

А.С. Нестеров, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. отделом, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>

А.Л. Чайка, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., зав. лаб., e-mail: chaykadp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>

Л.И. Гармаш, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: larysagar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (Днепр, Украина)

Отдел металлургии чугуна Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины. История и современность

В статье представлены приоритетные направления исследований и основные научные достижения отдела металлургии чугуна (ОМЧ) Института черной металлургии им. З.И. Некрасова НАН Украины (ИЧМ) начиная с момента его основания и до настоящего времени.

Основателем ОМЧ был академик Михаил Власович Луговцов. С помощью разработанной им статистической теории доменного процесса на основе положений теории теплового потока, методов математики, механики и физической химии были количественно описаны процессы доменной плавки.

Большой вклад в развитие теории и практики доменного производства внес академик Зот Ильич Некрасов. Направления интенсификации доменного процесса за счет использования природного газа, комбинированного дутья и вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), обоснования возможностей и строительство доменных печей большого объема, совершенствование сырьевой базы доменного производства предопределили пути развития отрасли на многие десятилетия и не утратили актуальности и сейчас.

Благодаря Зоту Ильичу в ИЧМ для проведения исследований была создана прекрасная лабораторная база, которая в то время не уступала лучшим мировым. Доменщики ОМЧ работали на всех крупнейших металлургических предприятиях СССР и внесли большой вклад в развитие многих направлений доменного производства. Результаты проводимых в отделе работ являлись базой для разработки новых технологий и материалов и способствовали укреплению авторитета советской металлургии в мире. В статье перечислены самые значимые разработки научных сотрудников ОМЧ в советский период.

Исследования, которые выполняются в отделе в настоящее время, развивают и расширяют эти направления с учетом требований к качеству конечного продукта и современных топливно-сырьевых условий, в которых работает металлургия Украины. На основе системного анализа процессов и перспектив развития доменного производства специалистами отдела разрабатываются рекомендации по повышению его эффективности и снижению ресурсо- и энергоемкости. Особое внимание уделяется вопросам продления кампании доменных печей, разработке технологий их стабильной работы в стационарных и нестационарных условиях плавки, совершенствованию технологии окомкования железорудного сырья и выплавки чугуна на основе управления металлургическими свойствами шихтовых материалов, в том числе, с высоким содержанием вторичных ресурсов, развитию и реализации научно-практических основ технологии эффективного применения ПУТ.

Ключевые слова: доменный процесс, комбинированное дутье, технология доменной плавки, доменные печи большого объема, вдувание пылеугольного топлива, качество железорудного сырья, продление кампании доменной печи.

Основателем и первым руководителем отдела металлургии чугуна Института черной металлургии был академик М.В. Луговцов, один из создателей статистической теории доменного процесса, которая количественно описывала процессы доменной плавки на основе положений теории теплового потока, методов математики, механики и физической химии. Под его руководством были заложены основополагающие принципы научной деятельности коллектива и начаты исследования, направленные на интенсификацию доменной плавки: обогащение дутья кислородом; разработка керченских руд; производство офлюсованного агломерата с пониженным содержанием мышьяка; роль магнезиальных шлаков в доменном процессе [1].

Большой вклад в развитие доменного производства внес многолетний руководитель Института черной металлургии и отдела металлургии чугуна

академик З.И. Некрасов. Под его руководством были определены не только основные научные направления исследований в области доменного производства, но и приоритетные направления развития отрасли на многие годы [2]:

– обоснование технической и экономической целесообразности и технологическое сопровождение строительства доменных печей большого объема, оснащение их современными средствами нагрева дутья, загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике;

– совершенствование сырьевой базы доменного производства, разработка требований к качеству железорудного сырья и кокса за счет совершенствования технологии спекания и формирования шихты;

– интенсификация доменной плавки на основе использования кислорода и природного газа (ПГ), развитие теоретических и технологических основ

комбинированного дутья с обогащением его кислородом и вдуванием в горн печи природного газа;

– научное обоснование применения в доменном производстве новых углеводородных ресурсов в качестве топливных добавок и заменителей кокса, разработка основ технологий доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива (ПУТ) и коксового газа;

– разработка технологии доменной плавки с применением кокса высокого качества;

– разработка технологии и реализация процесса производства офлюсованных углеродсодержащих железорудных брикетов как одного из шихтовых материалов для доменной плавки, реализация комплексной программы брикетирования железорудного сырья с учетом современных требований к показателям качества.

Одним из эффективных способов наращивания производства чугуна является увеличение объема и производительности доменных печей, а лимитирующими факторами при строительстве доменных печей большого объема является стойкость их холодильников, кладки и оборудования. Необходимо было научно обосновать возможность увеличения их полезного объема, разработать мероприятия по стабилизации технологического режима за счет оптимизации первичного шлакообразования и увеличения глубины окислительной зоны, стабилизации газораспределения на основе выбора рациональной программы загрузки. Для решения этих задач в ОМЧ были сформированы исследовательские группы, научное руководство которыми осуществлял З.И. Некрасов, а в их работе принимали активное участие В.Л. Покрышкин, Ф.Н. Москалина, О.М. Кудрявцев, В.В. Врублевский и др. Были получены очень важные результаты о характере распределения материалов на поверхности засыпи колошника с замером глубины воронки, толщины слоев железорудных материалов и кокса, закономерностях процессов восстановления оксидов железа в шахте печи и свойствах извлеченных с различных горизонтов печи шихтовых материалов.

В результате испытаний, проведенных при задувке самых крупных доменных печей СССР с целью установления научно-обоснованных условий обеспечения процессов плавки в сверхмощных доменных печах, было показано, что укрупнение агрегатов значительно ужесточает требования к управлению режимом плавки, и были разработаны меры по улучшению качества железорудных материалов и кокса, совершенствованию приемов использования комбинированного дутья, определены параметры распределения железорудных материалов и газа по диаметру колошника и в горне, разработаны принципиально новые технические решения шихтоподачи, загрузки, придоменной грануляции шлака, оснащения печей современными средствами нагрева дутья, загрузки и распределения шихтовых материалов на колошнике и др. [3].

Сотрудники ОМЧ принимали самое активное участие в проектировании, разработке технологии плавки, предпусковых испытаниях и запуске крупнейших в мире доменных печей Новолипецкого металлурги-

ческого комбината (НЛМК) объемом 2000 и 3200 м³, Западно-Сибирского металлургического комбината (ЗСМЗ) объемом 3000 м³, «Криворожстали» объемом 5000 м³, Череповецкого меткомбината объемом 5500 м³ [4]. Накопленный специалистами ОМЧ опыт по задувке и освоению сверхмощных доменных печей значительно расширил представление об особенностях их эксплуатации и позволил на практике подтвердить технологические и теоретические прогнозы об экономической целесообразности их строительства. Основные положения разработанной методики пусковых исследований доменных печей с небольшими усовершенствованиями применяются и в настоящее время.

Крупным проектом были начаты акад. М.В. Луговцовым и продолжены под руководством акад. З.И. Некрасова работы по изучению и организации эффективного использования руд Керченского месторождения, разработке технологии их обогащения и окускованиях, в которых активное участие принимали ведущие научные сотрудники ОМЧ – Н.И. Красавцев, И.Б. Страшников, П.А. Тащиенков, Н.А. Гладков, А.Г. Ульянов.

Комплексные исследования по определению рациональных способов использования руд Керченского месторождения, отличающихся сложным минералогическим составом и наличием мышьяка, показали возможность их обогащения промывкой с отсадкой и получением концентратов, содержащих 46–49 % железа с последующей их агломерацией. Исследования, включающие определение исходного состава извлекаемых руд, уровня их обогащения и качества получаемого концентрата, разработку технологии получения офлюсованного агломерата и его проплавку в доменных печах завода «Азовсталь», определение качества и пригодности выплавленного металла определили способы использования значительного количества коричневых руд по разработанной схеме с применением местного высококачественного известняка при проплавке такого агломерата в доменных печах в дозируемом количестве. Была доказана возможность получения железорудных концентратов с содержанием 50 % железа и разработаны эффективные способы снижения содержания мышьяка в процессе обогащения руд и агломерации их концентратов, освоена технология производства офлюсованного агломерата заданного качества и проплавка его в доменных печах в определенном количестве, не приводящем к снижению его качества [5].

В середине прошлого века на предприятиях отрасли началось широкое внедрение способа использования в доменной плавке природного газа совместно с обогащением дутья кислородом. Возможность сокращения расхода кокса подачей в горн углеродсодержащих материалов была подтверждена результатами теоретических и экспериментальных исследований фурменной зоны, поведения газов в периферийной области и промышленных опробований приемов подачи колошниковой пыли и других материалов в шахту и фурмы доменной печи. Для стабилизации теплового состояния горна было

предложено совместно с природным газом подавать обогащенное кислородом дутье. Были установлены закономерности изменения основных характеристик доменного процесса: степени прямого восстановления; тепловых затрат; развития процессов термической диссоциации углеводородов; кинетической энергии дутья, оптимизация которой обеспечивает необходимый уровень обработки центральной части горна, нормальную отработку продуктов плавки, стабилизацию периферийного потока, ограничение развития термической диссоциации углеводородов и др. [6].

Результаты фундаментальных научных исследований легли в основу принципиально новых технологических решений, не имеющих аналогов в мировой практике, и были реализованы на предприятиях Украины и мира с высоким экономическим эффектом. За широкое внедрение природного газа в доменном производстве академик АН УССР З.И. Некрасов и кандидат технических наук Н.И. Красавцев в 1960 г. стали лауреатами Ленинской премии.

Одновременно с разработкой высокопроизводительной и экономичной технологии доменной плавки на комбинированном дутье в ОМЧ проводились исследования по улучшению качества железорудного сырья. На лабораторной базе отдела были выполнены обширные исследования по отработке технологии спекания высококачественного офлюсованного агломерата. Всесторонняя расчетно-аналитическая оценка эффективности более глубокого обогащения руд с содержанием железа в концентратах не ниже 65 % показала хорошие перспективы по увеличению производительности, снижению расхода кокса и экономической эффективности применения высокообогащенного агломерата в доменном производстве. Результаты опытно-промышленной плавки показали, что повышение содержания железа в железорудной части шихты на 4 % приводит к увеличению производительности на 2,5–3 % и снижению расхода кокса на 2,2–2,5 % на каждый дополнительный процент железа в шихте.

Направление форсированного ведения доменной плавки за счет внедрения комбинированного дутья, обогащенного кислородом в сочетании с углеводородами, при небольших капитальных затратах показывало высокую эффективность, но имело и недостатки – по мере снижения расхода кокса ухудшалась управляемость печей по газодинамике, а форсированный ход печей сокращал длительность их кампании. Направление, обеспечивающее высокопроизводительную экономичную работу доменных печей за счет проплавки высокообогащенного железорудного сырья, выигрывало в сравнении с технологией доменной плавки на комбинированном дутье, но требовало очень больших капитальных затрат. В результате руководящими органами страны было принято решение поручить ИЧМ расширить научную тематику, обеспечивающую разработку технологии доменной плавки на комбинированном дутье высоких параметров. Освоение этой технологии осуществлялось в несколько этапов на разных металлургических заво-

дах и в разных технологических и сырьевых условиях работы доменных печей. Исследования под руководством З.И. Некрасова проводили Ф.Н. Москалина, М.Д. Жембус, П.Я. Мухин, Э.Я. Аксенич, Э.С. Хомяков, М.Т. Бузуверя, Н.М. Можаренко и др.

Технология доменной плавки с использованием природного газа, реализованная на доменной печи завода им. Петровского, позволила снизить расход кокса на 10–16 % и повысить производительность печи на 3–5 %; технология повышения давления газа на колошнике, впервые опробованная на заводе им. Дзержинского, в дальнейшем была освоена на 50 отечественных печах, на которых выплавлялось около 70 % общесоюзного чугуна; технология интенсификации доменной плавки с применением комбинированного дутья кислорода (до 24–25 %) и природного газа, внедренная на доменной печи № 12 завода им. Дзержинского, позволила увеличить производительность печи на 9,9 %, а расход кокса снизить на 19,7 %.

В опытных плавках на меткомбинате «Криворожсталь» в 1960-х годах степень обогащения дутья кислородом впервые достигла 30 % при устойчивой работе печи. Каждый процент увеличения содержания кислорода в дутье приводил к приросту производства 1,9 %, а коэффициент замены кокса природным газом приближался к 0,9 кг/м³. В условиях Новолипецкого металлургического завода в 1970-х степень обогащения дутья кислородом достигла 35 %, на 1 % дополнительного кислорода прирост производства составлял 1,9–2 %, коэффициент снижения расхода кокса на 1 м³ природного газа составил 0,91 кг/м³. А в 1980-х в этом же цехе были проведены плавки с содержанием кислорода 40 %. Эти результаты стали определяющими для повышения производительности и экономичности работы доменных цехов страны на долгое время. Разработка мероприятий по совершенствованию режимов работы оборудования доменных печей № 5 и 6 Нижнетагильского металлургического комбината (НТМК), работающих на дутье, обогащенном до 30 % кислорода, обеспечили годовой экономический эффект в сумме около 390 тысяч рублей.

Несмотря на высокую эффективность доменной плавки на комбинированном дутье, ведущие специалисты хорошо понимали, что запасы природного газа не безграничны, поэтому доменщики ОМЧ одними из первых в отрасли стали развивать перспективные коксозамещающие технологии. Дальнейшим развитием технологии комбинированного дутья стали исследования по использованию в доменной плавке углеводородных заменителей природного газа – коксового газа. Результаты опытных плавок с его применением на «Запорожстали» и Макеевском металлургическом заводе подтвердили высокую эффективность и перспективность этой технологии, которая позволяла получить экономию кокса 6–7 % и увеличение производительности печей на 5 %. Особенно актуальным это направление стало во времена ограничения поставок природного газа и роста его стоимости.

В 1966 году на заводе «Запорожсталь» была построена разработанная по технологическому заданию ИЧМ и проекту Укргипромеца первая в Украине установка для дувания пылеугольного топлива в горн доменной печи № 3 объемом 1300 м³ (инициатором и руководителем этих разработок был академик З.И. Некрасов) [7]. Однако, из-за низкого качества шихтовых материалов, отсутствия надлежащей угольной базы, необходимого помольного оборудования в то время технология не получила должного развития.

Перспективные исследования ИЧМ были направлены на автоматизацию технологического процесса доменной плавки, повышение надежности и сроков службы агрегатов и оборудования, создание новых технологических решений, предусматривающих резкое сокращение расхода кокса и энергосбережение. Разрабатывается технология доменной плавки с применением горячих восстановительных газов, полученных из низкосортных углей, направленная на сокращение расхода кокса в 2–3 раза с последующим переходом к бескоксовому получению жидкого металла в шахтной печи.

В 80-е годы под руководством З.И. Некрасова в ИЧМ были начаты комплексные исследования по перспективному инновационному направлению – разработка основных положений и освоение в опытно-промышленных условиях процесса производства нового вида металлургического сырья – офлюсованных углеродсодержащих брикетов из частично восстановленных богатых железорудных концентратов и разработка технологии доменной плавки с их использованием. Было доказано, что восстановление окислов железа на подготовительной стадии доменной плавки позволит существенно увеличить производительность печей.

Теоретической основой создания брикетов стали физические и кристаллохимические особенности низшего окисла железа – вюстита Fe_xO. Способ окискования включал предварительный нагрев материала с последующим формированием брикетов за счет наложения давления при температурах 800–850 °С. Условия подготовки железорудных концентратов, формирования брикетов и особенности их структуры позволяли вводить в их состав флюсующие и углеродсодержащие добавки [8]. Теоретические и экспериментальные исследования структуры и пластических свойств оксидов железа и твердых растворов на их основе, закономерностей уплотнения материалов, отработка технологических режимов получения брикетов на лабораторных установках, изучение их поведения при нагреве и восстановлении позволили изготовить в экспериментально-производственных мастерских ИЧМ экспериментальные установки для нагрева и восстановления железорудных концентратов и валковый брикетный пресс производительностью 2 т/ч. На них были отработаны параметры технологии, получены представительные опытные партии брикетов и всесторонне изучены их металлургические свойства. Результаты исследования металлургических свойств частично брикетированной

угольной шихты (при работе на коксе с долей брикетов 18,1 %) и опытно-промышленных и промышленных плавков на доменных печах «Криворожстали» показали улучшение показателей работы доменных печей – расход кокса 509 кг/т чугуна, удельная производительность 1,71 т/сут.

И хотя промышленные партии брикетов не были получены, поскольку опытно-промышленную установку Северного горнообогатительного комбината (СевГОКа) не удалось вывести на проектные технологические режимы, разработанные в ходе выполнения проекта, научные положения и созданные брикетные прессы получили дальнейшее развитие и нашли широкое применение при брикетировании различных материалов и отходов металлургического производства. Разработанная технология стала базой для дальнейших работ в этом направлении, которые успешно ведутся в ИЧМ в настоящее время.

Высокий научный уровень работ отдела всегда обеспечивался самым современным исследовательским оборудованием. В советские годы отдел металлургии чугуна располагал комплексом лабораторного оборудования, не уступавшим лучшим зарубежным институтам. Для определения состояния и структурных параметров, обуславливающих металлургические свойства и технологическую ценность сырья и продуктов доменной плавки, в ОМЧ использовались установки для высокотемпературных исследований, включающие оборудование для определения реакционной способности кокса, восстановимости железорудных материалов, их размягчения и плавкости (плавильный микроскоп, вискозиметры, устройства измерения поверхностных свойств жидких оксидных расплавов), а также такое уникальное оборудование, как электронные микроскопы, высокотемпературный дилатометр, инфракрасный спектрометр, рентгеноспектральные микроанализаторы (микрозонды). Специалисты ОМЧ одними из первых в отрасли начали широко применять для изучения металлургических процессов и материалов методы инфракрасной спектроскопии, рентгеновского микроанализа, γ-резонансной (мессбауэровской) спектроскопии, дифференциально-термического анализа, магнитного анализа энергетического состояния шихтовых материалов, физико-химические методы определения адсорбции и десорбции инертных и восстановительных газов на железорудных материалах и коксе, характера распределения в них пористости, определения равновесных условий взаимодействия газов и оксидов железа и др.

Для изучения металлургических свойств сырья в соответствии с действующими и разрабатываемыми ГОСТами на экспериментальном производстве ИЧМ были разработаны и изготовлены:

– модифицированная установка Линдера с комплексом газогенераторов с системой управления, регистрирующей аппаратурой, устройствами взвешивания, отсева, калибровки для определения поведения железорудных материалов в «сухой» зоне доменной печи;

– установки для исследования процессов агрегатных

превращений материалов в восстановительной среде под нагрузкой с системой управления и фиксации параметров изменения состояния материалов;

– установки изучения высокотемпературных устройств на базе печей Таммана, позволявшие исследовать закономерности глубоких превращений сырьевых материалов доменной плавки при высоких температурах;

– комплекс барабанов, в том числе для испытания по отечественному ГОСТу и японскому стандарту для определения механических характеристик сырья.

Использование самого современного оборудования и методик позволяло проводить уникальные эксперименты, моделирующие различные процессы в таком сложном агрегате, как доменная печь, изучать и прогнозировать свойства железорудных материалов и продуктов плавки. Результаты этих экспериментов в дальнейшем использовались при планировании и проведении опытных плавов уже в промышленных условиях. Кроме того, пущенная в 1974 г. доменная печь № 9 завода «Криворожсталь» была серьезно оснащена не только новым технологическим оборудованием и автоматизированными системами, но и исследовательским оборудованием, позволявшим изучать развитие процессов плавки на различных горизонтах шахты и в горне печи, что позволяло по результатам экспериментов оперативно корректировать или изменять соответствующие параметры технологического режима [9].

Институт черной металлургии долгие годы был головной научной организацией по многим направлениям в системе Министерства черной металлургии СССР, в том числе и по аглодоменному производству. Большой вклад в развитие как фундаментальных теоретических основ доменного процесса, так и в реализацию их на практике при строительстве и реконструкции крупнейших доменных печей и агломерационных фабрик внесли ведущие научные сотрудники: Большаков В.И., Можаренко Н.М., Товаровский И.Г., Ульянов А.Г., Бузуверя М.Т., Москалина Ф.Н., Гладков Н.А., Жембус М.Д., Бородулин А.В., Джигота А.Д., Гребенкин Н.А., Ободан Я.М., Гаврилов Е.Е., Приходько Ю.А. и многие другие.

Крупным ученым-практиком в области агломерационного производства был один из научных руководителей отдела канд. техн. наук А.Г. Ульянов. Он занимался исследованиями по подготовке сырья к доменной плавке; повышению эффективности агломерационного производства за счет оптимизации свойств агломерационного и доменного возврата; снижению потерь чугуна со шлаком; сокращению расхода кокса на выплавку чугуна за счет оптимизации состава шлака и улучшения его свойств для доменных печей, проплавляющих 100 % агломерата с использованием флюсующих магнезиальных добавок; применению золы горючих сланцев в шихте для получения окатышей и др.

Д-р техн. наук А.В. Бородулин исследовал системные аспекты управления энергетическими ресурсами (твердым, жидким, газообразным топливом, нагретым дутьем, кислородом, азотом, водой и паром

для охлаждения агрегатов) при производстве чугуна и ферросплавов в доменных цехах и на предприятиях полного металлургического цикла. В своих работах он продолжал развивать энергетическую теорию И.Д. Семикина, разработал уникальную теплоэнергетическую модель доменной плавки. Многолетние экспериментальные исследования тепловой работы системы охлаждения доменных печей внесли существенный вклад в понимание тепловых процессов периферийной зоны доменной печи и привели к разработке оригинальных технических решений в области энергосбережения [10].

Научная деятельность д-ра техн. наук И.Г. Товаровского посвящена системному анализу доменной плавки на основе аналитических и экспериментальных исследований с использованием математического моделирования; проблемам коксосбережения в доменной плавке; разработке теоретических основ малококсовых и бескоксовых доменных плавов и нетрадиционных металлургических технологий на основе использования продуктов газификации низкосортных углей. На основании результатов этих исследований установлена принципиальная возможность полной замены кокса продуктами газификации углей при эволюционной перестройке доменной печи на шахтно-горновой агрегат бескоксового получения первичного металла. Разработанная им методика многозонного расчета показателей и процессов доменной плавки позволяет описывать закономерности протекания процессов в различных режимах и определять пути их совершенствования [11].

Большое внимание в отделе всегда уделялось исследованию качества железорудного сырья и кокса как важнейших факторов, определяющих интенсивность и экономичность доменной плавки. Для изучения поведения материалов в различных зонах доменной печи и прогнозирования на этой основе параметров доменной плавки, исследования качества железорудных материалов и кокса в ОМЧ была создана хорошо оборудованная лаборатория физико-химических процессов плавки, которую возглавлял канд. техн. наук Н.А. Гладков. Под его руководством была разработана методика комплексной оценки, включающая моделирование поведения железорудных материалов в сухой зоне доменной печи, в зоне размягчения-плавления и капельного течения и расчетно-аналитический эксперимент [12]. Изучение процессов формирования и отделения жидких фаз из размягченного слоя железорудных материалов, закономерностей образования первичных, промежуточных и металлоуглеродистых расплавов позволили сформулировать требования к высокотемпературным свойствам железорудных материалов и разработать качественные показатели агломератов, окатышей и руд.

Широкий круг очень важных для доменного производства вопросов включали исследования, проводившиеся под руководством канд. техн. наук Н.М. Можаренко: повышение эксплуатационной надежности и увеличение межремонтных кампаний доменных печей; разработка технологий получения и

применения в доменной плавке жидких и газообразных заменителей кокса; теоретическое обоснование процесса выплавки низкокремнистого чугуна; подготовка и технологическое сопровождение задувок и выдувок доменных печей; влияние восстановления железорудной шихты и науглероживания чугуна на характер движения материалов в доменной печи; изучение состава и свойств гарнисажа; особенности технологии доменной плавки с вдуванием ПУТ и др. [13].

В 1990–2000 г. деятельность Института проходила в сложных условиях, вызванных изменением структуры и сокращением объемов производства в черной металлургии. После развала СССР в Украине осталось более двух третей его научного потенциала в металлургии, однако была полностью разрушена отраслевая система координации и финансирования научных исследований, что привело к существенно уменьшению их объема, снижению количества внедряемых в производство научных разработок и отрицательно сказалось на престижности научной работы. Промышленные предприятия продолжали работать по технологиям, созданным в прежние годы, упор делался на поддержание оборудования в рабочем состоянии с минимальной модернизацией. Такая ситуация неизбежно вела к снижению конкурентоспособности продукции горно-металлургического комплекса (ГМК), поэтому в 1995 г. была принята «Концепция развития горно-металлургического комплекса Украины до 2010 г.», а в 2004 г. – «Государственная программа развития и реформирования горно-металлургического комплекса Украины до 2011 г.», в подготовке которых доменщики ИЧМ принимали самое активное участие.

После возвращения ИЧМ в 1992 г. в систему НАН Украины тематика исследований отдела кардинально не изменилась, но большее значение стало придаваться их научной составляющей. К концу XX века положения классической теории доменного процесса требовали дальнейшего развития, глубокой корректировки и осмысления в соответствии с накопленными новыми знаниями и существенно меняющимися топливно-сырьевыми условиями. Наряду с производительностью главными показателями эффективности становятся ресурс- и энергосбережение. Наблюдаются устойчивые тенденции к сокращению потребления природного газа, что с неизбежностью приводит к возобновлению работ по вдуванию коксового газа и, особенно, пылеугольного топлива. Развитие компьютерной техники и совершенствование математических методов позволяет разрабатывать все более сложные модели доменного процесса и совершенствовать системы мониторинга и контроля, что, в свою очередь, позволяет получать более точные представления о протекающих в доменной печи сложных физико-химических процессах.

В этот период в отделе впервые выполнен комплексный анализ современного уровня доменной плавки в печах разного объема и разработана технология использования альтернативных топливовосстановительных добавок с учетом уменьшения за-

трат кокса до технологически возможного значения 300–200 кг/т чугуна (В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Н.М. Можаренко).

Создана отраслевая система анализа работы доменных печей на основе компьютерной обработки параметров работы доменных печей, расчета комплексных показателей доменной плавки и материально-тепловых балансов с оценкой погрешностей измерений и их дальнейшей корректировки. Проведен комплекс аналитических и экспериментальных исследований возможности организации бескоксового получения металла в шахтно-горновом агрегате (Товаровский И.Г.).

Разработаны положения концепции управления энергоресурсами в доменном производстве. Экономическая эффективность доменной плавки в значительной степени определяется ценой на энергоносители, поэтому анализ структуры энергопотребления доменного производства и поиски путей его совершенствования становятся все более актуальными (Н.М. Можаренко, А.В. Бородулин).

Разработана новая для теории доменного процесса система критериев, которые количественно определяют влияние качества и свойств железорудных материалов и кокса, параметров режимов загрузки шихтовых материалов, энергетического потенциала режима дутья, степени использования тепла в доменной печи, равномерности и интенсивности схода шихты на качество чугуна и эффективность доменной плавки (В.И. Большаков, Н.А. Гладков, Ф.М. Шутылев).

Разработаны теоретические положения процесса выплавки низкокремнистого чугуна. Опытные плавки, проведенные на крупнейшей доменной печи № 5 Череповецкого металлургического комбината (ЧерМК), показали экономию кокса 5–6 кг на тонну чугуна при снижении содержания кремния на 0,1 % (Н.М. Можаренко).

Дальнейшее развитие получила технология плавки на комбинированном дутье с вдуванием колошникового газа вместо природного, позволившая снизить расход условного топлива и обеспечить ровный ход плавки, за счет управления температурным уровнем (М.Т. Бузоверя, Н.М. Можаренко).

Были завершены разработки и проведены стендовые испытания новых технических решений по вдуванию в доменную печь продуктов газификации низкосортных углей. Испытания прифурменного реактора-газификатора пылеугольного топлива на стенде и на плавильном циклоне завода им. Петровского показали возможность стабильного получения восстановительного газа с температурой 1900–2000 °С. На комбинате «Запорожсталь» продолжались исследования по оптимизации параметров комбинированного дутья, использованию колошникового газа в качестве активатора горения и заменителя природного газа, освоению технологии работы доменных печей на низкокислотном агломерате.

Опираясь на серьезный научный фундамент и разработки предыдущих поколений, отдел металлургии чугуна по-прежнему является одним из ключевых

научных подразделений ИЧМ и проводит исследования в самых злободневных для металлургии Украины направлениях с учетом тенденций развития мирового доменного производства с целью повышения эффективности доменного производства, обеспечения высокого качества чугуна, оптимизации расходов сырья и топлива и повышения ресурса доменных печей за счет улучшения их эксплуатационной стойкости и совершенствования доменного производства на основе разработки эффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий плавки.

Среди приоритетных направлений исследований, которые ведутся в отделе в настоящее время:

1. Системный анализ процессов и перспектив развития доменного производства в Украине. Специалистами отдела по заказу предприятий ГМК Украины разрабатываются рекомендации по повышению эффективности аглодоменного производства и снижению его ресурсо- и энергоемкости в существенно меняющихся в последнее время топливно-сырьевых условиях Украины. Сотрудники ОМЧ принимают участие в различных отраслевых совещаниях и конференциях, готовят аналитические справки и экспертные заключения по запросу органов государственной власти и металлургических холдингов.

2. Развитие научных представлений о физико-химических процессах, происходящих в доменной печи; разработка технологических предпосылок их стабильной работы в существующих топливно-сырьевых условиях, в стационарных и нестационарных условиях плавки (выдувка и задувка), технологическое сопровождение вывода доменных печей на нормальный устойчивый режим при глубоких расстройках их хода; разработка энергосберегающих технологий выплавки низкремнистых чугунов; развитие научных основ механизмов формирования устойчивого защитного гарнисажа.

3. Совершенствование технологии окомкования железорудного сырья и выплавки чугуна на основе управления металлургическими свойствами шихтовых материалов, в том числе с высоким содержанием вторичных ресурсов; разработка приемов оптимизации металлургической ценности шихты для обеспечения требуемого качества чугуна. Определение показателей спекания и качества окускованного материалов в исходном состоянии и при восстановительно-тепловой обработке, моделирование их поведения в процессе доменной плавки.

4. Развитие и реализация научно-практических основ технологии доменной плавки с использованием пылеугольного топлива. Научное обоснование и разработка технологических приемов эффективного применения ПУТ.

5. Развитие положений нетрадиционных малококсовых и бескоксовых технологий доменной плавки.

6. Разработка технологических мероприятий по продлению кампании доменной печи. Анализ причин и механизмов износа футеровки горна и лещади доменной печи, выдача рекомендаций по повышению их стойкости.

7. Разработка технологических решений по

улучшению экологического состояния на металлургических предприятиях Украины.

8. Разработка и внедрение систем автоматизированного контроля профиля, теплового состояния, разгара футеровки в шахте и горне, тепловых потерь и расхода кокса на их покрытие и расчетных теплогазодинамических моделей различных зон доменной печи. Получаемая с их помощью информация используется для обоснования и принятия стратегических решений и оперативных мер по выбору рациональных режимов плавки, обеспечивающих требуемый уровень производительности и экономичности в условиях применения технологии вдувания ПУТ при сохранении ресурса и обеспечении безаварийности эксплуатации доменной печи.

В условиях дефицита и удорожания качественного сырья и топлива, вовлечения в работу их новых видов, существенное изменение состава и свойств железорудного сырья (ЖРС) оказывает серьезное влияние на технологию доменной плавки, качество выплавляемого металла и ресурс работы доменных печей. Исследования по изучению металлургических свойств ЖРС и их влияния на параметры доменной плавки остаются одним из приоритетных научных направлений отдела.

Продолжаются работы по повышению эффективности вовлечения вторичных ресурсов в аглодоменное производство. Главными факторами, ограничивающими их использование, являются повышенное количество вредных элементов, пониженное содержание Fe в шихте и нестабильность ее химического состава, агрессивность расплавов по отношению к футеровке доменной печи и загромождение коксовой насадки из-за повышенной вязкости шлаков [14]. Несмотря на все эти отрицательные моменты, в последние годы степень их вовлечения в аглодоменное производство возрастает, поэтому в отделе разработан алгоритм оперативного определения их рационального состава и количества с учетом предельно допустимых норм содержания вредных элементов для получения чугуна заданного качества, который сводится к решению следующих задач:

– определение разности между предельно допустимым содержанием вредных и сопутствующих элементов в чугуне, которое задается техническими условиями, и их содержанием в минеральном сырье (кокс, окатыши, концентраты и аглоруды);

– оценка влияния расхода вторичных ресурсов на производительность доменных печей (учет снижения $Fe_{\text{общ}}$ в шихте за счет увеличения SiO_2);

– оценка влияния количества шлако-скраповой смеси на производительность аглопроизводства;

– разработка режимов загрузки железорудных материалов, исключающих контакт вторичных ресурсов с футеровкой доменной печи, и режимов промывки горна от флюсовых загромождений и коксового мусора.

С помощью высокотемпературной методики ИЧМ изучаются закономерности процессов, протекающих в аглошихте с повышенным содержанием техногенных отходов, что позволяет прогнозировать наиболее

перспективные способы их использования. Опыты по восстановлению и проплавке смесей конвертерного шлака с агломератом, окатышами и кусковой рудой в лабораторных условиях показали, что до температур 1450–1500 °С наличие конвертерного шлака в смеси способствует сохранению повышенного содержания FeO в первичном шлаковом расплаве (12–20 %). Содержание углерода в образовавшемся металлическом расплаве не превышает 1,8–2,2 % [15]. Попадание в горн доменной печи концентрированных масс малоуглеродистого расплава несет в себе основную угрозу для футеровки, для устранения которой разработаны приемы промывки горна от флюсовых трудно растворимых образований и коксового мусора за счет направленной концентрации смеси кусковой руды и конвертерного шлака в определенных зонах колошника при исключении сосредоточения агрессивных расплавов в пристеночной зоне доменной печи.

Изучены и проранжированы по эффективности более 10 видов составов материалов для промывок доменных печей от коксового мусора и флюсовых расплавов и определены рациональные составы промывочных подач.

Исследования показали, что одним из эффективных приемов повышения степени вовлечения вторичных ресурсов в аглодоменное производство является брикетирование. Реализация рекомендаций по замене части металлургических отходов гранулами, полученными путем окомкования отсева окатышей, шлама и колошниковой пыли, позволила в условиях одного из меткомбинатов Украины сократить вынос колошниковой пыли на 4,3 кг/т чугуна и уменьшить расход кокса на 4,6 кг/т чугуна. Использование гранулированной углеродсодержащей пыли при сохранении качества агломерата позволяет заменить до 20 % дефицитного аглотоплива, уменьшив расход традиционного агломерационного топлива в среднем на 8,8 кг/т чугуна [16].

В последние десятилетия в мировом доменном производстве наблюдается тенденция использования железорудного сырья с содержанием SiO₂ в шихте менее 5 %, поскольку одним из наиболее эффективных резервов сокращения затрат на выплавку чугуна является уменьшение выхода шлака. При переходе к малошлаковой технологии (выход шлака 200–240 кг/т чугуна) сокращается расход условного топлива. Содержание кремния в чугуне, как правило, не превышает 0,45 %.

Результаты проведенных ранее исследований перспективности реализации в условиях Украины комплексной технологии выплавки низкокремнистого чугуна и его использования в сталеплавильном производстве показали, что при уменьшении содержания кремния в чугуне на 0,1 % выход годного повышается на 0,20–0,24 %, расход кокса уменьшается на 5 кг/т чугуна, расход чугуна в кислородно-конвертерной плавке увеличивается на 5,4 кг/т стали, а лома сокращается на 8,5 кг/т стали.

Исследования свойств шлаковых и металлических расплавов в доменной плавке при использовании железорудных материалов с содержанием SiO₂ в

диапазонах 2,8–4,2 % показали, что происходит это, с одной стороны, за счет улучшения поведения низкокремнистого железорудного сырья в высокотемпературной зоне доменной печи, в частности, увеличения температуры полной потери газопроницаемости железорудного слоя (расширение сухой зоны), с другой – за счет снижения выхода шлака. Использование в железорудной части доменной шихты 30–35 % низкокремнистых окатышей позволяет снизить основность агломерата в среднем на 0,15 ед., что положительно отражается на стадии подготовки флюса к агломерационному процессу, повышает качество агломерата и устойчивость технологического процесса за счет того, что значения высокотемпературных свойств агломерата и окатышей выравниваются.

Однако переход на технологию малошлаковой плавки наряду с положительными моментами может привести к определенным проблемам:

- ухудшается устойчивость доменной плавки – за счет сокращения выхода шлака снижается теплосодержание расплава в горне доменной печи, что требует повышения качества кокса;

- усложняется самоочистление коксовой насадки из-за уменьшения количества первичного шлакового расплава и снижения содержания в нем FeO в среднем на 6–10 %, активизируются периферийные потоки расплава в горне;

- происходит качественное изменение гарнисажа в околофурменной зоне – снижение его толщины и увеличение рыхлости структуры.

Анализ результатов комплексных расчетно-аналитических, лабораторных и промышленных исследований по стабилизации теплового состояния низа доменной печи и предотвращению негативных последствий из-за ухудшения качества шихтовых материалов или нарушения работы оборудования позволили определить требования к качеству кокса. Для условий малошлаковой магнезиальной плавки показатель горячей прочности кокса (CSR) должен быть не ниже 55 %. Работа доменных печей с низким выходом шлака при нестабильном низком качестве кокса (CSR ≤ 50 %) вызывает необходимость поддерживать завышенные газодутьевые параметры, обеспечивающие температуры чугуна и шлака в пределах 1490–1520 °С и 1520–1580 °С соответственно и проводить профилактические промывки горна доменной печи от флюсовых добавок.

Один из самых перспективных путей уменьшения энергоемкости доменной плавки в настоящее время – технология вдувания пылеугольного топлива (ПУТ), позволяющая заменить природный газ более дешевыми смесями углей и существенно сократить расход кокса в доменном процессе. Однако при реализации этой технологии предприятия столкнулись с серьезными проблемами, приводящими к существенному уменьшению ресурса работы доменных печей. Для установления и устранения причин этих явлений сотрудниками ОМЧ проводятся комплексные исследования по разработке и научному обоснованию эффективных направлений подготовки и перехода доменных печей Украины к освоению технологии доменной плавки с ПУТ.

При реализации технологии ПУТ резко повышаются требования к качеству сырья и кокса. Несмотря на успехи в подготовке ПУТ к доменной плавке, совершенствование узлов ввода и технологии его сжигания, часть его в пределах фурменной зоны сгорает не полностью. Содержание углерода в частично сгоревшем топливе может оставаться на уровне 5–15 %, что совместно с золой пылеугольного топлива составляет 15–20 % от массы вдуваемой пыли. Основная часть несгоревшего пылеугольного топлива выносится под вязко-пластичную зону (по сечению печи) в район среза фурменного очага, ухудшая дренажную способность горна [17].

Анализ поведения различных типов сырья показал, что переход от технологии доменной плавки с использованием природного газа (ПГ) на технологию с использованием ПУТ приводит к увеличению выхода шлака и частичному изменению его физико-химических свойств, в частности, значительно усиливается гетерогенность расплава. При вводе 4–7 % частично сгоревшего ПУТ вязкость промежуточных и конечных шлаков увеличивается на 8–15 %, повышая вероятность загромождения горна неплавкими массами, увеличивая приход щелочных элементов и серы и содержание оксида алюминия, что также ухудшает дренажные свойства расплава.

Высокотемпературные исследования поведения различных ЖРС в условиях работы доменных печей одного из предприятий холдинга «Метинвест» с использованием ПУТ в количестве 80–120 кг/т чугуна на стадии отработки технологии позволили разработать технологические рекомендации по улучшению качества агломерата (на основе определения рационального соотношения компонентов в аглошихте и замене части отходов гранулами), по регламенту загрузок марганецсодержащих материалов и мягких промывок доменных печей с помощью низкоосновного сырья. Их реализация позволила сократить количество сгоревших фурм, уменьшить расход кокса, снизить вынос колошниковой пыли и увеличить количество вдуваемого ПУТ без негативных последствий.

В ОМЧ разработаны и реализованы на доменных печах Украины системы автоматизированного контроля тепловых потерь и расхода кокса на их компенсацию, разгара футеровки и показателей тепловой работы доменных печей. Установлены закономерности изменения тепловых потерь, разрушения футеровки, образования гарнисажа, отклонений в тепловом режиме доменной печи в зависимости от конструкции ее системы охлаждения, свойств огнеупоров футеровки и технологии ведения доменной плавки [18].

Переход на технологию вдувания ПУТ приводит к серьезным изменениям не только в сырьевом, но и в энергетическом балансе предприятий. В лаборатории теплотехники и энергосберегающих технологий ОМЧ продолжает развиваться новое научное направление в области доменного производства – системная надежность, основной задачей которой является поиск формализованными методами и на основании опытных плавок компромиссных решений, обеспечи-

вающих требуемый объем выплавки чугуна заданного качества, минимальный расход энергетических ресурсов и высокую техническую надежность работы доменной печи и агрегатов ее обслуживающих при минимальном вредном воздействии на окружающую среду [19].

На основе анализа тепло-газодинамического режима работы доменных печей различного объема, работающих в различных дутьевых и шихтовых условиях, установлены закономерности и уточнен метод расчета тепло-газодинамической работы фурменной зоны доменной печи при вдувании в горн ПУТ на основании учета его химического состава. Определены закономерности кинетики горения ПУТ в фурменной зоне доменной печи и показано, что более полному сжиганию ПУТ способствует совместное вдувание природного газа и ПУТ. Обобщающим показателем стабильной тепло-газодинамической работы в рабочем пространстве печи является скорость газового потока, которая зависит от граничных условий – скорости дутья и газа при выходе из шихты. Определяющее воздействие на величину потерь давления в свободной от шихты области колошника оказывает отношение площади колошника к площади газоотводов и скорость газового потока при выходе из шихты [20].

Разработан метод расчета, позволяющий качественно и количественно оценивать время полного сгорания и перемещение от горелки угольной частицы в фурменном очаге при изменении дутьевых параметров (температура, расход и скорость дутья), параметров ПУТ (фракционный состав и содержание летучих) и расхода природного газа.

Жесткие требования к качеству чугуна, его химсоставу и температуре предъявляет сталеплавильное производство. Сотрудниками лаборатории теплотехники и энергосберегающих технологий отдела металлургии чугуна совместно со специалистами отдела металлургии стали ИЧМ разработан и реализован метод расчета полного энергетического баланса производства стали в технологическом комплексе «доменный цех – кислородно-конвертерный цех», включающий материальный, тепловой и эксергетический балансы на основе совместного взаимосвязанного учета материальных, теплоэнергетических и эксергетических потоков в доменной печи и кислородном конвертере при вдувании ПУТ различного химического состава [21].

Определены закономерности влияния содержания кремния в чугуне и его температуры на распределение эксергетических потоков и экологических показателей в системе «доменная печь – кислородный конвертер». Установлено, что уменьшение содержания кремния в чугуне на 0,1 % (не вызывающее расстройств тепловой работы печи), положительно влияет на энергоемкость и экологические показатели производства стали, при этом уменьшаются затраты подводимой эксергии и суммарных потерь эксергии, увеличивается эксергетический и технологический коэффициент полезного действия (КПД), уменьшается показатель ресурсоемкости и увеличивается коэффициент экологичности. А увеличение

температуры чугуна в доменной печи на 30 °С приводит к уменьшению затрат подводимой эксергии и суммарных потерь эксергии. Рациональная технология применения ПУТ, уменьшение содержания кремния в чугуне и увеличение его температуры позволяет увеличивать эксергетические КПД, уменьшать эксергетические потери и улучшать экологические показатели.

Уточнены закономерности, обоснована целесообразность и дана количественная оценка влияния предварительного подогрева ПУТ перед его подачей в доменную печь и вдувания пылевидных окислов железа на показатели тепловой работы печи. Предложены рациональные режимы совместного вдувания в горн доменных печей предварительно нагретого до 400 °С ПУТ, пылевидных окислов железа (до 250 кг/т чугуна) и кислорода (до ~50 %), которые позволяют на каждые 100 °С увеличения температуры ПУТ увеличить производительность печи на 0,3–3 %, уменьшить расход кокса на 0–3 %, увеличить выход вторичных энергетических ресурсов на ~1–3 %, увеличить эксергетические КПД на 0,3–0,7 %, улучшить экологические показатели до 0,7 %.

Уточнены закономерности и дана количественная оценка применения ПУТ и природного газа при отдельном и совместном вдувании в доменную печь. Применение ПУТ и природного газа (140–160 кг/т чугуна и 40 м³/т чугуна), по сравнению с применением только ПУТ (160 кг/т чугуна) приводит к уменьшению тепловых потерь (на 15–30 %), расхода кокса (на 5–10 %), уменьшению финансовых затрат на топливо (до 4\$/т чугуна), увеличению выхода вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) (на 10–15 %) и увеличению затрат подводимой эксергии в системе «доменный – кислородно-конвертерный цех» на ~0,4 ГДж/т стали (эквивалентно 12 кг у.т./т стали).

Комплексный анализ причин уменьшения ресурса работы шахты доменных печей традиционной конструкции при расходе ПУТ более 120 кг/т чугуна позволил разработать эффективные направления увеличения ресурса работы шахты доменных печей (ДП) с применением 160 кг/т ПУТ и более, включающий:

- изменение конструкции и профиля печи за счет увеличения диаметра распара и его высоты, уменьшение угла наклона заплечиков;
- использование химически очищенной воды в системе охлаждения;
- использование медных и других холодильников с высокой теплоотводящей способностью в заплечиках и шахте;
- применение бесконусных загрузочных устройств для формирования осевого распределения газового потока;
- использование для приготовления ПУТ углей с минимальным содержанием золы;
- выбор рациональных дутьевого, газодинамического и шлакового режимов загрузки печи.

Реализация современной конструкции профиля печи, модернизация и совершенствование средств контроля и управления радиальным распределением, восстановительной и тепловой работой газового

потока и сжигания ПУТ, установка автоматизированных систем контроля за тепловой работой и разгаром футеровки шахты позволили разработать и реализовать рекомендации по обеспечению рационального высокопроизводительного, ресурсо- и энергосберегающего рационального режима работы для доменных печей № 3 ПАО «Запорожсталь» и № 3 ЧАО «МК «Азовсталь» с вдуванием ПУТ 160–180 кг/т чугуна [22].

Результаты расчетов эксергетического баланса для оценки показателей работы доменных печей Украины с применением ПУТ до 160 кг/т чугуна позволили оценить влияние вредных выбросов на окружающую среду и показатели ресурсоемкости и экологичности процесса, которые определяют затраты энергии, воды, воздуха, земельных и других природных ресурсов на единицу полезной продукции и отношение чистого полезного эффекта.

Продолжаются исследования в области теории и технологии доменного процесса. Разработанная в ИЧМ многозонная модель хода процессов в объеме печи предназначена для создания возможности количественного анализа процессов доменной плавки в радиальных кольцевых сечениях по высоте печи при заданном распределении материалов на колошнике и позволяет прогнозировать показатели плавки с раскрытием состояния процессов по высоте и поперечному сечению печи.

Разработка мероприятий и технологических решений, обеспечивающих безаварийную работу оборудования, продление кампании ДП, особенно при вдувании ПУТ, по-прежнему остается одним из приоритетных направлений деятельности ОМЧ. Рекомендации и технологические мероприятия по задувке доменных печей, разработанные специалистами отдела совместно с производителями одного из украинских предприятий, способствовали безаварийному выводу его печей на заданные планово-экономические показатели при обеспечении сохранения огнеупорной футеровки, конструкций и оборудования после длительной остановки (более 45 суток).

Для условий текущего производства ОАО «Днепропетровский металлургический комбинат» («ДМК») на основании результатов исследований влияния восстановительно-тепловой обработки на формирование жидких фаз из смесей окатышей, агломерата и кусковых руд, разработан режим загрузки шихтовых материалов, обеспечивающих мягкую промывку поверхности коксовой насадки от флюсовых остатков в области не полностью сгоревших частиц ПУТ. Реализованные на комбинате технологические приемы и рекомендации и их техническое сопровождение позволили в 2018 г. сократить расход условного топлива на 2–7 кг/т чугуна [23].

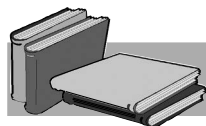
Отличительной особенностью научных исследований ОМЧ является их комплексный характер с учетом всех аспектов доменного производства. Работы выполняются совместно специалистами разных направлений – агломератчиками, доменщиками, механиками, теплотехниками, автоматчиками, физикохимиками. Под руководством академика

В.И. Большакова разработаны и внедрены новые режимы управления технологическими процессами доменного производства, программа модернизации доменных печей большого объема с оснащением их современными бесконусными загрузочными устройствами и новыми системами автоматизированного контроля и управления, реализующие комплексный подход к совершенствованию технологии доменной плавки [24].

Совместно со специалистами отдела физико-химических проблем проводятся комплексные исследования закономерностей процессов, протекающих в объеме доменной печи, направленные на совершенствование шлакового режима, свойств ЖРС и чугуна и др. Со специалистами отдела технологического оборудования ведутся работы по созданию и реализации модельной системы для поддержки принятия решений по выбору и корректировке программ загрузки доменной печи, оборудованной современным бесконусным загрузочным устройством. Новый подход к выбору энергоэффективных режимов загрузки при использовании многокомпонентной шихты переменного качества в переходных дутьевых режимах позволяет обеспечить эксплуатационную устойчивость системы охлаждения и безаварийную работу доменной печи. Результаты использования информации о распределении температур газов в колошниковом пространстве, влиянии технологиче-

ских факторов на характер изменения температур футеровки по высоте печи и формирование защитного гарнисажа позволяют принимать научно обоснованные решения по управлению загрузкой печи шихтовых материалов, способствующие повышению ее эксплуатационной стойкости [25].

Для современного аглодоменого производства Украины первостепенное значение приобретает необходимость оперативно и адекватно реагировать на изменяющиеся и нестабильные топливно-сырьевые условия, производить качественную и конкурентоспособную продукцию и не допускать аварийных ситуаций. Выполнение этих задач невозможно без инновационных научных разработок, учитывающих как тенденции развития мирового доменного производства, так и местную специфику. Постоянное внимание к развитию фундаментальной теории доменного процесса, прочные связи с предприятиями горно-металлургического комплекса, тесное сотрудничество с научно-исследовательскими и проектными организациями НАН Украины и отрасли, творческий потенциал и опыт сотрудников позволяют коллективу ОМЧ вносить достойный вклад в развитие металлургической науки, создание новых технологий и освоение новой техники.

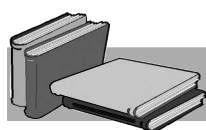


ЛИТЕРАТУРА

1. *Большаков В.И.* Выдающийся доменщик, академик Максим Власович Луговцов – основатель ИЧМ. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2004. Вып. 9. С. 26–33.
2. *Можаренко Н.М.* Развитие творческого наследия З.И. Некрасова в Институте черной металлургии. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2008. Вып. 16. С. 440–445.
3. *Некрасов З.И., Покрышкин В.Л.* О результатах освоения крупных доменных печей. Основные направления технологического процесса доменного производства. *Бюллетень ЦНИИИ ТЭ ЧМ*. 1974. № 11 (727). С. 7.
4. *Улахович В.А., Можаренко Н.М., Нетронин В.И.* Раздувка мощной доменной печи объемом 5500. *Сталь*. 1988. № 1. С. 15–23.
5. *Гладков Н.А., Ульянов А.Г.* Об использовании табачных руд Керченского месторождения. *Металлурга*. 1960. № 2. С. 3–4.
6. *Некрасов З.И.* Эффективность применения комбинированного дутья высоких параметров. *Сталь*. 1977. № 10. С. 880–883.
7. *Некрасов З.И., Юпко Л.Д., Покрышкин В.Л.* Освоение технологии плавки с вдуванием пылевидного топлива совместно с применением природного газа и обогащенного кислородом дутья на доменной печи завода «Запорожсталь». *Металлургия чугуна: Тематический отраслевой сборник*. М.: Металлургия. 1973. № 1. С. 98–110.
8. *Некрасов З.И., Маймур Б.Н., Мороз В.Ф.* Изучение теплофизических характеристик железорудных брикетов в процессе нагрева и восстановления в различных температурно-газовых условиях. *Тематический отраслевой сборник «Вопросы производства чугуна в доменных печах»*. М: Металлургия, 1984. С. 7–12.
9. *Большаков В.И.* Доменное производство «Криворожстали»: монография. Днепропетровск, 2004. 378 с.
10. *Бородулин А.В., Горбунов А.Д., Романенко В.И.* Домна в энергетическом измерении: монография. Днепропетровск: Издательство ДГТУ, 2005. 480 с.
11. *Товаровский И.Г.* Познание процессов и развитие технологии доменной плавки. Днепропетровск: Журфонд, 2015. 912 с.
12. *Гладков Н.А., Нестеров А.С.* Процессы в слое железорудных материалов при его нагревании. *Металлы*. 1987. № 3. С. 9–11.

13. *Большаков В.И., Голубых Г.Н., Можаренко Н.М.* Промышленная безопасность доменных печей при задувке и выдувке. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2007. Вып. 14. С. 209–309.
14. *Большаков В.И., Нестеров А.С., Коваленко А.Г.* Эффективная работа аглодоменного производства ПАО ЕМЗ при расширении использования в шихте вторичных ресурсов и окатышей. *Сталь*. 2014. № 11. С. 7–9.
15. *Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Лопатенко К.П.* Исследования высокотемпературных свойств железорудных материалов в лабораторных условиях. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2018. Вып. 32. С. 64–79.
16. *Нестеров А.С., Гармаш Л.И., Пивненко А.В.* К вопросу о совершенствовании подготовки железорудного сырья к доменной плавке. *Сборник научных трудов «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии»*. 2014. Вып. 29. С. 64–71.
17. *Нестеров А.С., Семенов Ю.С., Горупаха В.В.* Исследование процесса формирования жидких фаз при вдувании ПУТ в переменных шихтовых условиях. *Металлургия чугуна – вызовы XXI века: труды VIII Международного конгресса доменщиков*. Москва, 2017. С. 133–137.
18. *Чайка А.Л., Лебедь В.В., Сохацкий А.А.* Опыт и перспективы комплексного применения систем автоматизированного контроля разгара футеровки, тепловых потерь и теплоэнергетических параметров на доменных печах. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 3. С. 2–9.
19. *Большаков В.И., Чайка А.Л., Лебедь В.В.* Системная надежность доменного производства с использованием пылеугольного топлива. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2015. № 7. С. 22–30.
20. *Чайка А.Л., Корнилов Б.В., Лебедь В.В.* Исследование распределения скоростей газового потока по высоте доменной печи и их влияние на устойчивость газодинамического режима. *Сталь*. 2019. № 1. С. 2–4.
21. *Чайка А.Л., Чернятевич А.Г., Сохацкий А.А.* Эксергетический анализ влияния содержания кремния в чугуне и его температуры на энергоэффективность работы комплекса «доменный – кислородно-конвертерный цех». *Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация»*. 2019. № 2. С. 189–197.
22. *Gordon Y., Sadri A., Izumskiy N.* Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity. Philadelphia Association for Iron & Steel Technology. Pennsylvania Convention Center. 2018. URL: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-186.htm>
23. *Можаренко Н.М., Семенов Ю.С., Горупаха В.В.* Особенности технологии доменной плавки с применением пылеугольного топлива. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2017. № 5. С. 2–9.
24. *Большаков В.И., Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И.* Освоение режимов загрузки доменной печи, оборудованной БЗУ, в условиях нестабильного качества шихтовых материалов. *Сборник трудов VI Международного Конгресса по аглококсо-доменному производству*. Москва, 2013. С. 60–71.
25. *Семенов Ю.С., Шумельчик Е.И., Горупаха В.В.* Діагностика та управління доменною плавкою в змінних паливно-сировинних умовах. Дніпро: Домінанта Прінт, 2018. 260 с.

Поступила 24.09.2019



REFERENCES

1. *Bol'shakov, V.I.* (2004). Prominent blastfurnace operator, Academician Maxim Vlasovich Lugovtsov – Founder of the ISI. *Sbornik nauchnyh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 9, pp. 26–33 [in Russian].
2. *Mozharenko, N.M.* (2008). Development of the creative heritage of Z.I. Nekrasov in ISI. *Sbornik nauchnyh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii". Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, no. 16, pp. 440–445 [in Russian].
3. *Nekrasov, Z.I., Pokryshkin, V.L.* (1974). The results of the development of large blast furnaces. *Osnovnye napravleniya tekhnologicheskogo protsessa domennogo proizvodstva. Biulleten' TSNIII TE ChM. The main directions of the technological process of blast furnace production*, no. 11 (727), p. 7 [in Russian].
4. *Ulahovich, V.A., Mozharenko, N.M., Netronin, V.I.* (1988). Blowing up a powerful 5500 blast furnace. *Stal'. Steel*, no. 1, pp. 15–23 [in Russian].
5. *Gladkov, N.A., Ul'janov, A.G.* (1960). About the use of tobacco ores of the Kerch field. *Metallurg. Metallurgist*, no. 2, pp. 3–4 [in Russian].
6. *Nekrasov, Z.I.* (1977). The effectiveness of the use of combined blasting of high parameters. *Stal'. Steel*, no. 10, pp. 880–883 [in Russian].
7. *Nekrasov, Z.I., Yupko, L.D., Pokryshkin, V.L.* (1973). The development of melting technology with the injection of pulverized fuel together with the use of natural gas and oxygenrich blast in a blast furnace of the "Zaporizhstal". *Metallurgiya chuguna: Tematicheskij otraslevoi sbornik. Cast iron metallurgy*, no. 1, pp. 98–110 [in Russian].

8. Nekrasov, Z.I., Majmur, B.N., Moroz, V.F. (1984). Studying the thermophysical characteristics of iron ore briquettes during heating and recovery in various temperature-gas conditions. *Tematicheskij otraslevoj sbornik "Voprosy proizvodstva chuguna v domennykh pechakh"*. Issues of the production of cast iron in blast furnaces, pp. 7–12 [in Russian].
9. Bol'shakov, V.I. (2004). Blastfurnace production of Krivorozhstal. Dnepropetrovsk, 378 p. [in Russian].
10. Borodulin, A.V., Gorbunov, A.D., Romanenko, V.I. (2005). Blast furnace in the energy dimension. Dneprodzerzhinsk: DGTU, 480 p. [in Russian].
11. Tovarovskij, I.G. (2015). Knowledge of processes and the development of blast furnace technology. Dnepropetrovsk: Zhurfond, 912 p. [in Russian].
12. Gladkov, N.A., Nesterov, A.S. (1987). Processes in a layer of iron ore materials when it is heated. *Metally. Metals*, no. 3, pp. 9–11 [in Russian].
13. Bol'shakov, V.I., Golubyh, G.N., Mozharenko, N.M. (2007). Industrial safety of blast furnaces for blowing and expulsion. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii"*. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, no. 14, pp. 209–309 [in Russian].
14. Bol'shakov, V.I., Nesterov, A.S., Kovalenko, A.G. (2014). Efficient operation of sinter plant production at EMP while expanding the use of secondary resources and pellets in the charge. *Stal'. Steel*, no. 11, pp. 7–9 [in Russian].
15. Nesterov, A.S., Garmash, L.I., Lopatenko, K.P. (2018). Studies of the hightemperature properties of iron ore materials in laboratory conditions. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii"*. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, no. 32, pp. 64–79 [in Russian].
16. Nesterov, A.S., Garmash L.I., Pivnenko, A.V. (2014). The issue of improving the preparation of iron ore for blast furnace smelting. *Sbornik nauchnykh trudov "Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoj metallurgii"*. Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy, no. 29, pp. 64–71 [in Russian].
17. Nesterov, A.S., Semenov, Yu.S., Gorupaha V.V. (2017). Investigation of the process of formation of liquid phases during injection of pulverized coal in variable charge conditions. *Metallurgija chuguna – vyzovy XXI veka: trudy VIII Mezhdunarodnogo kongressa domenichshhikov. Cast Iron Metallurgy – Challenges of the 21st Century: VIII International Congress, Moscow*, pp. 133–137 [in Russian].
18. Chajka, A.L., Lebed', V.V., Sohackij, A.A. (2017). Experience and prospects for the integrated use of systems for automated control of the height of the lining, heat loss and heat energy parameters on blast furnaces. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 3, pp. 2–9 [in Russian].
19. Bol'shakov, V.I., Chajka, A.L., Lebed', V.V. (2015). System reliability of pulverized coal blast furnace production. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 7, pp. 22–30 [in Russian].
20. Chajka, A.L., Kornilov, B.V., Lebed', V.V. (2019). Investigation of the distribution of gas flow velocities over the height of the blast furnace and their influence on the stability of the gasdynamic regime. *Stal'. Steel*, no. 1, pp. 2–4 [in Russian].
21. Chajka, A.L., Chernjatevich, A.G., Sohatskij, A.A. (2019). Exergy analysis of the influence of silicon content in cast iron and its temperature on the energy efficiency of the complex "blast furnace – oxygenconverter workshop". *Chernaya metallurgiya: Biul. in-ta "Chermetinformacija"*. Ferrous metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economical Information, no. 2, pp. 189–197 [in Russian].
22. Gordon, Y., Sadri, A., Izumskiy, N. (2018). Integration of lining and cooling system diagnostics methods into the expert system to reduce hot metal production cost and increase blast furnace productivity. Philadelphia Association for Iron & Steel Technology. Pennsylvania Convention Center. 2018. URL: <http://digital.library.aist.org/pages/PR-374-186.htm> [in English].
23. Mozharenko, N.M., Semenov, Yu.S., Gorupaha, V.V. (2017). Features of pulverized coal blast furnace technology. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. Metallurgical and Mining Industry*, no. 5, pp. 2–9 [in Russian].
24. Bol'shakov, V.I., Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I. (2013). Mastering the loading modes of a blast furnace equipped with a BZU in conditions of unstable quality of charge materials. *Sbornik trudov VI Mezhdunarodnogo Kongressa po aglokoksodomennomu proizvodstvu*: Moskva. Collection of works of the VI International Congress on sinter production: Moscow, pp. 60–71 [in Russian].
25. Semenov, Yu.S., Shumel'chik, E.I., Gorupaha, V.V. (2018). Diagnostics and control of blast-furnace smelting in changing fuel and raw materials conditions. Dnipro: Dominanta Print, 260 p. [in Ukrainian].

Received 24.09.2019

О.С. Нестеров, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. відділу, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>;
О.Л. Чайка, канд. техн. наук, ст. наук. співр., зав. лаб., e-mail: chaykadp@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>; **Л.І. Гармаш**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: larysagar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (Дніпро, Україна)

Відділ металургії чавуну Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України. Історія і сучасність

У статті представлено пріоритетні напрямки досліджень і основні наукові досягнення відділу металургії чавуну (ВМЧ) Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (ІЧМ) починаючи з моменту його заснування і до теперішнього часу.

Засновником ВМЧ був академік Михайло Власович Луговцов. За допомогою розробленої ним статистичної теорії доменного процесу на основі положень теорії теплового потоку, методів математики, механіки і фізичної хімії було кількісно описано процеси доменної плавки.

Великий внесок у розвиток теорії і практики доменного виробництва вніс академік Зот Ілліч Некрасов. Напрямки інтенсифікації доменного процесу за рахунок використання природного газу, комбінованого дуття і вдування пиловугільного палива (ПВП), обґрунтування можливостей і будівництво доменних печей великого об'єму, вдосконалення сировинної бази доменного виробництва визначили шляхи розвитку галузі на багато десятиліть і не втратили актуальності і зараз.

Завдяки Зоту Іллічу в ІЧМ для проведення досліджень було створено прекрасну лабораторну базу, яка в той час не поступалася кращим світовим. Доменщики ВМЧ працювали на всіх найбільших металургійних підприємствах СРСР і внесли великий вклад в розвиток багатьох напрямків доменного виробництва. Результати проведених у відділі робіт були базою для розробки нових технологій і матеріалів та сприяли зміцненню авторитету радянської металургії в світі. У статті перераховано найбільш значущі розробки наукових співробітників ВМЧ в радянський період.

Дослідження, які виконуються у відділі нині, розвивають і розширюють ці напрямки з урахуванням вимог до якості кінцевого продукту і сучасних паливно-сировинних умов, в яких працює металургія України. На основі системного аналізу процесів і перспектив розвитку доменного виробництва фахівцями відділу розробляються рекомендації щодо підвищення його ефективності та зниження ресурсо- і енергоємності. Особлива увага приділяється питанням подовження кампанії доменних печей, розробці технологій їх стабільної роботи в стаціонарних і нестаціонарних умовах плавки, вдосконалення технології огрудкування залізорудної сировини і виплавки чавуну на основі управління металургійними властивостями шихтових матеріалів, в тому числі, з високим вмістом вторинних ресурсів, розвитку і реалізації науково-практичних основ технології ефективного застосування ПВП.

Ключові слова

Доменний процес, комбіноване дуття, технологія доменної плавки, доменні печі великого об'єму, вдування пиловугільного палива, якість залізорудної сировини, подовження кампанії доменної печі.

Summary

A.S. Nesterov, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Department, e-mail: asn.dnepr@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0183-0327>;
A.L. Chaika, PhD (Engin.), Senior Researcher, Head of the Laboratory, e-mail: chaykadb@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-1678-2580>;
L.I. Garmash, PhD (Engin.), Senior Researcher, e-mail: larysagar@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6873-6685>

Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (Dnipro, Ukraine)

Department of Cast Iron Metallurgy of Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine. History and Modernity

The article presents the main scientific achievements and research priorities of the Department of Cast Iron Metallurgy (DCIM) of the Iron and Steel Institute of Z.I. Nekrasov of the NAS of Ukraine (ISI) from its inception to the present.

The founder of the DCIM was Academician Mikhail Vlasovich Lugovtsov. He developed the statistical theory of the domain process that based on the principles of the theory of heat flow, methods of mathematics, mechanics, and physical chemistry. This theory described quantitatively the processes of domain melting.

Academician Zot Ilyich Nekrasov made a great contribution to the development of the theory and practice of domain production. Directions of intensification of the domain process through the use of natural gas, combined blasting and injection of pulverized coal (PC) into a blast furnace, substantiating the possibilities and building largescale blast furnaces, improving the raw material base of blast furnace production have determined the development of the industry for many decades and have not lost their relevance even now.

Thanks to Zot Ilyich, an excellent laboratory base was created in the ISI for research, which was not inferior to the best world ones at that time. DCIM domain workers worked at all the largest metallurgical enterprises of the USSR and made a great contribution to the development of many areas of blast furnace production. The results of this work were the basis for the development of new technologies and materials and contributed to strengthening the authority of Soviet metallurgy in the world. The article lists the most significant developments of DCIM scientists in the Soviet period.

The research results, which are performed in the division today, develop and expand these areas, taking into account the requirements for the quality of the final product and modern fuel and raw materials conditions in which the metallurgy of Ukraine operates. Specialists of the department develop recommendations to increase its efficiency and reduce resource and energy intensity based on a systematic analysis of the processes and prospects for the development of blast furnace production. Particular attention is paid to the extension of the blast furnace campaign, the development of technologies for their stable operation in stationary and non-stationary melting conditions, the improvement of the technology of pelletizing iron ore and coast iron smelting based on the management of metallurgical properties of charge materials, including those with a high content of secondary resources, development and implementation scientific and practical foundations of technology for the effective application of PC.

Keywords

Blast furnace process, combined blowing, blast furnace technology, large blast furnaces, pulverized coal injection, iron ore quality, blast furnace campaign extension.