

Таким образом, проведенные расчеты нагрева рельсовых накладок в первой зоне проходной печи подтверждаются результатами экспериментального определения температуры газов на входе заготовок в печь.

Разработанная методика определения температурного поля в газовой фазе и в металле, основанная на использовании концепции С. Н. Шорина, позволяет осуществить количественную оценку возникающей в нагреваемых заготовках термической неоднородности и оценить благоприятное воздействие рационального размещения горелочных устройств на устранение или, по крайней мере, на существенное снижение степени термической неоднородности нагреваемых заготовок.

УДК 669.36

**О. В. Порох<sup>1</sup>, Г. В. Воронов<sup>1</sup>, А. Н. Алексеев<sup>2</sup>, Р. В. Дзюбайло<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»,

Институт материаловедения и металлургии,

кафедра «Теплофизика и информатика в металлургии», г. Екатеринбург, Россия,

<sup>2</sup> ОАО «Уралэнергочермет», г. Екатеринбург, Россия

## **АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С РАСПЛАВОМ МЕДИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕДНОЙ КАТАНКИ**

### **Аннотация**

*В статье описана технологическая схема производства медной катанки с использованием в качестве топлива природного газа. При таком способе производства медной катанки периодически возникают неконтролируемые изменения качества меди по содержанию кислорода и водорода. Для анализа этой проблемы была предложена модель-схема возможных основных реакций массообмена между расплавом меди и газовой фазой над расплавом. Рассмотрены зависимости констант равновесия реакций  $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$ ,  $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ,  $2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$ , протекающих в газовой фазе над расплавом меди. Предложено уточнить методику расчета состава исходного природного газа с учетом его влагосодержания ( $d$ , г/м<sup>3</sup> сухого газа). Разработан алгоритм расчета горения природного газа с введением поправок на диссоциацию  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$ . Проведены расчеты и построены графики зависимости содержания водяного пара и диоксида углерода, с учетом их диссоциации и концентрации в продуктах сгорания природного газа, от температуры и коэффициента расхода воздуха.*

*Ключевые слова: медь, медная катанка, степень диссоциации, реакция диссоциации.*

### **Abstract**

*The article describes the technological scheme of production of copper wire rod, using natural gas as fuel. By using this method of production of copper rod uncontrolled changes of oxygen*

*and hydrogen content in copper periodically occur. To analyze this problem, a model of a possible key reactions mass transfer between the copper melt and the gas phase above the melt is presented. The dependences of the equilibrium constants of the reaction  $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$ ,  $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ,  $2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$  occurring in the gas phase above the melt copper are considered. It is requested to clarify the methodology of calculation of initial natural gas because of its water content ( $d$ , g/m<sup>3</sup> dry gas), and developed an algorithm for calculating the combustion of natural gas with the introduction of amendments to the dissociation of  $\{CO_2\}$  and  $\{H_2O\}$ . Calculations are made and the results are plotted as water vapor and carbon dioxide, according to their concentration in the dissociation and combustion of natural gas, the temperature and air flow rate.*

Медная катанка предназначена для производства электротехнических изделий, преимущественно кабельной продукции, и, в основном, выпускается методом непрерывного литья и прокатки из катодной меди марки М00к по ГОСТ 859–2001 [7].

В данной работе рассмотрена технология «Contirod» с использованием природного газа в качестве источника тепловой энергии. Особенностью этой технологии является необходимость учитывать химический состав дымовых газов, соприкасающихся с поверхностью жидкой меди, и режим аэродинамического потока, которые определяют массообмен и теплообмен между газовой средой и поверхностью расплава меди. Природный газ вносит дополнительные возмущения в механизм массообмена продуктов сгорания и движущейся поверхности потока жидкой меди.

Генерация теплоты в данном случае связана с образованием дымовых газов, химический состав которых может изменяться в зависимости от многих факторов. Одновременно режим аэродинамического потока газовой среды и контакт ее с поверхностью потока жидкой меди в существенной мере определяют массообмен и теплообмен на границе раздела жидкой и газовой среды. Периодически происходящее внезапное появление брака при производстве катанки, связанного с резким изменением содержания водорода [H] и кислорода [O] в меди, подтверждают такое предположение.

Неконтролируемые и случайные изменения в показателях брака катанки не находят аргументированного объяснения. Однако, очевидно, что, по какой-то причине происходит изменение химического состава продуктов сгорания. На первом этапе анализа подобных периодически возникающих ситуаций нами предложено уточнить методику пересчета состава исходного природного газа так, чтобы учесть содержание в нем воды ( $d$ , г/м<sup>3</sup> сухого газа) и методику расчета горения природного газа, чтобы учесть процессы диссоциации диоксида углерода  $\{CO_2\}$  и водяного пара  $\{H_2O\}$  при оценке влагосодержания воздуха, подаваемого на горение.

Переход водорода и кислорода в расплав меди происходит в результате процессов массообмена, протекающих между поверхностью движущегося расплава и потоком газовой среды, соприкасающейся с расплавом.

Растворимость водорода в меди зависит от его концентрации в газовой среде над расплавом и температуры расплава меди. Парциальное давление водорода может изменяться в широких пределах, но для расчетов с достаточной точностью можно принять это давление равным парциальному давлению водяных паров.

Количество водорода, которое может раствориться в меди непосредственно связано с содержанием кислорода как в расплаве меди, так и в атмосфере над расплавом. Кислород яв-

ляется наиболее активным газом по отношению к меди, он может находиться и в растворенном состоянии, и образовывать оксиды.

Известно, что медь не растворяет соли и оксиды других металлов, а растворяет только свои низшие оксиды и соединения, обладающие полупроводниковыми свойствами [3], таким образом, в расплаве рафинированной меди может присутствовать как растворенный атомарный кислород, так и оксиды меди.

Следует отметить, что на поверхности расплава происходит реакция водяного пара и меди:  $[Cu] + H_2O = [Cu] + 2[H] + [O]$ .

Медь поглощает освобождающийся при реакции разложения кислород, и в атмосфере над расплавом возникает парциальное давление водорода, которое обратно пропорционально содержанию кислорода в расплаве. Соответственно, количество растворенного водорода зависит не только от содержания кислорода в расплаве и его температуры, но и от давления водяного пара над расплавом.

Основные реакции, происходящие с продуктами сгорания природного газа над расплавом, и уравнения констант равновесия этих реакций приведены ниже [1].

Реакция 1:  $2H_2 + O_2 \leftrightarrow 2H_2O$ ;

$$k = \frac{(H_2O)^2}{(H_2)^2(O_2)};$$

$$\lg k = \frac{25116,1}{T} - 0,9466 \lg T - 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714;$$

Реакция 2:  $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$ ;

$$k = \frac{(CO_2)(H_2)}{(CO)(H_2O)};$$

$$\lg k = \frac{-2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 0,09738 T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098;$$

Реакция 3:  $2CO + O_2 \leftrightarrow 2CO_2$ ;

$$k = \frac{(CO_2)^2}{(O_2)(CO)^2};$$

$$\lg k = \frac{-29530,5}{T} - 2,769 \lg T + 0,001225 T - 1,356 \cdot 10^{-7} T^2 - 2,15.$$

Графики зависимости констант равновесия реакций, рассмотренных выше, от температуры приведены на рис. 1.

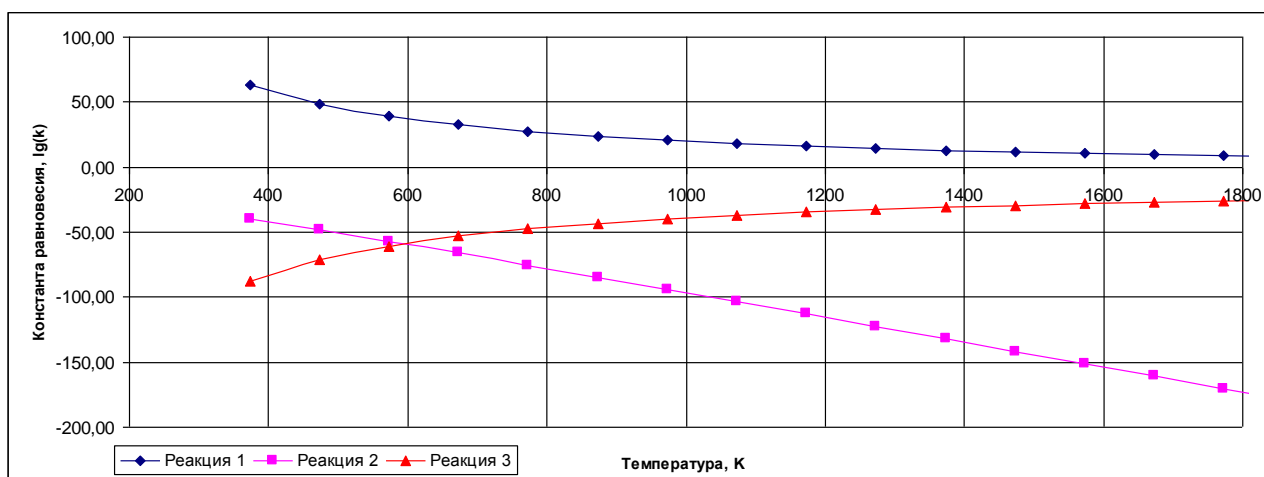


Рис. 1. Зависимость констант равновесия реакций окисления  $H_2$  и  $CO$  с кислородом и реакции между  $H_2O$  и  $CO$  от температуры

Далее, используя эмпирические зависимости степени диссоциации водяного пара и диоксида углерода от их концентрации в продуктах сгорания при различных температурах (рис. 2 и 3), рассмотрим, как будет изменяться состав анализируемых продуктов сгорания при:

- 1) изменении температуры и постоянном коэффициенте соотношения газ-воздух (рис. 4);
- 2) постоянной температуре и изменяющемся коэффициенте соотношения газ-воздух (рис. 5).

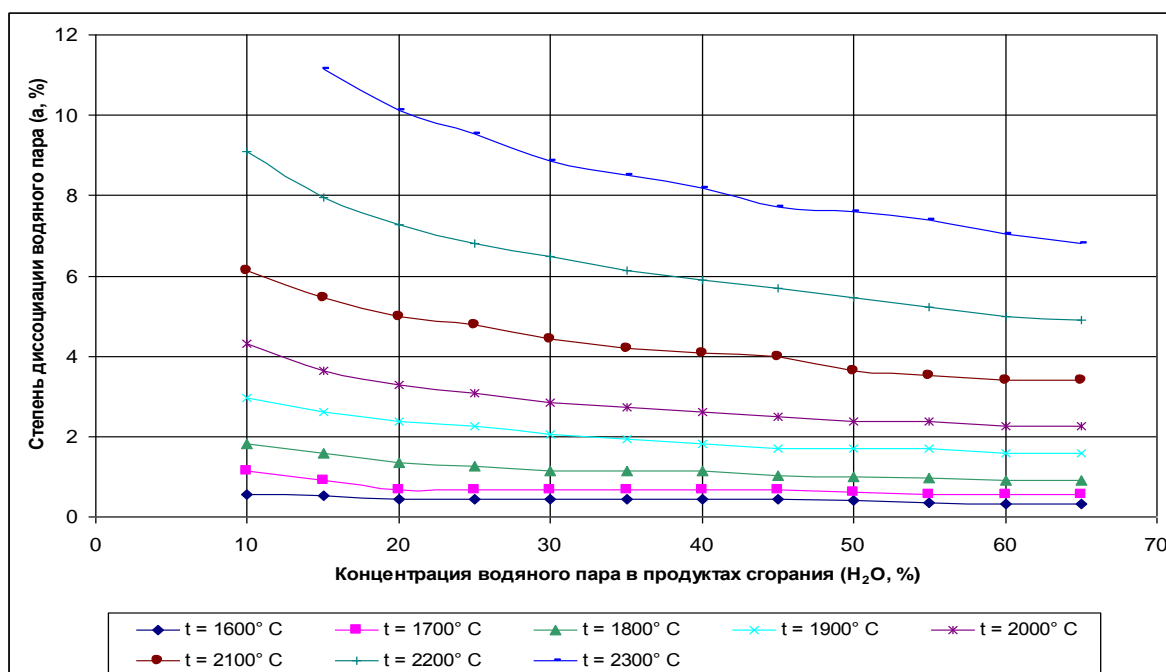


Рис. 2. Зависимость степени диссоциации водяного пара (а, %) от его концентрации в продуктах сгорания при различных температурах

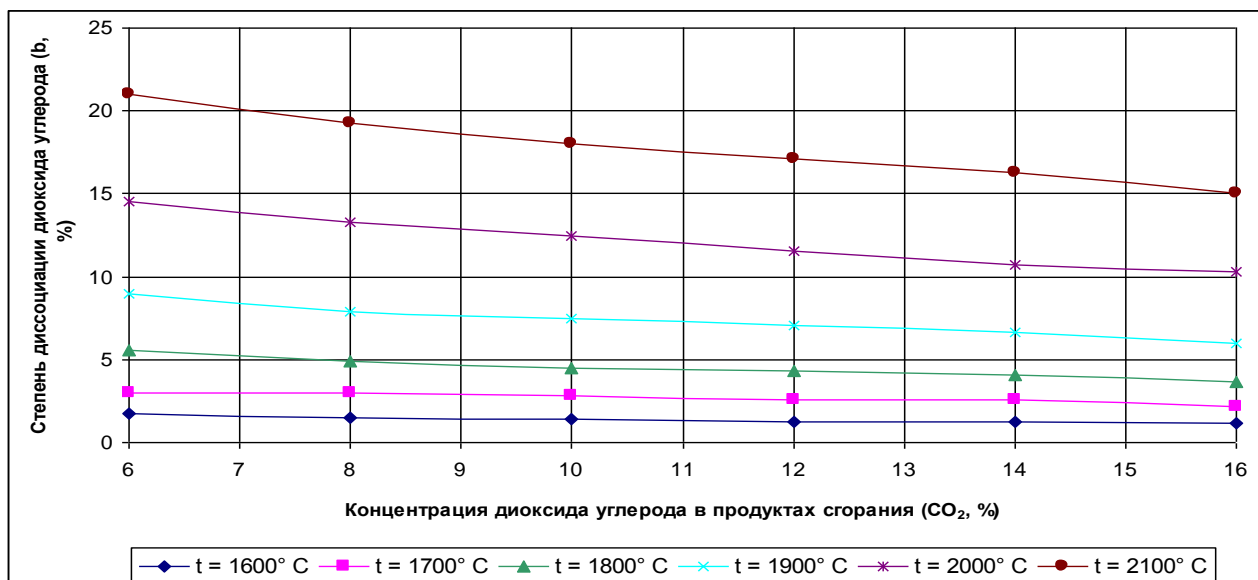


Рис. 3. Зависимость степени диссоциации диоксида углерода ( $b$ , %) от его концентрации в продуктах сгорания при различных температурах

Баланс водяных паров, образующихся при сжигании углеводородов, влагосодержания природного газа и воздуха, подаваемых на горение, позволяет оценить возможные пути перехода водорода в медь. Таким образом, можно сделать вывод, что водяные пары – единственный поставщик водорода в медь при условии полного выгорания углеводородов.

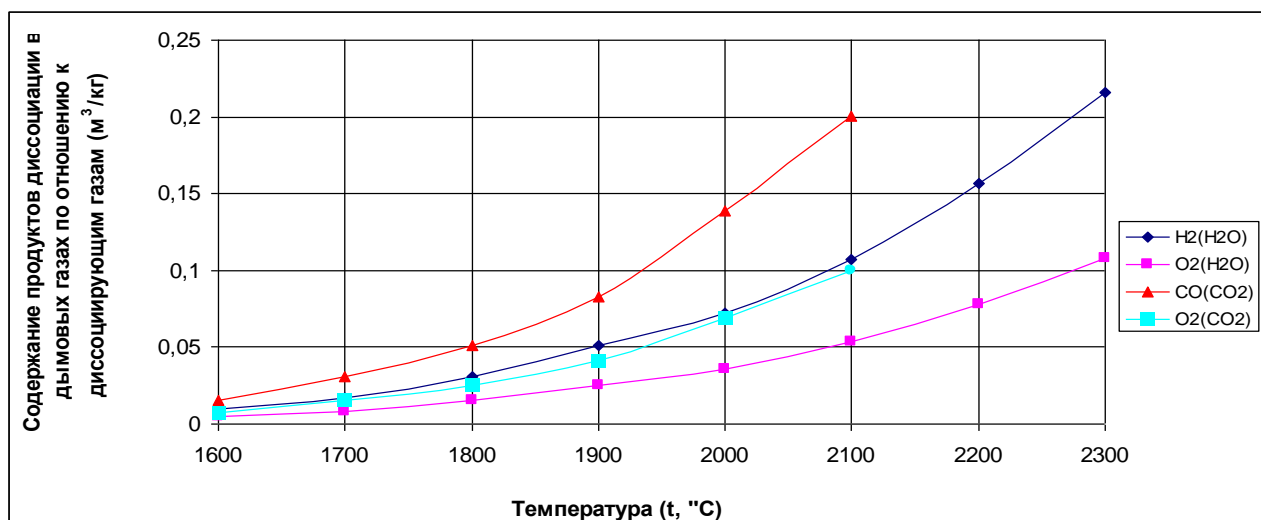


Рис. 4. Изменение содержания продуктов диссоциации при постоянном коэффициенте соотношения газ-воздух и изменяющейся температуре газовой среды

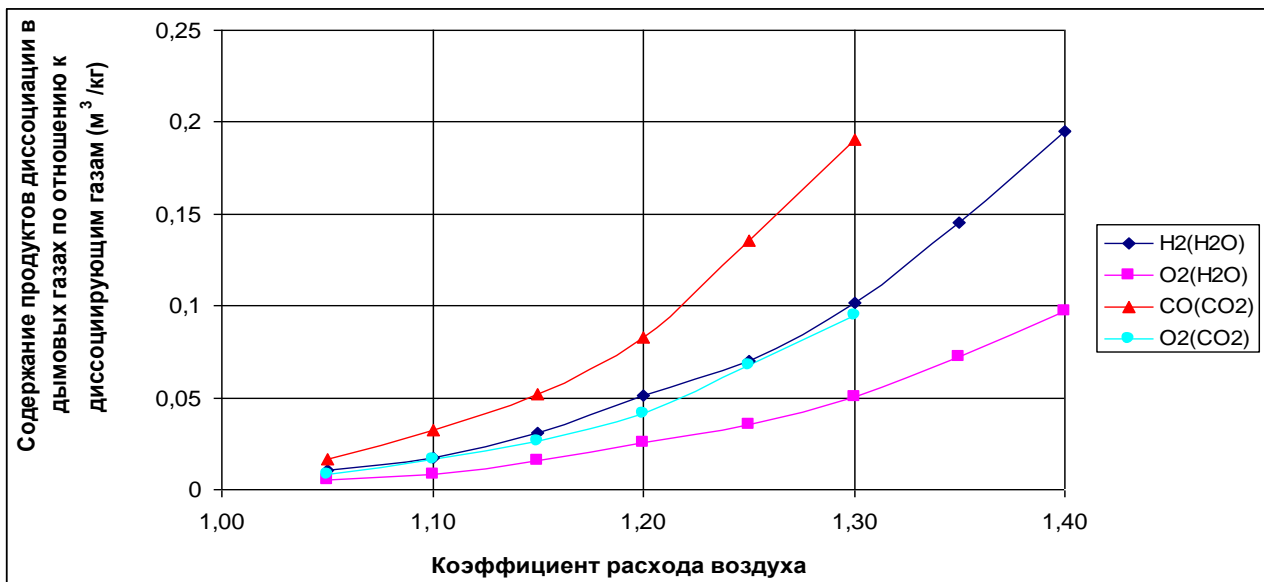


Рис. 5. Изменение содержания продуктов диссоциации при постоянной температуре газовой среды (1600 °С) и изменяющемся коэффициенте соотношения газ-воздух

Равновесная концентрация свободного кислорода в продуктах сгорания природного газа зависит не только от его избыточного количества, коэффициента расхода воздуха, степени диссоциации  $\{CO_2\}$  и  $\{H_2O\}$ , но и от возможной реакции взаимодействия водяного пара с жидкой медью при непосредственном их контакте.

Число Рейнольдса характеризует режим течения потока жидкой меди в литейном желобе. Информация о режиме течения позволяет оценить влияние состава футеровки желоба на химический состав меди, т. к. при ярко выраженном турбулентном характере потока будет наблюдаться интенсивная эрозия футеровки и смешивание частиц футеровки с расплавом.

Число Рейнольдса для рассматриваемого случая.

$$Re = \frac{WR}{\nu} = \frac{WR\rho}{\mu} = \frac{GR}{S\mu},$$

где  $W$  – средняя скорость потока, м/с;

$R$  – гидравлический радиус, м,  $R = S * h / (2h + S) = 0,00984$  м;

$h$  – толщина слоя жидкой меди, 0,01 м;

$S$  – ширина желоба, 0,6 м.

$G$  – производительность линии, 50 т/ч = 13,88 кг/с.

$\mu$  – динамическая вязкость меди при температуре 1100 °С, 0,00333 Па\*с;

$W = G / (S * \rho) = 0,277$  м/с;

$\nu = \mu / \rho$ , где  $\rho$  – плотность жидкой меди при 1100 °С, кг/м<sup>3</sup>.

$$Re = \frac{13,88 * 0,984 * 10^{-2}}{0,01 * 0,6 * 0,00333} = 6835,8.$$

Число Рейнольдса равно 6835,8. Таким образом, можно сделать вывод о переходном режиме потока жидкой меди в желобе.

Толщина пограничного слоя на поверхности футеровки возрастает в зависимости от его длины и может быть определена по формуле  $\delta = \frac{L}{\sqrt{Re}}$ , где  $L$  – длина желоба, м.

На рис. 6 приведена зависимость изменения толщины пограничного слоя по длине желоба.

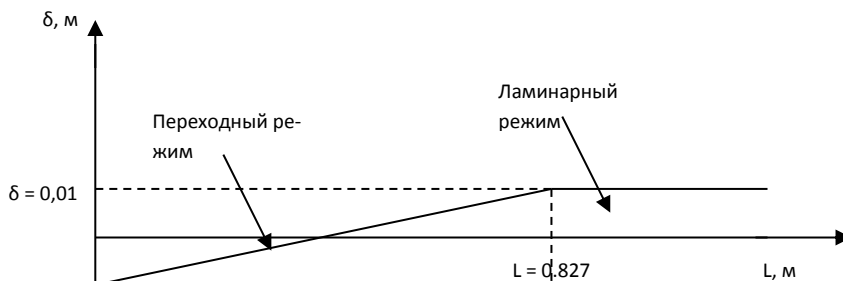


Рис. 6. Зависимость изменения толщины пограничного слоя по длине желоба

Длина рассматриваемой части литейного желоба составляет 2,4 м, как видно из рис. 6, через 0,824 м пограничный слой занимает все сечение потока, режим движения среды становится ламинарным. Следовательно, можно сделать следующие предварительные выводы:

1. Футеровка желоба не будет участвовать в массообмене с потоком, т. к. не происходит процесс интенсивного истирания.

2. Массообмен жидкой меди сосредоточен на границе с газовой фазой и в большей мере зависит от режима потока газовой фазы и перепада температур между жидкой и твердой фазами.

### Список использованных источников

1. Есин О. А., Гельд П. В. Реакции между газообразными и твердыми фазами. – 2-е изд., испр. и доп. – Свердловск: Metallurgizdat. Свердлов. отд-ние, 1962. Ч. 1. – 671 с.
2. Фромм Е. Газы и углерод в металлах / пер. с нем. В. Т. Бурцева; под ред. Б. В. Линчевского. – М.: Metallurgia, 1980. – 711 с.
3. Коган Я. Д. и др. Константы взаимодействия металлов с газами: Справочник / под ред. Б. А. Колачева, Ю. В. Левинского. – М.: Metallurgia, 1987. – 367 с.
4. Лякишев Н. П. Диаграммы состояния двойных металлических систем : Справочник : В 3 т. Т. 2 / под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М.: Машиностроение, 1997. – С. 252.
5. Галдин Н. М. Цветное литье: справочник. – М.: Машиностроение, 1989. – 527 с.
6. Булер П. Физико-химическая термодинамика вещества. – СПб.: Янус, 2001. – 192 с.
7. Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: справочник. – М.: Машиностроение, 2004. – С. 7–8 .