

В.И.Большаков

ПРОБЛЕМА ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ КОЖУХОВ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ В РАБОТАХ ИЧМ

Представлены результаты научно–технической деятельности ИЧМ по исследованию причин разрывов кожухов доменных печей, повышению их прочности и надежности, по разработке системы автоматизированного контроля остаточной толщины футеровки горна и лещади, теплового состояния горна.

Общая проблема. Конструкционная прочность и надежность металлоконструкций доменных печей обеспечивается правильным подбором материалов с учетом объема печи, температуры и давления дутья, обогащения дутья кислородом, вдувания дополнительного топлива, использования различных руд, физико–механических свойств материалов футеровки, типов холодильников, соблюдением технологических инструкций, совершенством и стабильностью технологического режима, своевременным выполнением капитальных и текущих ремонтов агрегата. Недостаточная степень контроля в процессе эксплуатации фактического состояния кожухов доменных печей из–за отсутствия вмонтированных средств контроля температуры и расчетной нагрузки не обеспечивает высокой надежности без постоянных осмотров службой безопасности. Средний статистический ресурс работоспособного состояния кожуха агрегата определяется мировой практикой на основании многочисленных исследований и по доменным печам составляет: США – 44 года (медные холодильники и компьютерная система контроля состояния кожуха); Германия – 22 года; Япония – 17 лет; Россия – 16 лет.

Постановка проблемы. К вопросу изучения причин разрывов кожухов доменных печей и разработки мероприятий по обеспечению их прочности и эксплуатационной надежности Институт черной металлургии (ИЧМ) обратился в конце 70–х годов. В этот период развития черной металлургии страны наметился процесс интенсификации доменного производства путем применения природного газа, обогащения дутья кислородом, увеличения перепада давления газа в печи. Так, в 1977–78 гг. Институт (рук. академик З.И.Некрасов) совместно с меткомбинатом «Криворожсталь» (рук. главный инженер В.А.Сацкий) провел опытные плавки на ДП №7 и №8 при применении агломерата НКГОК–2 и окатышей СевГОКа для определения комплексного влияния на показатели доменной плавки хорошо подготовленного сырья и высокообогащенного кислородом дутья в сочетании с природным газом. В конце 1977г. был отработан режим плавки при загрузке шихты, состоящей из агломерата НКГОК–2 (65%) и окатышей СевГОКа (35%) с целью увеличения расхода дутья и перепадов давления на ДП–7 – до 1,30

ат, на ДП-8 – до 1,45 ат, при сохранении исходных расходов кислорода и природного газа. В начале 1978г. была отработана технология плавки, усовершенствованная путем выбора рациональных параметров загрузки шихты и дутья при увеличении расхода кислорода до максимально возможного уровня (с сохранением исходного расхода природного газа) на ДП-7 – 19 тыс.м³/час (26,9%), на ДП-8 – 30 тыс.м³/час (28,6%). Отработан технологический режим при сохранении достигнутых расходов кислорода и с повышением количества природного газа на ДП-7 – 18 тыс.м³/час, на ДП-8 – 25 тыс.м³/час. Отработана технология плавки при увеличении расхода кислорода на ДП-7 до 33тыс.м³/час (32%) и ДП-8 до 37,2 тыс.м³/час (30%) и природного газа, соответственно, до 25 и 28 тыс.м³/час [1]. Применение этой технологии позволило получить: прирост производительности ДП-7 на 29%, ДП-8 – на 22,4%; экономию кокса на ДП-7 – 59 кг/т чугуна, ДП-8 – 30 кг/т; производительность печей при увеличенном перепаде давления на ДП-7 – 4758 т/сут., ДП-8 – 6412 т/сут. и тиражировать эту технологию доменной плавки на других предприятиях отрасли.

В связи с ухудшением стойкости кожухов шахт доменных печей и значительным увеличением простоев печей на заварке трещин Минчермет СССР, в подчинении которого находился Институт черной металлургии, в 1977г. поручил ИЧМ (совместно с ВНИИМехчерметом) провести анализ причин разрывов кожухов доменных печей и подготовить предложения по повышению их эксплуатационной надежности в изменившихся условиях работы печей (кислород, природный газ, температура, давление).

Изложение основных материалов исследования.

Сотрудниками Института черной металлургии был выполнен анализ влияния технологических особенностей доменной плавки на аварии и простои доменных печей, связанные с разрывами и трещинами кожухов. Показано, что образование разрывов и трещин кожухов печей связано с нарушениями в технологии доменного процесса (периферийный ход газового потока в печи), неудовлетворительным качеством железорудного сырья (цинкосодержащие руды) и повышенным содержанием неофлюсованных окатышей в шихте. В условиях значительной интенсификации доменного процесса, а также некоторых недостатков в проектировании доменных печей имели место простои и аварии доменных печей, вызванные отказами металлоконструкций. Так, в 1975г. из-за неудовлетворительного состояния кожухов доменных печей, холодильников и др. элементов простои печей составили 1167 часов, потери производства – 144 тыс.т чугуна, затраты на восстановление – 632,6 тыс.руб. Основная часть внеплановых остановок доменных печей связана с разрывами их кожухов. Уменьшается межремонтный период между капитальными ремонтами I и II разрядов. Увеличивается

продолжительность ремонтов. Уменьшилась стойкость шахт, во время ремонтов II разряда приходилось заменять от 30 до 80% кожуха шахты. В 1977г. произошло 26 аварий металлоконструкций доменного комплекса, при этом простои доменных печей составили 871 час, тихий ход – 168 часов, потеряно 82,7 тыс.т чугуна, в денежном выражении потери составили более 240 тыс.руб. Фактические простои и потери значительно превышают приведенные, т.к. актами регистрируются лишь аварии, вызывающие простои продолжительностью свыше 4 часов. Так, общие простои доменных печей из-за аварий металлоконструкций в 1977г. составили 1603 часа, потери чугуна – 355 тыс.т, тихий ход – 200 часов. Наиболее частыми являются следующие аварии металлоконструкций: трещины, продувы, прогары и разрывы кожухов шахты и заплечиков доменной печи (зачастую с выбросом шихты); деформация, прогары, разрывы воздухопроводов горячего дутья. Часто встречаются прогары рамы чугунной летки, являющиеся следствием нарушений в технологии выпуска чугуна.

Причинами разрывов кожухов шахт являются, как правило, термические напряжения. Крупная авария – разрыв кожуха шахты и распара, произошла 24.09.1977г. на ДП–3 полезным объемом 2000 м³ Череповецкого металлургического завода. Под давлением газов и столба шихты в образовавшийся разрыв было выброшено около 1500 м³ раскаленных материалов, которыми были частично разрушены конструкции печи и здания литейного двора. В мае–июне 1977г. на ДП–3 был проведен капитальный ремонт II разряда, при подготовке к которому не была сделана квалифицированная проверка состояния кожуха шахты печи, несмотря на то, что он находился в эксплуатации 15 лет, имел трещины, местные прогары и деформации, а с 1974г., из-за вышедших из строя холодильников, полностью поливался снаружи водой. Во время капремонта кожух шахты и распара печи заменены не были. Поврежденные участки кожуха были заменены вставками из стали, не соответствовавшей проектному материалу; состояние металла кожуха (толщина, наличие микротрещин, степень коррозии, механические свойства, химсостав) также не проверялись. Огнеупорная футеровка охлаждаемой части шахты печи при ремонте была выполнена с отступлением от проекта вплотную к холодильникам без устройства компенсационных зазоров на ее расширение. В результате аварии печь простояла 22 суток, было потеряно около 120 тыс.т чугуна, стоимость восстановительных работ составила 670тыс.руб. Анализ причин данной аварии, а также аналогичных аварий, произошедших на доменных печах ранее, показал, что они являются следствием нарушения правил технической эксплуатации огнеупорной футеровки, систем охлаждения кожухов доменных печей; допускается выход из строя холодильников, перегревы брони и, как следствие, ее деформация и разрывы, неровный

ход печей, периферийный газовый поток; не принимаются технологические меры по сохранению в печах гарнисажа, огнеупорной футеровки и холодильников; не проводятся систематический контроль и обследование технического состояния кожухов доменных печей. В январе 1977г. на ДП-1 Нижнетагильского меткомбината произошел прогар заплечиков с выбросом шихтовых материалов. В результате аварии потеряно 7379 т чугуна. Причиной аварии явилось попадание воды в чугунную летку из леточного холодильника вследствие износа трубок змеевика, вызванного длительной эксплуатацией печи (16 лет). В марте 1977г. на ДП-4 Карагандинского меткомбината произошел обрыв уравнильного газопровода диаметром 700 мм и падение его с опор. В результате аварии не додано 1045 т чугуна. Причиной обрушения газопровода явилась совокупность дефектов, отступлений от проекта, правил безопасности, допущенных при монтаже газопровода и в дальнейшем при его эксплуатации.

Работы по изучению состояния кожуха, холодильников, огнеупорной кладки и механического оборудования системы загрузки были проведены на ДП-9 «Криворожстали» в период ее капитального ремонта II разряда (декабрь 1977г. – март 1978г.). Для этой цели по всему кожуху ДП-9 были установлены термо- и тензодатчики для исследования напряженно-деформированного состояния кожуха печи; снятия показаний о величине возникающих термомеханических напряжений; разработки методов расчета на прочность кожуха с учетом фактических механических и, в особенности, термических нагрузок.

Кожух доменной печи находится под воздействием следующих нагрузок: вес оборудования; внутреннее давление газовой среды; термические расширения футеровки и холодильников; давление массы шихтовых материалов и продуктов плавки; обрывы шихты; производство внутри кожуха взрывных работ; аварии оборудования. Исследования показали, что работоспособность кожухов доменных печей во многом определяется стойкостью футеровки и состоянием системы охлаждения кожуха. Для охлаждения применяются холодильники различных типов и модификаций. Кроме того, применяются холодильники как с водяным, так и с испарительным охлаждением. Опыт и расчеты показывают, что почти на всех металлургических заводах стойкость холодильников с различными видами охлаждения практически одинакова и средний срок их службы составляет 2–4 года. Как правило, процесс, ведущий к разрушению брони кожуха доменной печи, проходит следующие стадии: выгорание кладки доменной печи (в основном на уровне 1–3 рядов холодильников) – 0,5–1,5 года; выход из строя холодильников (в основном на 1–3 рядах) – 2–4 года; появление необратимых пластических деформаций кожуха, трещины кожуха шахты – 2,5–5 лет. Оценка ресурса работы холодильников показывает, что на каждом капитальном ремонте I

и II разряда все или большая часть холодильников шахты подлежат замене. Из этого следует, что важнейшим средством повышения надежности кожуха является увеличение срока службы холодильников. Исследованиями, проведенными ИЧМ на ДП-9 «Криворожстали» с помощью установленных на кожухе печи термодатчиков показано, что через определенный срок после выхода из строя холодильников растут термические напряжения в кожухе доменной печи. При выходе из строя группы близлежащих холодильников через 0,5–2,5 месяца возникают значительные дефекты кожуха (выпучины), а часто появляются и трещины (такие трещины появились на кожухе ДП-9). На основании показаний термодатчиков было изучено распределение изотерм в теле холодильника с кладкой и без кладки. Сотрудниками Института было исследовано термическое поле холодильников ДП-9. Показано, что чаще всего трещины в теле холодильника появляются в зоне расположения наибольшего градиента температуры.

На стойкость кожуха доменной печи влияет и технология ведения доменного процесса. Если отдельные факторы, определяющие ход доменной плавки, незначительно влияют на прочность кожуха, то их совокупность может оказывать существенное воздействие на стойкость шахты. Особенно пагубными являются нарушения нормального технологического хода печи. Специалистами ИЧМ было установлено на ДП-9, что периферийный ход печи при выгоревшей кладке может повлечь интенсивный прогар холодильников и привести к аварийным ситуациям. Этим объясняется и образование трещин на кожухе ДП-9 в районе примыкания газоотводов – к этому приводит образование местных газовых потоков.

Перед задувкой ДП-9 исследовано распределение материалов в надконусном пространстве и на колошнике: при загрузке двух доз агломерата (75 т) на станцию; при загрузке двух доз кокса (21 т) на станцию; при загрузке двух доз агломерата (75 т) с работой вращающегося распределителя в режиме непрерывного вращения (22 об/мин); при загрузке двух доз железосодержащих материалов (доза агломерата 50 т и доза окатышей – 25 т) с работой вращающегося распределителя в режиме непрерывного вращения (22 об/мин). Определены места ударов шихтовых материалов о поверхность защитных плит колошника. Изучена динамика разгара огнеупорной кладки (по балансам глинозема) в период задувки ДП-9. Произведен отбор образцов материала брони кожуха, холодильников и трубок холодильников ДП-9. Исследованы их структура и механические свойства с целью анализа состояния металла на период ремонта и сопоставления со структурой металла поставки. Результаты исследований показали, что возможными причинами разрушения металла шахты являются совместное воздействие науглероживания металла и внутренних напряжений, связанных с

возникновением градиента температур по сечению листа при выходе из строя холодильников. Также был произведен отбор проб материала кладки и гарнисажа в заплечиках, распаре и шахте, исследованы их структура и фазовый состав.

Недопустимой является практика проведения взрывов при ремонтных работах на доменных печах. В случае, когда часть кожуха печи остается на следующую компанию, неконтролируемые изменения в металле вследствие взрывов могут существенно ослабить несущую способность брони. Следует также в обязательном порядке во время капитальных ремонтов заменять части кожуха, которые в процессе эксплуатации доменной печи подверглись перегреву. Негативное влияние на стойкость кожуха печи оказывают такие аварийные ситуации как взрывы газовой смеси в печи, динамические удары, прорывы горна.

Специалистами ИЧМ были проанализированы вопросы прочности кожуха доменной печи. Проблема повышения стойкости кожухов доменных печей относится к числу наиболее актуальных, т.к. продолжительность межремонтных периодов в значительной мере зависит от срока безотказной службы брони. Кожух доменной печи представляет собой конструкцию, обладающую существенной неоднородностью формы и подвергающуюся воздействию различных термических и механических нагрузок. В местах сочленения оболочечных элементов, отличающихся толщиной и кривизной, определяющими являются составляющие напряжений, характеризующие краевой эффект; в зонах отверстий под трубки и болты холодильников снижение прочности определяется концентрацией напряжений и контактными явлениями. Неоднозначно вопрос о прочности решается не только от места к месту на кожухе, но и во времени. В процессе эксплуатации изменяется состояние кладки и холодильников. Естественно, изменяется в различные периоды компании и напряженно–деформированное состояние кожуха.

Внутренне давление шихты и газов, температурный распор кладки, осевые нагрузки со стороны газоотводов и других металлоконструкций создают в кожухе доменной печи напряженно–деформированное состояние. Анализ действительной работы кожуха ДП–9 позволил сделать вывод о важности учета в расчетах на прочность явлений краевого эффекта. Прежде всего, следует отметить зону, примыкающую к мораторному кольцу, а также места, где сочленяются оболочечные элементы разной толщины. Здесь имеет место значительный перепад напряжений и деформаций по толщине кожуха. С помощью установленных на кожухе ДП–9 тензодатчиков сотрудниками ИЧМ изучено распределение и изменение интенсивности напряжений на внешней и внутренней поверхности кожуха. Установлено, что материал на внешней и внутренней поверхности кожуха находится в различном

напряженном состоянии и даже в период нормальной эксплуатации доменной печи находится частично в стадии пластического деформирования. В верхней и центральной части кожуха трещины, как правило, имеют вертикальное направление. Появление их связано с наличием внутреннего давления, создающего окружные напряжения. В нижней части кожуха определяющими становятся изгибные составляющие напряжений (обусловленные краевым эффектом) и трещины в указанной зоне располагаются горизонтально.

Значительный местный изгиб наблюдается не только в перечисленных зонах конструктивной неоднородности. Это явление также может быть связано с выходом из строя системы охлаждения. В области выгоревшего холодильника температура кожуха доменной печи существенно повышается, что приводит к местному расширению материала. Кожух печи имеет как начальную (проектную) кривизну, так и различные несовершенства формы, появившиеся в период монтажа и эксплуатации. Кроме того, практически всегда присутствует градиент температуры по толщине. Названные обстоятельства являются причиной местного изгиба кожуха. В зонах температурных пятен кожух печи «вспучивается», что приводит к локальной потере его прочности. Важный фактор, влияющий на прочность кожухов – наличие большого числа отверстий. В зонах отверстий наблюдается повышение напряженности кожуха, вызванное контактным взаимодействием с болтами, крепящими холодильники к кожуху, что также приводит к местной потере прочности. Ходу печи присуща определенная нестационарность, вызванная колебательным характером внутреннего давления, температуры и пр., поэтому напряженно–деформированное состояние кожуха не является постоянным по времени. Этим объясняется появление в разных местах кожуха трещин в разное время в течение практически всего межремонтного периода. Повышение стойкости кожухов доменных печей может быть достигнуто путем тщательного выполнения персоналом требований технологических инструкций и совершенствованием методов расчета и проектирования конструкций.

Анализ состояния кожуха ДП–9 «Криворожстали» в период ее капитального ремонта II разряда (декабрь 1977г. – март 1978г.) показал, что проблема повышения прочности и надежности кожухов доменных печей является одной из важных в ряду задач по совершенствованию и развитию доменного производства. Решение ее позволяет вскрыть один из резервов повышения долговечности доменных агрегатов. Проведенные в 70–х годах исследования по анализу причин разрывов кожухов доменных печей и повышению их эксплуатационной надежности – это первый опыт Института черной металлургии в изучении этого вопроса. Процесс, приводящий к образованию трещин в кожухах шахт доменных печей, сводится к следующему: прогорает кладка, шихта вступает в

непосредственный контакт с холодильниками; выходят из строя холодильники, что вызывает повышение термических напряжений в кожухе; появляются локальные деформации брони и трещины; иногда трещины появляются вследствие механических воздействий расширяющейся кладки. Факторами, способствующими образованию трещин, являются: действительные нагрузки, значительно превышающие расчетные (недостатки конструкции и недостатки проекта); высокая газопроницаемость материалов, заполняющих зазоры, способствующая циркуляции горячих газов между кожухом и кладкой, результатом чего являются местные нагревы кожуха; высокая пористость огнеупоров, способствующая проникновению газов в кладку и разрушению последней; недостаточный теплообмен между кладкой и холодильниками. Опыт показал, что большая часть трещин расположена в нижней части шахты доменной печи. Большинство трещин в нижней части имеют направление, близкое к горизонтальному, а в верхней части шахты – к вертикальному. Одна из главных причин возникновения трещин в кожухе шахты – значительные термические напряжения. Эти напряжения возникают вследствие неравномерного нагрева кожуха. Места локального нагрева обычно связаны с участками, где вышло из строя большое число холодильников. Области повышенных температур создаются также газовыми потоками. Газовые потоки в верхней части могут направляться к газоотводам.

По данным анализа причин трещинообразования в кожухах доменных печей за 2000 год установлено, что распределение трещин по кожуху доменной печи составляет: зона горна и чугунных леток – 65%; заплечики – 16%; шахта печи – 19%. Наиболее тяжелыми и часто происходящими авариями в доменном производстве являются разрывы кожухов доменных печей в зонах горна и чугунных леток, сопровождающиеся разрушением нижней части печи, выходом наружу раскаленного чугуна, кокса, шлака и газов. Прорывы горна в условиях скопления в нем значительных масс жидкого чугуна и высокого давления дутья представляют собой серьезные аварии, вызывающие разрушения оборудования, взрывы, пожары, отравления и гибель персонала. Так, за период 1995–2000 годов на металлургических предприятиях Украины зарегистрировано 20 аварий доменных печей с разрывом кожухов в зоне горна и общим простоем до 300 суток.

Накопленный учеными ИЧМ за последние 30 лет опыт исследования, разработки новых приемов управления доменным процессом, контроля и расчета тепловых нагрузок на элементы доменных печей позволил усовершенствовать понимание особенностей доменной плавки и разработать ряд новых методических подходов и технических средств, обеспечивающих современный уровень управления работой доменных печей. Работы по автоматизации доменного процесса включают создание

систем и средств контроля и управления, основанных на описании технологических закономерностей процесса и влияния различных факторов на ход доменной плавки. Реализованные в 2003 году во время капитального ремонта I разряда ДП-9 «Криворожстали» новые технические решения: усовершенствованная АСУ ТП, включающая систему контроля остаточной толщины футеровки горна и лещади и теплового состояния горна по содержанию углерода в чугуне направлены на совершенствование технического и технологического уровня процесса, повышение эффективности доменной плавки и являются продолжением разработок ИЧМ, начатых в 70-х годах, под руководством проф. А.В.Праздникова.

Для повышения эксплуатационной надежности, увеличения продолжительности компании доменных печей большое значение имеет контроль состояния огнеупорной футеровки печи: ее толщины, тепловых нагрузок на кладку и холодильники. В состав разработанной ИЧМ системы автоматизированного контроля остаточной толщины футеровки горна и лещади и теплового состояния горна по содержанию углерода в чугуне входят следующие подсистемы: «Разгар», предназначенная для автоматизированного контроля остаточной толщины футеровки горна и лещади, процесса гарнисажеобразования; «Горн», предназначенная для контроля теплового состояния горна по содержанию углерода в чугуне и энthalпии шлака [2,3].

Подсистема «Разгар» базируется на использовании модели разгара футеровки доменной печи, включающей: модель разгара низа печи, которая вычисляет параметры, связанные с тепловым состоянием низа печи по результатам замера температуры термодатчиками, установленными в футеровке печи и по тепловым нагрузкам на контролируемые холодильники; модель разгара периферии по показаниям периферийных термопар. Износ футеровки горна контролируется с помощью составления трендов и графиков горизонтальных и вертикальных разгаров по различным сечениям, динамики изменения температуры и толщины футеровки по особо опасным участкам, определения скорости износа футеровки, динамики изменения тепловых нагрузок на контролируемые холодильники. В подсистеме «Разгар» реализуются следующие функции: отображение трендов изменения температуры кладки и скорости изменения средней температуры по горизонтам установки термопар; расчет тепловой нагрузки на центральный массив стакана лещади; расчет глубины разгара лещади; расчет интегральной тепловой нагрузки на зону контролируемых холодильников чугунных леток, горна и лещади (1 и 2-го рядов); расчет локальной тепловой нагрузки по уровням установки термопар; расчет остаточной толщины футеровки по уровням установки контролируемых холодильников и в местах установки термопар; расчет толщины гарнисажа; расчет скорости

износа футеровки горна и лещади; отображение горизонтальных профилей разгара футеровки по периметру горна печи по уровням установки термопар; отображение профиля разгара футеровки по высоте горна печи и по сечениям установки термопар (3-х мерное изображение).

Подсистема «Горн» позволяет контролировать тепловое состояние горна по содержанию углерода в чугуне и предназначена для оценки степени насыщенности чугуна углеродом и минимизации «моющей» способности чугуна по отношению к углеродистой футеровке доменной печи. В подсистеме «Горн» реализуются следующие функции: контроль расхода кокса на углерод, растворенный в чугуне; прогноз содержания углерода на линии насыщения при данных условиях ведения доменной плавки; контроль теплового состояния горна по теплосодержанию шлака и содержанию углерода в чугуне; контроль влияния содержания углерода в чугуне на стойкость углеродистой футеровки горна; минимизация взаимодействия чугуна с углеродистой футеровкой горна и лещади.

Дальнейшие исследования Института черной металлургии в области автоматизации доменного процесса будут направлены на разработку теоретических основ, алгоритмической базы, освоение средств контроля технологических параметров и развития на этой основе систем автоматического управления доменной плавкой [4]. Эта работа будет эффективной и плодотворной, если в ней будут объединены опыт, знания и стремление к совершенствованию ученых ИЧМ и инженерно-технического персонала «Криворожстали».

1. Некрасов З.И., Покрышкин В.Л., Нетребко П.Г., Рабинович Г.Б. Освоение работы доменной печи объемом 2000 м³ с применением обогащенного кислородом дутья и природного газа // Сб. научн. тр. ИЧМ. Том 32. М.: Металлургия, 1969. – С.13–33.
2. Канаев В.В., Панчоха Г.В., Шулико С.Т., Богачев Ю.А. Совершенствование технологического контроля состояния футеровки металлоприемника доменных печей // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.4. – Киев: Наукова думка, 2001. – С.290–294.
3. Кукса О.В., Тогобицкая Д.Н., Можаренко Н.М., Панчоха Г.В. Особенности влияния процессов растворимости углерода в чугуне на стойкость углеродистой футеровки // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – Вып.6. – Киев: Наукова думка, 2003. – С.79–85.
4. Доменное производство «Криворожстали». Монография колл. авторов под ред. чл.-корр. В.И.Большакова. ИЧМ, КГМК. Дн-ск, Кр. Рог. – 2004. – 378с.

Статья рекомендована к печати д.т.н. И.Г.Товаровским