

- обоснование оптимальных режимов ввода кусковых и прутковых (порошковых) добавок в ковш на УКП переменного тока с учетом переменных технологических параметров (вида, размера, состава добавки и скорости ее ввода, марки стали, вида и массы покровного шлака, интенсивности продувки расплава аргоном и его температуры) и определение продолжительности плавления (растворения), усреднения и усвоения добавок расплавом, т.е. продолжительности доводки ковшевой ванны по составу;

-определение общей и отдельных этапов продолжительности обработки стали на УКП переменного тока с учетом тепловых затрат на формирование синтетического рафинирующего шлака и усвоение корректирующих и модифицирующих добавок при оптимальных переменных технологических параметрах.

В данной статье приведена часть разработанной комплексной трехмерной математической модели обработки металла на УКП и результаты ее применения в исследованиях. Нижеприведенная часть модели описывает сопряженную задачу процессов гидродинамики металлической ванны и слоя синтетического рафинирующего шлака над ней в заполненном сталеразливочном ковше на УКП переменного тока с донным асимметричным однофурменным подводом диспергируемого аргона и верхним концентрированным подогревом шлакометаллического расплава трехфазной электрической дугой.

В данной работе при разработке математической модели гидродинамики расплава при донной аргоновой продувке применена методика, подробно освещенная в [3]. При разработке трехмерной математической модели приняты следующие допущения:

- шлакометаллический расплав (ШМР) в период аргоновой продувки представляет собой газожидкостную среду, являющуюся сплошной единой стратифицированной по плотности вязкой несжимаемой жидкостью;
- основным фактором, влияющим на характер движения ШМР, является подъемная сила, возникающая из-за неоднородности по плотности его компонентов;
- коэффициент газосодержания зависит от места расположения газового пузыря в пространстве и времени;
- на поверхности ШМР не происходят волновые процессы и его поверхность гладкая;
- сталеразливочный ковш имеет форму близкую к цилиндрической (для большинства промышленных сталеразливочных ковшей возможно сведение к цилиндрической форме с эффективным радиусом).

При разработке модели предполагается, что коэффициент газосодержания  $\alpha$  невелик, отношение плотностей вдуваемого газа ( $\rho_g$ ) и расплава ( $\rho_m$ ) пренебрежимо мало, плотность газовой фазы зависит лишь от давления. Математическая модель сопряженной задачи динамики жидкого металла и шлака в полости АКЭС при продувке диспергированным аргоном и работе теплового модуля имеет вид :

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial \tau} = R(\vec{V}, \alpha') - \nabla P', \quad (1)$$

$$\nabla \vec{V} = \Phi(\vec{V}, \alpha'), \quad (2)$$

$$\frac{\partial \alpha'}{\partial \tau} = -\nabla(\alpha' \vec{V}) + \Phi(\vec{V}, \alpha'), \quad (3)$$

$$R(\vec{V}, \alpha') = -(\nabla \vec{V}) \vec{V} + v_3(T) \Delta \vec{V} - \alpha' \vec{g}, \quad (4)$$

$$\Phi(\vec{V}, \alpha') = \Psi - \alpha' \xi \rho_m(T) \vec{g}(\vec{V} + \vec{W}) - \nabla(\alpha' \vec{W}), \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = -\vec{V}(\nabla T) + D_3 \Delta T + Q(r, \varphi, z) \quad (6)$$

где  $\vec{V}$  - барицентрическая скорость среды,  $t$  - время,  $P'$  - динамическая составляющая давления, отнесенная к плотности расплава,  $v_3$  - эффективный коэффициент вязкости,  $\vec{g}$  - ускорение свободного падения,  $\Psi$  и  $\vec{W}$  - объемный источник и диффузионная скорость газовой фазы,  $\xi = \frac{1}{\gamma \rho_2}$  ( $\gamma$  - показатель политропы),  $Q(r, \varphi, z)$

-объемный источник теплоты в горячей зоне, расходуемой непосредственно для нагрева металла и шлака до заданной температуры (по данным [2] доля всей теплоты дуг, расходуемой на нагрев металла составляет 42 %, а на нагрев шлака - 4,5 %).

Система уравнений (1-6) дополняется граничными условиями:

- на дне и стенках ковша - условия непротекания и свободного скольжения компонент шлакометаллического расплава;
- на свободной поверхности шлака - условие свободного перемещения;
- на границе шлак-металл - условия скольжения.

Поставленная сопряженная задача гидродинамики и теплопереноса в объеме металлической ванны решается методом расщепления по физическим факторам [3].

Исследуемые процессы рассмотрены для конструкции УКП переменного тока фирмы «Даниэли» емкостью 60 т (по металлу), эксплуатируемой в ЭСПЦ-3 ОАО «Днепроспецсталь».

На рис. 1-2 представлены схемы расположения технологических отверстий в крышке УКП и рассмотренных вариантов размещения донной продувочной фурмы ковша.

Рассмотрены три варианта расположения донной продувочной фурмы относительно технологических отверстий для ввода кусковых и прутковых добавок, порошковых проволок и пробоотборника, а также отверстий для ввода электродов нагревательного модуля, расположенных в крышке УКП.

Места расположения фурмы выбраны исходя из принятого заводом варианта (1) её размещения, а также варианта (2), предложенного фирмой "Даниэли" и сравнительного варианта (3), предложенного авторами как одного из используемых на металлургических предприятиях. Указанные варианты расположения донной продувочной фурмы определены с учетом конструктивного размещения крышных технологических отверстий УКП.

Исследования выполнены при варьировании следующими переменными технологическими параметрами: маркой стали (85Г и 17Г1С); видом покровного шлака (первичный электропечной или синтетический рафинирующий из ТШС на основе СаО-СаF<sub>2</sub> или СаО-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) и его количеством (0,3 т - первичного и 1,3 т - синтетического); скоростью нагрева расплава (2 и 5<sup>0</sup>С/мин) и интенсивностью его продувки аргоном (50-600 л/мин).

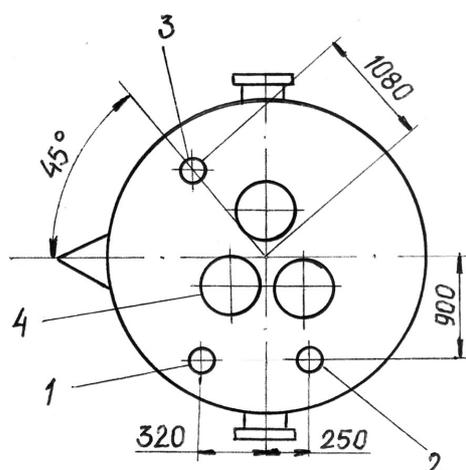


Рис. 1. Схема расположения технологических отверстий в крышке У КП переменного тока: 1 – отверстие для отбора проб и температуры; 2 – отверстие для ввода кусковых добавок; 3 – отверстие для ввода прутковых добавок через трайбаппарат; 4 – отверстия для ввода электродов

Исследования процессов гидродинамики расплава проводились для разных условий при идентичности геометрических размеров донной продувочной фурмы.

Влияние места расположения фурмы (варианты 1 и 3) на характер гидродинамической картины ковшевой ванны на У КП переменного тока рассматривалось на примере стали указанных марок при нагреве металла со скоростью  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и интенсивности продувки аргоном – 100 л/мин. При этом для стали 85Г масса первичного покровного шлака составляла 0,3 т (толщина слоя – 2 см), для стали 17Г1С масса синтетического рафинирующего шлака составляла 1,3 т (толщина слоя – 10 см).

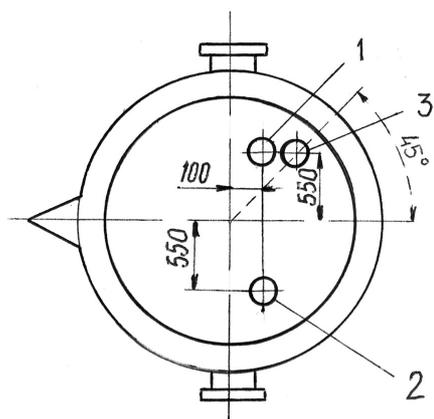


Рис. 2. Варианты расположения донной продувочной фурмы ковша на У КП переменного тока: 1 – по технологии завода; 2 – рекомендованная фирмой-производителем; 3 – используемый предприятиями вариант расположения фурмы

На примере стали 85Г дополнительно исследовалось влияние изменяющейся интенсивности продувки расплава аргоном (50 и 100 л/мин) при расположении фурмы по варианту 3 на гидродинамику металла в ковше при нагреве ванны со скоростью  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  и сло-

ем первичного шлака толщиной 10 см (масса – 1,3 т), а также влияние скорости нагрева расплава и толщины слоя (количества) покровного шлака на характер гидродинамической картины ковшевой ванны.

На рис. 3 представлена схема выбранных для рассмотрения вертикальных сечений ковша.

Исследования гидродинамической картины расплава в зонах ввода кусковых (сечение Г–Г) и прутковых (сечение В–В) добавок (рис. 3) в зависимости от интенсивности продувки аргоном при разном расположении продувочной фурмы (варианты 1 и 2) проводились для вышеуказанных марок стали. При этом рассматривались условия со слоем первичного шлака в ковше 2 см и скоростью нагрева расплава  $5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$  – для стали 85 Г. Условия для стали 17Г1С: слой синтетического шлака – 10 см, скорость нагрева расплава –  $2^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ .

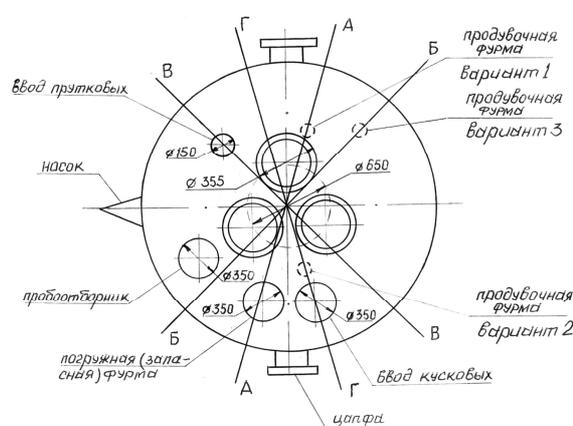


Рис. 3. Схема вертикальных сечений ковша на У КП переменного тока, выбранных для исследования гидродинамики

Эпюры поля скоростей разных вертикальных сечений ковша (В–В и

Г–Г) на примере стали 17Г1С по результатам вышеуказанных исследований приведены для тех половин сечений, где расположено соответствующее технологическое отверстие (рис. 4, 5).

Из результатов исследований следует, что независимо от марки стали, вида и толщины слоя покровного шлака, а также скорости нагрева расплава и интенсивности его продувки аргоном через пористую донную фурму (независимо от варианта её расположения), характерным является образование макровихревой структуры в зоне радиально противоположной аргонной фурме и, соответственно, зоне восходящего движения металла, вовлекаемого в спутное движение всплывающими пузырями аргона в зоне над донной пробкой. Масштаб зоны восходящего течения металлического расплава в значительной степени определяется интенсивностью продувки.

Исследованиями установлено, что зоны оголения зеркала металла в процессе продувки расплава аргоном могут возникать в области непосредственно под дугой и в области над донной фурмой. Расчетным путем установлено, что оголение зеркала металла наступает при толщине слоя покровного шлака 2 см при интенсивно-

сти продувки 400 л/мин, а при толщине слоя шлака 10 см (независимо от его вида и состава, марки стали) – при интенсивности продувки 650 л/мин.

таллического расплава, что в свою очередь должно несколько форсировать процесс их расплавления.

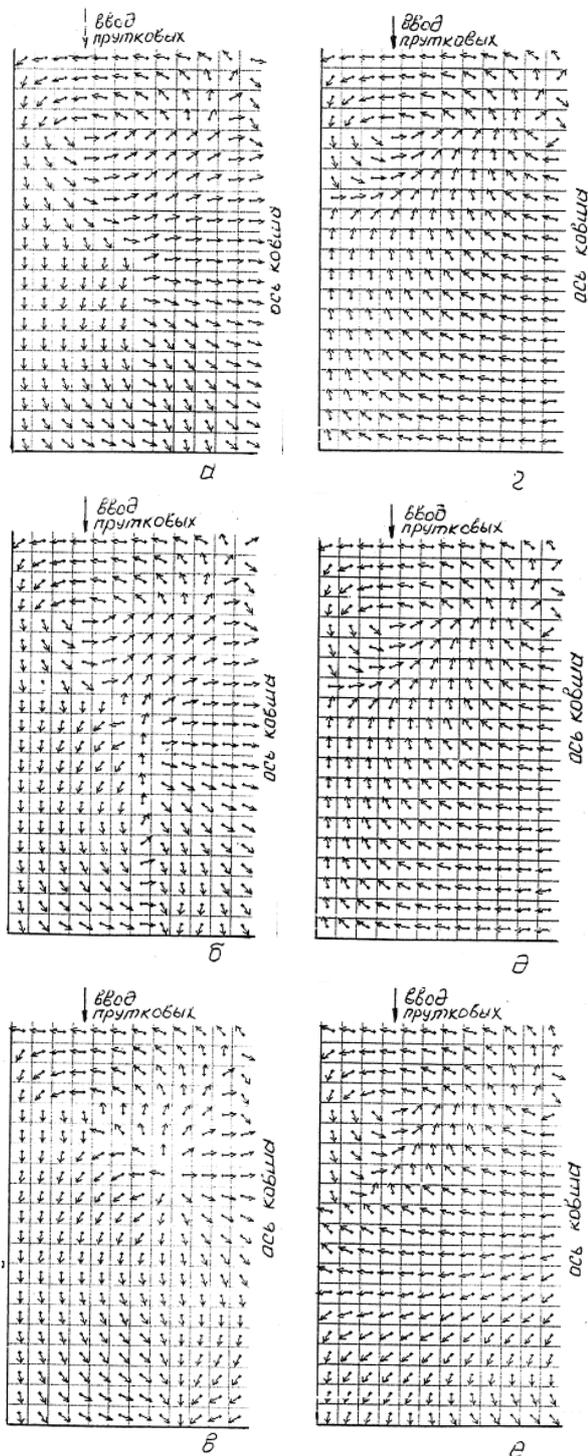
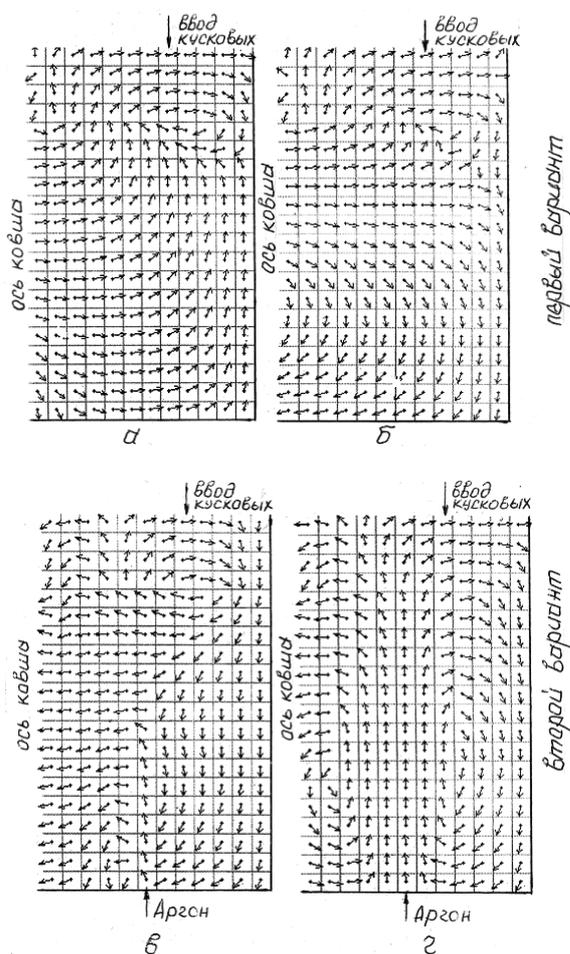


Рис. 4. Эпюры поля скоростей вертикального сечения (Г–Г) расплава в ковше со сталью 17Г1С при продувке аргоном по вариантам расположения фурмы 1 (а, б) и 2 (в, г). Интенсивность продувки для а и в – 50 л/мин., для б и г – 600 л/мин.

Рис. 5. Эпюры поля скоростей вертикального сечения (В–В) расплава в ковше со сталью 17Г1С при продувке аргоном по вариантам расположения фурмы 1 (а, б, в) и 2 (г, д, е). Интенсивность продувки для а, г – 50 л/мин., для б, д – 100 л/мин., для в и е – 600 л/мин.

Анализ численных исследований гидродинамики расплава по вертикали в ковше в процессе его продувки аргоном при включенном тепловом модуле и расположении фурмы по вариантам 1 и 2 и результатов аналогичных исследований для варианта 3 показывают, что в зоне ввода в ковш ТШС и других кусковых материалов поле скоростей расплава формируется таким образом, что попадающие в ковш добавки, независимо от варианта расположения фурмы, увлекаются в спутное движение не в зону теплового воздействия электрических дуг, а в противоположном направлении, что может в определенной степени снизить эффективность процесса формирования синтетического шлака и плавления (растворения) кусковых материалов. Однако попавшие в ковш куски твердых материалов, обладающие кинетической энергией за счет их движения по желобу, в результате падения попадают в противоток потокам ме-

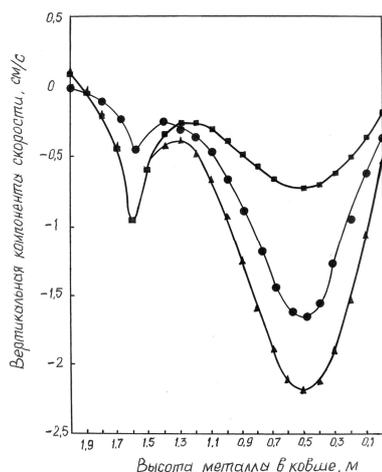


Рис. 6. Эпюра вертикальной компоненты скорости ( $V_v$ ) по оси отверстия для ввода прутковых материалов в ковш со сталью 17Г1С при расходе аргона 100 л/мин. и скорости нагрева 50С/мин при разных вариантах расположения донной продувочной фурмы: кружок – вариант 1; кубик – вариант 2; треугольник – вариант 3

При расположении фурмы по варианту 2 вертикальная гидродинамическая картина расплава в зоне ввода кусковых материалов выглядит приблизительно аналогично той, что и при расположении фурмы по вариантам 1, 3.

С целью количественной оценки потоков скоростей в зависимости от места расположения фурмы нами была рассчитана вертикальная компонента скорости по осям ввода кусковых добавок и прутковых материалов в ковш ( $V_v$ ).

Скорости потоков ( $V_v$ ), как свидетельствуют результаты расчетов, вовлекающих куски в спутное движение к стенке ковша, имеют более высокие абсолютные значения (на 3–22 % отн., в среднем на 12 % отн.) при расположении фурмы по варианту 2 в сравнении с вариантом 1. Это свидетельствует о том, что в этом случае (вариант 2) происходит более интенсивное омывание вводимых материалов, что должно способствовать ускорению формирования шлака и расплавления (растворения) кусковых добавок по сравнению с вариантами 1 и 3 расположения фурмы. Однако окончательный вывод о преимуществах того или иного варианта расположения продувочной фурмы будет сделан после анализа тепло-, массообменных процессов и их сопоставления с вышеприведенными результатами.

Результаты сравнительной оценки гидродинамической картины в зоне ввода прутковых материалов с качественных позиций выглядят приблизительно идентично для сравниваемых вариантов расположения донной фурмы. Однако расчетные данные ( $V_v$ ) по оси ввода (рис. 6) свидетельствуют о том, что более благоприятным для интенсификации расплавления (растворения) прутковых материалов является вариант 1, где отмечены наибольшие значения ( $V_v$ ) из трех сравниваемых вариантов.

В связи с тем, что рассмотренное выше количественное описание гидродинамической картины по одной из компонент скорости расплава по отдельным осям (вертикальные оси для ввода прутковых и кусковых

добавок) не дают полной картины для численного анализа процесса в целом сечении и, тем более, в объеме ковша, дополнительно для рассматриваемых марок сталей и технологических вариантов рассчитана средняя суммарная относительная скорость потоков на границе "шлак–металл" ( $V_0$ ). Указанный численный анализ осуществлялся также для определения влияния расхода аргона на величину ( $V_0$ ).

Такой оценочный критерий ( $V_0$ ) был выбран из соображений количественной оценки конвективной составляющей обменных процессов, происходящих на границе "шлак–металл".

Результаты определения значений ( $V_0$ ) на границе "шлак–металл" для сравниваемых вариантов расположения донной фурмы (1-3) в ковше со сталью 17Г1С при скорости нагрева расплава 2<sup>0</sup>С/мин приведены на рис. 7.

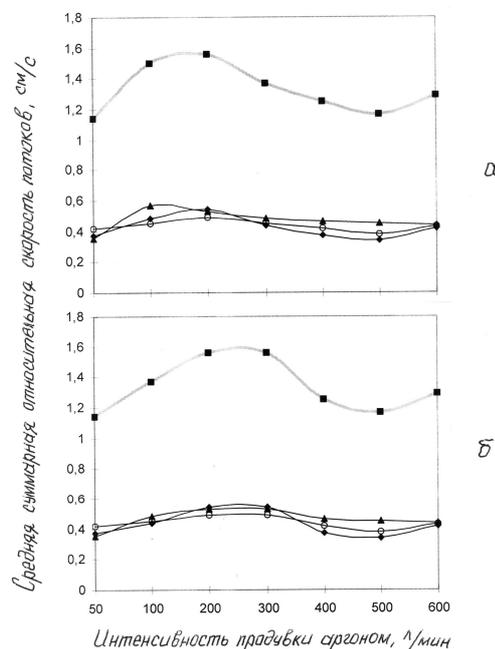


Рис. 7. Влияние интенсивности продувки на величину средней суммарной относительной скорости ( $V_0$ ) на границе "шлак–металл" для стали 17Г1С при толщине синтетического шлака – 10 см. Расположение фурмы по вариантам 1 или 2 (а) и по варианту 3 (б) Условные обозначения: ромб – радиальная; треугольник – угловая; кольцо – вертикальная; квадрат – суммарная

Сопоставительным анализом полученных для стали разных марок значений ( $V_0$ ) определено, что максимальные значения указанного критерия (1,5–1,8 см/с) обеспечиваются для вариантов 1 и 2 расположения фурмы при более низких расходах аргона (100–200 л/мин) по сравнению с вариантом 3, где для обеспечения указанных значений ( $V_0$ ) необходимы повышенные расходы аргона (200–400 л/мин).

Таким образом, результаты исследований гидродинамики турбулентной ковшевой ванны на УКП при верхнем концентрированном нагреве ШМР электродугой переменного тока с асимметричной его продувкой диспергированным аргоном свидетельствуют о том, что место расположения донной фурмы в значительной степени характеризует не только качественную картину направ-

ления потоков расплава в ковше, но и определяет величину скорости их движения.

Предварительно установлено, что для интенсификации процессов формирования рафинирующих шлаков из ТШС и сокращения продолжительности плавления (растворения) кусковых добавок, вводимых в ковш, рациональным является расположение продувочной фурмы по вариантам 1 или 2. В то же время показано, что для интенсификации плавления (растворения) прутковых материалов предпочтительнее выглядит расположение донной фурмы по варианту 1, а для интенсификации плавления (растворения) кусковых добавок – вариант 2.

Полученные результаты требуют уточнения при исследовании тепло-, массообменных процессов.

#### Выводы

1. Разработана комплексная трехмерная математическая модель гидродинамики заполненной ковшевой ШМР ванны на УКП переменного тока емкостью 60 т.
2. Численными исследованиями предварительно оценены рациональные варианты расположения донной продувочной фурмы ковша на УКП переменного тока, установлены критические, с точки зрения оголения зеркала металла, значения расхода аргона и определено влияние переменных технологических параметров на характер процессов гидродинамики.
2. Производство стали на агрегате ковш – печь / Д.А. Дюдкин, С.Ю. Бать, С.Е. Гринберг и др. – Донецк : ООО «Юго – Восток» ЛТД, 2003, 300 с.
3. Огурцов А.П., Самохвалов С.С. Математичне моделювання теплофізичних процесів у багатофазних середовищах. – Київ: Наукова думка. – 2001, 410 с.
4. Ровнушкин В.А., Ильин В.И., Фетисов А.А. Кинетические закономерности окислительно - восстановительных реакций при обработке стали синтетическими шлаками на установке ковш – печь // Тр. VII конгресса сталеплавателей, г. Магнитогорск, 15 – 17 октября 2002 г. Ассоциация сталеплавателей, - М.: ОАО «Черметинформация». – 2003. С. 439 – 443.
5. Кучаев А.А. Экспериментальное исследование и компьютерное моделирование температурного поля в установке ковш-печь // Металл и литье Украины. – 2003. - № 1-2. С. 34 – 39.
6. Термодинамика и кинетика процессов в сверхмощных ДСП и принципы интенсификации и оптимизации выплавки и внепечной обработки стали / С.А. Храпко, И.В. Деревянченко, А.В. Гальченко и др. // Тр. VII конгресса сталеплавателей, г. Магнитогорск, 15 – 17 октября 2002 г. Ассоциация сталеплавателей, - М.: ОАО «Черметинформация». – 2003. С. 297 – 303.
7. Разработка математической модели теплоэнергетических процессов в агрегате «печь – ковш» для создания АСУ / О.Н. Кукушкин, С.В. Бейцун, А.В. Жаданос и др. // Сб. науч. тр. Национального горного университета. – 2004. - № 19, Т. 2. С. 177 – 182.
8. Математическая модель нагрева расплава на установке «печь – ковш» / О.Н. Кукушкин, С.В. Бейцун, А.В. Жаданос // Математичне моделювання. – 2004. - № 1 (11). С. 52 – 55.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Основные направления исследований технологии обработки стали на агрегате «ковш – печь» / В.А. Вихлевщук, В.П. Пиптюк, В.Ю. Болотов, И.А. Павлюченков // Сб. Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. – 2004. – Вып. 8. С. 189 – 195.

пост. 04.05.05

## Методы повышения достоверности данных в автоматизированных системах управления

*В.В. КРАМАРЕНКО, В.В. ЗАВГОРОДНИЙ, С.А. ГОЛУБЕВ*

Днепродзержинский государственный технический университет

Обоснованы возможность и целесообразность создания стандартных процедур логического контроля данных; разработаны и исследованы эффективные методы организации данных многоуровневой сложной сетевой структуры; получены сравнительные оценки методов по критериям объема памяти и продолжительности контрольной проверки.

Обґрунтовані можливості та цілісообразність створення стандартних процедур логічного контролю даних; розроблені та досліджені ефективні методи організації даних багаторівневої складної мережної структури; отримані порівнювальні оцінки методів по критеріям об'єму пам'яті та тривалості контрольної перевірки.

Possibility and expedient of creation of standard procedures of data's logic control are substantiated; effective methods of data's organizations of multilevel complex net structure are developed and examined; comparative assessments of methods on criteria of memory's volume and continuation of control check are received.