teplofiziki. Uchebnoe posobie* [Mathematical methods of thermophysics: Manual]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 231 p. (In Russ.).
3. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lobanov V.I., Lavrov V.V. *Vvedenie v sistemy analiz teplofizicheskikh protsessov metallurgii* [Introduction to systematic analysis of thermophysical processes in metallurgy]. Ekaterinburg: UGTU, 1999, 205 p. (In Russ.).
4. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Ladygichev M.G., Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M. *Elementy teorii sistem i chislennyye metody modelirovaniya protsessov teplomassoperenosa* [Elements of systems theory and numerical modeling methods of processes of heat and mass transfer]. Moscow: Intermet-Inzhiniring, 1999, 520 p. (In Russ.).
5. Shvydkii V.S., Dzyuzer V.Ya. *Metody chislennogo resheniya inzhenernykh zadach* [Methods of numerical solution of engineering problems]. Ekaterinburg, 2010, 396 p. (In Russ.).
6. Spirin N.A., Ipatov Yu.V., Lobanov V.I., Krasnobaev V.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Shvydkii V.S., Zagainov S.A., Onorin O.P. *Informatsionnye sistemy v metallurgii* [Information systems in metallurgy]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU–UPI, 2001, 617 p. (In Russ.).
7. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu. etc. *Matematicheskoe modelirovanie metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in APCS]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO UIPTs, 2014, 558 p. (In Russ.).
8. Frolov Y.A., Polotsky L.I. Mathematical three-dimensional and dynamic model of sintering process and its use in theoretical and practical purposes. *The 6th International Congress on the Science ICSTI. October 14th to 18th. 2012. Rio de Janeiro*, pp. 1447–1459.
9. Yaroshenko Yu.G., Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Steady heat transfer in melt-irrigated blast-furnace zone. *Steel in Translation*. 2016, vol. 46, no. 2, pp. 88–92.
10. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. The mathematical design of mine stoves with materials melting. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 6, pp. 424–430. (In Russ.).
11. Shvydkii V.S., Spirin N.A., Lavrov V.V. Mathematical model of layered metallurgical furnaces and units. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012013.
12. Shvydkii V.S., Yaroshenko Yu.G., Spirin N.A., Lavrov V.V. Gazification of coal dust particles in the blast furnace tuyere apparatus. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012021.
13. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 1. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 9, pp. 634–638. (In Russ.).
14. Shvydkii V.S., Fatkhutdinov A.R., Devyatykh E.A., Devyatykh T.O., Spirin N.A. On mathematical modeling of layer metallurgical furnaces and aggregates. Report 2. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 1, pp. 19–23. (In Russ.).
15. Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Problems of development of modern information-modeling systems of technological processes in metallurgy. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 10, pp. 61–65. (In Russ.).
16. Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Spirin N.A., Lavrov V.V. Principles of the development and introduction of an automated process control system for blast-furnace smelting at the Magnitogorsk Metallurgical Combine. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 7–8, pp. 653–658.
17. Spirin N.A., Shvydkii V.S., Lavrov V.V. Modern principles of construction and realization of information-modeling systems in metallurgy (on the example of blast furnace production): achievements and problems. In: *Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. 100 let otechestvennogo proektirovaniya metallurgicheskikh pechei. Sbornik trudov mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Energy-efficient and resource-saving technologies in the industry. 100 years of domestic design of metallurgical furnaces: Coll. of papers of Int. Sci.-Pract. Conf.]. Moscow: Izd. Dom MISiS, 2016, pp. 166–168. (In Russ.).
18. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Krasnobaev A.V., Onorin O.P., Kosachenko I.E. *Model'nye sistemy podderzhki prinyatiya reshenii v ASU TP domЕННОй plavki* [Model system of decision support in APCS of blast furnace]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UrFU, 2011, 462 p. (In Russ.).
19. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Chistoplov V.A. etc. *Ustroystvo dlya podachi teplonositel'ya v sloi spekaemoy shikhty na aglomeratsionnoy mashine* [Device for heat carrier supply into the layer of sintered charge at sintering machine]. Patent RF no. 2432538. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 30. (In Russ.).
20. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Chistoplov V.A. etc. *Sposob zachiganiya aglomeratsionnoy shikhty, peremeshchayushcheysya na spekatel'nykh telezhkakh* [Method of ignition of the sinter charge, moving on pallet cars]. Patent RF no. 2275435. *Byulleten' izobretenii*. 2006, no. 12. (In Russ.).
21. Vintovkin A.A., Chistoplov V.A., Chistoplov A.V., Den'gub V.V. Development and introduction of new ignition furnace for sintering machines. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 6–8. (In Russ.).
22. Gerasimov L.K., Druzhinin G.M., Khammatov I.M., Spirin N.A., Chistoplov V.A. Ignition hearths in sintering machines. *Steel in Translation*. 2010, vol. 40, no. 3, pp. 247–251.

23. Klein V.I., Maizel' G.M., Yaroshenko Yu.G., Avdeenko A.A. *Teplotekhnicheskie metody analiza aglomeratsionnogo protsesssa* [Thermal methods of analysis of the agglomeration process]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2004, 224 p. (In Russ.).
24. Akiyama Y., Oyama N., Ivami Y., etc. Development of gas fuel injection technology in iron ore sintering process (reduction of CO<sub>2</sub> emissions with gas fuel injection technology in the sintering machines). *The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 1043–1055.
25. Frolov Yu.A., Polotskii L.I. Three-dimensional mathematical (dynamic) model of the sintering process. Part I. *Metallurgist*. 2015, vol. 58, no. 11-12, pp. 1071–1079.
26. Frolov Yu.A., Polotskii L.I. Three-dimensional mathematical (dynamic) model of the sintering process. Part II. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1, pp. 9–15.
27. Frolov Yu.A. *Agglomeratsiya. Tekhnologiya. Teplotekhnika. Upravlenie. Ekologiya* [Agglomeration. Technology. Engineering. Management. Ecology]. Moscow: Metallurgizdat, 2016, 672 p. (In Russ.).
28. Matyukhin V.I., Yaroshenko Yu.G., Matyukhin O.V. Reducing Dust Emission During the Sintering of Iron Ores by Using the Energy of an Acoustic Field. *Metallurgist*. 2016, 19 July, pp. 1–6 (Article in press).
29. Lobanov V.I. Gol'tsev V.A. Thermotechnical and technological aspects of the use of layered method of natural gas combustion in metallurgical aggregates. In: *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "S tvorcheskim naslediem B.I. Kitaeva v XXI vek"* [Proceedings of Int. Sci.-Tech. Conf. "Creative heritage, B.I. Kitaev in the 21st century"]. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 1998, pp. 122–125. (In Russ.).
30. Abzalov V.M., Gorbachev V.A., Evstyugin S.N., Klein V.I., Leont'ev L.I., Yur'ev B.P. *Fiziko-khimicheskie i teplotekhnicheskie osnovy proizvodstva zhelezorudnykh okatyshei* [Physico-chemical and technological bases of iron ore pellets production]. Leont'ev L.I. ed. Ekaterinburg: UrO RAN, 2012, 340 p. (In Russ.).
31. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Evstyugin S.N., Malkin V.M., Naidich M.I., Solodukhin A.A. *Teplofizicheskie zakonomernosti termoobrabotki zhelezorudnykh okatyshei na konveiernoi mashine (matematicheskoe modelirovanie)* [Thermo-physical regularities of heat treatment of iron ore pellets on a conveyor machine (mathematical modeling)]. Bokovikov B.A. ed. Ekaterinburg: OOO UIPTs, 2013, 200 p. (In Russ.).
32. Morales B., Contini A., Trindade L., etc. *The 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 2012. Rio de Janeiro, Brasil*, pp. 61–68.
33. Lobanov V.I. Gol'tsev V.A. Possibilities of using combined method of natural gas combustion during firing of iron ore pellets in OK-228 firing machine. In: *Vestnik UGTU UPI no.13. Metallurgiya i obrazovanie na Urale. Trudy I nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Vestnik GOU VPO UGTU UPI no. 13. Metallurgy and education in the Urals. Papers of the 1st Sci.–Pract. Conf.]. Ekaterinburg: UGTU-UPI. 2005, pp. 139–152. (In Russ.).
34. Bokovikov B.A., Bragin V.V., Solodukhin A.A., Yaroshenko Yu.G. Increasing energy efficiency of the roasting conveyor machines by minimizing discharges to chimney. *Stal'*. 2016, no. 8, pp. 81–84. (In Russ.).
35. Abzalov V.M., Bragin V.V., Vyatkin A.A., Evstyugin S.N., Lelko S.N. Development of a new-generation conveyor roasting machine. *Steel in Translation*. 2008, vol. 38, no. 12, pp. 999–1000.
36. Abzalov V.M., Evstyugin S.N., Klein V.I. etc. *Sposob trekhstadiinnoi sushki okatyshei na obzhigovoi konveiernoi mashine* [Method of three-stage drying of pellets on firing conveyor machine]. Patent RF no. 2350664. *Byulleten' izobretenii*. 2009, no. 9. (In Russ.).
37. Abzalov V.M., Bragin V.V., Bruev V.P., Nevolin V.N. Modernizing the OK-520 roasting machines at mikhailovskii gok joint stock company. *Steel in Translation*. 2005, vol. 35, no. 2, pp. 1–2.
38. Abzalov V.M., Borisenko B.I., Bragin V.V., Evstyugin S.N., Kopot' N.N., Kretov S.I., Nevolin V.N. Modernizing the OAO Mikhailovskii GOK pelletization plant. *Steel in Translation*. 2006, vol. 36, no. 6, pp. 34–35.
39. Butkarev A.A. Improving the control of pellet heat treatment in conveyor roasting machines. *Steel in Translation*. 2011, vol. 41, no. 5, pp. 395–399.
40. Butkarev A.A., Ashcheulov V.N., Zhomiruk P.A., Lazebnaya Yu.P., Butkarev A.P. Boosting the hot-blast temperature in blast furnaces by means of an optimal control system. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 199–206.
41. Onorin O.P., Spirin N.A., Terent'ev V.L., Gileva L.Yu., Rybolovlev V.Yu., Kosachenko I.E., Lavrov V.V., Terent'ev A.V. *Komp'yuternye metody modelirovaniya domennogo protsesssa* [Computer methods of blast furnace process modeling]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2005, 301 p. (In Russ.).
42. Spirin N.A., Lavrov V.V., Parshakov S.I. *Optimizatsiya i identifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v metallurgii* [Optimization and identification of technological metallurgical processes]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: UGTU-UPI, 2006, 307 p. (In Russ.).
43. Lavrov V.V., Spirin N.A. Automated information system for analysis and prediction of production situations in blast furnace plant. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012010.
44. Spirin N.A., Gileva L.Y., Lavrov V.V. Information modeling system for blast furnace control. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012011.
45. Spirin N.A., Onorin O.P., Shchipanov K.A., Lavrov V.V. Mathematical model and software for control of commissioning blast furnace. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 150, p. 012012.
46. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Y., Krasnobaev A.V., Pavlov A.V. Use of contemporary information technology for analyzing the blast furnace process. *Metallurgist*. 2016, vol. 1, pp. 1–7.
47. Spirin N.A., Lavrov V.V., Istomin A.S., Burykin A.A., Shchipanov K.A., Kosachenko I.E., Onorin O.P. Software for the raw-materials management system in blast-furnace smelting. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 1-2, pp. 104–112.
48. Shchipanov K.A., Spirin N.A., Burykin A.A., Kosachenko I.E., Onorin O.P. Technological features and software calculations of blowing-in blast furnace charge. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no. 2, pp. 134–139. (In Russ.).
49. Shchipanov K.A., Spirin N.A. *Raschet zaduvочноi shikhty domennoi pechi* [Calculation of blast furnace charge for blowing]. Certificate of state registration of computer program no. 2012612255 dated 20.02.2012. (In Russ.).
50. Onorin O.P., Spirin N.A., Lavrov V.V., Kosachenko I.E., Rybolovlev V.Yu. Assessment of forms of the zone of viscous-plastic masses of iron-ore materials in blast furnace by the method of mathematical modeling. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 6, pp. 24–29. (In Russ.).
51. Lavrov V.V., Spirin N.A., Burykin A.A., Onorin O.P., Kosachenko I.E., Krasnobaev A.V., Rybolovlev V.Yu. The development of the modeling system of the calculation of heat exchange processes and estimation of parameters of the zone of viscoplastic state of iron metal materials in blast furnace. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 4, pp. 34–38. (In Russ.).
52. Kushnarev A.V., Filatov S.V., Kirichkov A.A., Filippov V.V., Gil'manov M.R., Mikhalev V.A., Zagainov S.A., Tleugabulov B.S., Sobyantina O.N. Introduction of the smelting technology of low-silicon iron at NTMK. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2011, no. 3, p. 42. (In Russ.).
53. Zagainov S.A., Filatov S.V., Sobyantina O.N., Gordon Yu.M. Technological solutions' for intensive production of low silicon hot metal in blast furnace processing vanadium containing titania-magnetite. *Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on ironmaking and 13th International Symposium on iron Ore, October 14th to 18th, 2012. Rio de Janeiro, RJ, Brazil*, pp. 1406–1415.

54. Sobyana O.N., Filatov S.V., Zagainov S.A. Analysis of titanium reduction in a blast furnace. *Steel in Translation*. 2012, vol. 42, no. 3, pp. 246–248.
55. Sobyana O.N., Filatov S.V., Zagainov S.A. Analysis of the conditions of melt motion in hearth of blast furnace at smelting of titanomagnetites. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2008, no. 4, pp. 69–71. (In Russ.).
56. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 602-604, pp. 365–375.
57. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Balance logic-statistical model of blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 164 p. (In Russ.).
58. Dmitriev A.N. *Matematicheskoe modelirovanie domennogo protsessa* [Mathematical modeling of blast furnace process]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2011, 163 p. (In Russ.).
59. Dmitriev A.N. Current state, prospects and development of titanium ores base of the Urals. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 12, pp. 36–40. (In Russ.).
60. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Petukhov R.V., Kornilkov S.V., Pelevin A.E., Fishman A.Y., Sapozhnikova T.V., Shunyaev K.Y. The characteristic of ores and concentrates of the open society "EVRAZ KGOK". *Advanced Materials Research*. 2014, vol. 834-836, pp. 364–369.
61. Dmitriev A.N., Sheshukov O.Yu., Gazaleeva G.I., Chesnokov Y.A., Bratygin E.V., Nekrasov I.V., Vitkina G.Yu. Development of metallurgical processing technology the titanomagnetite concentrate of the Tebinbulak deposit. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, vol. 670-671, pp. 283–289.
62. Dmitriev A.N., Chesnokov Yu.A., Chen' K., Ivanov O.Yu., Zolotykh M.O. Monitoring the wear of the refractory lining in the blast-furnace hearth. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 11, pp. 732–739.
63. Kalugin, Ya. P. High-temperature shaftless hot stoves for blast furnaces. *Proc. of the 6th International Congress on the Science and technology of Ironmaking (6th ICSTI), Associacao Brasileira de Metalurgia Materias e Mineracao (ABM): Rio de Janeiro, 2012*, pp. 2774–2783.
64. Yaroshenko Yu.G., Gordon Ya.M., Khodorovskaya I.Yu. *Energo-effektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii chernoi metallurgii* [Energy-efficient and resource-saving technologies of ferrous metallurgy]. Yaroshenko Yu.G. ed. Ekaterinburg: OOO UIPT, 2012, 670 p. (In Russ.).
65. Prokofiev B.N., Kalugina M.Ya., Murzin Ya.A., Ivlev S.A., Subbotin A.A. Development of hot blast stove design without conventional combustion chamber. *Proc. of METEC and the 2nd European Steel Technology and Application Days, METEC & 2nd ESTAD: Dusseldorf, 2015*, p. 24 pdf 18.06.2015 12:00.
66. Zainullin L.A., A.B. Bychkov A.B., Chechenin G.I., Greznev V.G. *Ustanovka dlya pererabotki shlakovogo rasplava* [Installation for processing of molten slag]. Patent RF no. 101445. *Byulleten' izobretenii*. 2011, no. 2. (In Russ.).
67. Zainullin L.A., Druzhinin G.M. 85 years of Scientific-Research Institute of Metallurgical Heat Engineering (VNIIMT). *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 4, pp. 3–8. (In Russ.).
68. Zainullin L.A., Sukhobaevskii Yu.Ya., Davydov A.A. The use of installation for granulation of slag in nonferrous metallurgy. *Stal'*. 2000, no. 3, pp. 18–20. (In Russ.).
69. Lisienko V.G. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti energetekhnologii i proizvodstv: (integrirrovanniy energo-ekologicheskii analiz). T. 1* [Improving and increasing the efficiency of energy technologies and industries: (integrated energy and environmental analysis). Vol. 1]. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 688 p. (In Russ.).
70. Lisienko V.G. *Sovershenstvovanie i povyshenie effektivnosti energetekhnologii i proizvodstv: (integrirrovanniy energo-ekologicheskii analiz). T. 2. Kn. 2. Ch. 1: Analiz rezhimnykh parametrov i konstruktiv v energetekhnologiyakh* [Improving and increasing the efficiency of energy technologies and industries: (integrated energy and environmental analysis). Vol. 2, Book 2, Part.1: Analysis of performance parameters and structures in energy technologies]. Ekaterinburg: UrFU, 2014, 560 p. (In Russ.).
71. Suchkov A.V., Lisienko V.G., Suchkov V.A. *Sovershenstvovanie upravleniya mnogomernym tekhnologicheskim ob'ektom na primere domennoi pechi* [Improved management of multidimensional technological object on the example of blast furnace]. Ekaterinburg: UrFU, 2012, 126 p. (In Russ.).
72. Lisienko V.G., Lapteva A.V. Energy-ecological analysis and assessment of developed metallurgical technologies. *4th European Congress "Economics and Management of Energy in Industry" Portugal. Porto, Report 4, 2007*, p. 7.
73. Lisienko V.G., Solov'eva N.V., Trofimova O.G. *Al'ternativnaya metallurgiya: problema legirovaniya, model'nye otsenki effektivnosti* [Alternative metals: problem of alloying, model evaluation of the effectiveness]. Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnika, 2007, 440 p. (In Russ.).
74. Lisienko V.G., Shleimovich E.M., Ladygichev M.G. etc. *Temperatura: teoriya, praktika, eksperiment. Sprav. izd. v 3-kh tomakh. T.1, Kn. 1. Metody kontrolya temperatury* [Temperature: theory, practice, experiment: Ref. ed. in 3 vols. Vol. 1, Book.1. Temperature control methods]. Lisienko V.G. ed. Moscow: Teplotekhnika, 2010, 549 p. (In Russ.).
75. Vokhmyakov A.M., Kazyaev M.D., Kazyaev D.M. Arseev B.N., Ryaposov A.I. Complex modernization of the heating furnaces. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2009, no. 12, pp. 56-59. (In Russ.).
76. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kazyaev D.M., Ryaposov A.I., Spitchenko D.I. Modernization of tunnel furnace for heating of copper slabs under plastic deformation. *Tsvetnye metally*. 2011, no. 4, pp. 85–89. (In Russ.).
77. Vokhmyakov A.M., Kazyaev M.D., Kazyaev D.M. Chamber furnace with divided working space. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 9, pp. 30–33. (In Russ.).
78. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I. Complicated external heat exchange in the vertical chamber furnace designed for heat treatment of long products. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 667–671. (In Russ.).
79. Kazyaev M.D., Vokhmyakov A.M., Kiselev E.V., Spitchenko D.I., Kazyaev D.M. Effect of the structure of lining and type of fuel-burn devices on thermal performance of vertical chamber furnace. In: *Trudy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Energoberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti. Pechnye agregaty. Ekologiya", posvyashchennoi 150-letiyu velikogo russkogo metallurga V.E. Grum-Grzhimailo (15-17 oktyabrya 2014 g.)* [Proceedings of the VII International scientific-practical conference "energy Saving technologies in the industry. Furnace unit. Ecology", dedicated to the 150th anniversary of the great Russian Metallurgist V. E. Grum-Grzhimailo (15-17 October 2014)]. Moscow: MISiS, 2014, pp. 224–235. (In Russ.).
80. Druzhinin G.M., Bartash M.R., Leont'ev V.A., Martynov A.P. Methodological principles of modernization of constructions and modes of heating and thermal furnaces. In: *Sb. dokladov NTK "Metallurgicheskaya teplotekhnika kak osnova energo- i resursosberezheniya v metallurgii"* [Collection of reports NTK "Metallurgical heat engineering as the basis of energy- and resource-saving in metallurgy"]. Ekaterinburg: OAO "VNIIMT", 2010, pp. 44–49. (In Russ.).
81. Bartash M.R., Druzhinin G.M., Loshkarev N.B., Popov A.B. New high-speed regenerative gas burner for direct heating of metal in industrial furnaces. *Stal'*. 2010, no. 3, pp. 125–127. (In Russ.).
82. Distergelt I.M., Druzhinin G.M., Shcherbinin V.I., Savel'ev V.A., Zvonarev S.V., Petukhov V.B. Regenerative heating system for reheating furnaces of rolling and forging production (history of development, theory and practice). In: *Metallurgicheskaya teplotekhnika. Sbornik nauchnykh trudov Natsional'noi metallurgicheskoi akademii Ukrainy. Tom 5* [Collection of scientific papers of Na-

- tional metallurgical Academy of Ukraine. Vol. 5]. Dnepropetrovsk: NMetAU, 2002, pp. 44-57. (In Russ.).
83. Yaroshenko Yu.G., Lipunov Yu.I., Zakharchenko M.V., Eismondt K.Yu., Nekrasova E.V. Development of advanced thermo-strengthening technique for environmental problem solution in metallurgical industry. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 4, pp. 221–225. (In Russ.).
  84. Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Nekrasova E.V. Zakharchenko M.V., Yaroshenko Yu.G., Abramov E.V. Water-jet cooling in the thermal strengthening of asymmetric profiles. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 226–230.
  85. Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Yaroshenko Yu.G. Zakharchenko M.V., Nekrasova E.V. Thermal hardening of rail lining by jet water cooling. *Stal'*. 2014, no. 8, pp. 3–8. (In Russ.).
  86. Zhilyakov A.Yu., Lipunov Yu.I., Eismondt K.Yu., Yaroshenko Yu.G. Influence of the quenching technologies on the joint bar' microstructure. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 9, pp. 682–687. (In Russ.).
  87. Zainullin L.A., Karelin V.G., Artov D.A., Epishin A.Yu., Spirin N.A. Drying of coal by a solid heat-transfer medium. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 9-10, pp. 912–915.
  88. Zainullin L.A., Epishin A.Yu., Artov D.A., Karelin V.G., Spirin N.A. High-temperature carbothermal reduction of siderite ore in an electric arc. *Metallurgist*. 2017, vol. 60, no. 11-12, pp. 1135–1138.
  89. Ryazanov V.T., Khokhlov V.A., Shul'gin S.S., Oganessian Yu.M. Experience of modernization of stands for drying of the lining of ladles for pig iron transporting. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 39–41. (In Russ.).
  90. Mekhryakov D.V., Greznev V.G., Malei I.V., Petrov S.V., Fakhrutdinov M.Ya. Experience of modernization of metallization installations with MIDREX technology at Oskolsky Electrometallurgical Plant. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 25–27. (In Russ.).
  91. Podkovyrkin E.G., Korshunova N.G., Bakov A.V., Sovetkin V.L., Matyukhin V.I. Rotary-jet installations for heat treatment of charge materials of metallurgical processing. *Stal'*. 2015, no. 3, pp. 98–99. (In Russ.).

**Information about the authors:**

*Yu.G. Yaroshenko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair "Thermal Physics and Informatics in Metallurgy" (yury-y@planet-a.ru)*

Received April 12, 2017