

УДК 669.041

А. А. Ансимов

*Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Э. Э. Меркер
Старооскольский технологический институт им. А. А. Угарова*

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОЦЕНКИ ВЛИЯНИЯ ТЕПЛООБМЕНА НА РЕЖИМ ОБЖИГА ИЗВЕСТНЯКА ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В статье рассматриваются результаты исследования влияния теплообмена на режим обжига известняка во вращающейся печи с использованием метода расчетов критериев лучистой и конвективной теплоотдачи и влияния на них длины, температуры и других характеристик топливного факела. Исследованы условия теплообмена в системе факел–известняк с определением эффективной температуры в рабочем пространстве печи и оптимальной температуры известняка в зоне обжига агрегата. Установлено влияние показателей качества промышленной извести на шлаковый режим при электроплавке стали в дуговой печи.

Вращающаяся печь, режим обжига, известь, известняк, температура, шлакообразование.

The article deals with studying the influence of heat transfer on the mode of burning limestone in a rotary kiln using a calculation method of criteria of radiant and convective heat transfer and the influence of length, temperature, and other characteristics of the fuel torch. The author researched the conditions of heat exchange in the system of the torch-limestone with the definition of the effective temperature in the working space of the furnace and the optimum temperature of the limestone in the firing area of the unit. The researcher showed the influence of quality indicators of industrial lime on the slag mode when the electric smelting of steel in electric arc furnaces.

Rotary furnace, regime of kilning, lime, limestone, temperature, slag formation.

Введение.

Целью работы является анализ результатов исследования влияния температурных условий режима обжига известняка во вращающейся печи на показатели качества промышленной извести, используемой в сталеплавильном производстве.

Исследования проводили [6] на вращающихся печах обжига известняка [1] для получения промышленной извести, необходимой в металлургическом производстве [4]. В технологии обжига во вращающейся печи [6], [1] известняк нагревают до температуры 900–1300 °С, при которой происходит термическая диссоциация по реакции $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \uparrow$ и для полного разложения карбоната кальция с получением 1 кг CaO теоретически потребуется 100,09/56,08 = 1,786 кг CaCO₃. Причем для разложения 1 кг CaCO₃ требуется 1780 кДж теплоты, а для получения 1 кг CaO требуется 1780×1,786=3185 кДж тепла.

Основные показатели работы печи, такие как производительность по извести, удельный расход топлива, расход сырья и другие, определяются условиями теплообмена [1], [3] и параметрами обжига, т. е. температурами обжига материала ($T_{\text{о.м.}}$, °С), уходящих газов ($T_{\text{ух.}}$, °С), выгружаемой из печи извести ($T_{\text{из.}}$, °С), а также скоростью и давлением (разряжением) газов, химическим составом газов и известняка. При постоянной производительности печи каче-

ство обожженного известняка определяется развитием теплообмена в рабочем пространстве агрегата, т. е. существует зависимость между качеством обожженного сырья и параметрами тепловой работы печи [1], [4].

Основная часть.

Для изучения условий теплообмена [6], [1] и характера изменения температуры сыпучего материала в печи использовали следующие критерии:

$$B_o = \frac{q \cdot G}{\sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T_r^4 \cdot F}, \quad C_k = \frac{\text{Re}^{0.8} \cdot \lambda \cdot L \cdot T_r}{q \cdot G},$$
$$W = \frac{q}{c \cdot m_{\text{сп}} \cdot T_r}, \quad (1)$$

где B_o и C_k – критерий лучистого и конвективного теплообмена; q – удельный расход тепла, кДж/кг; G – производительность печи, кг/ч; σ_0 – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – приведенная степень черноты; T_r – теоретическая температура горения, К; F – поверхность теплообмена, м²; Re – критерий Рейнольдса, $\text{Re} = \omega \cdot D / \nu$, где ω – скорость газа в печи, м/с; D и L – диаметр и длина зоны горения в печи, м; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; λ – коэффициент теплопроводности газа, (1,630 Вт/(м·град К)); c – средняя теплоемкость мате-

риала в печи, $(1,1 \text{ кДж}/(\text{кг} \times \text{град К}))$; $m_{\text{ср}}$ – средний удельный расход сырья в печи, $\text{кг}/\text{кг}$.

Между конечным содержанием (CaO , %) в извести и критериями B_o и W достоверных взаимосвязей не установлено, учитывая, что конвективная составляющая (C_k) процесса оказывает меньшее влияние на зону обжига, где излучательная способность факела велика. В этом случае представляется целесообразным ввести критерий качества обожженной извести в виде $K_{\text{CaO}} = T_{\text{м(опт)}} / T_{\text{эф}}$, представляющий из себя отношение оптимальной температуры ($T_{\text{м(опт)}}$, °C) обжига материала (известняка) к усредненной (эффективной) температуре ($T_{\text{эф}}$, °C) в зоне обжига печи, причем при $T_{\text{м(опт)}} / T_{\text{эф}} > 1$ наступает процесс пережога материала, а при $T_{\text{м(опт)}} / T_{\text{эф}} < 1$ имеет место недопал (недожог). Критерий W представляет собой величину, характеризующую соотношение между падением температуры газа (после факела) и подъемом температуры материала ($T_{\text{м}} \rightarrow \text{max}$) при противотоке в печи. Из критериального выражения (1) для W находим значение для $q = W \cdot c \cdot m_{\text{ср}} \cdot T$ и, подставив это значение q в выражение для B_o , получим:

$$B_o = W \frac{c \cdot m_{\text{ср}} \cdot G}{\sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T_{\text{г}}^3 \cdot F} \quad (2)$$

Из анализа выражения (2) следует, что при сужении зоны обжига в печи, повышении $m_{\text{ср}}$ и $T_{\text{г}}$ критерий $W \rightarrow \text{max}$, что повышает значение B_o , а это способствует увеличению параметров q и G при работе печи [6], [4]. Обработка опытных данных по обжигу известняка во вращающейся печи позволила получить зависимость: $\frac{T_{\text{м(опт)}}}{T_{\text{эф}}} = B_o \cdot W^{-1,73}$ при учете по-

догрева воздуха для горения топлива, коэффициента расхода воздуха, нагрева известняка отходящими газами в подогревателе и возврата пыли в печь.

Обработка данных работы вращающейся обжиговой печи в ЦОИ ОАО «ОЭМК» подтверждают косвенно влияние указанных факторов на эффективную температуру в рабочем пространстве агрегата при различных значениях коэффициента теплопередачи (рис. 1). Существенное влияние величины $T_{\text{эф}}$ на некоторые показатели качества извести подтверждают данные лабораторных исследований (рис. 1). Приведенные на рис. 1 данные характеризуют взаимосвязь $T_{\text{эф}}$ с температурными условиями технологического процесса обжига карбонатного сырья при производстве извести во вращающейся печи.

Эффективную температуру ($T_{\text{эф}}$, °C) в зоне обжига печи находили по уравнению в виде:

$$T_{\text{эф}} = ((\eta_{\text{кплд}} \times T_{\text{кал}}^2 + T_{\text{м}}^2)(T_{\text{ух}}^2 - T_{\text{м}}^2))^{0,25}, \text{ °C}, \quad (3)$$

где $\eta_{\text{кплд}}$ – значение к.п.д. печи; $T_{\text{кал}}$ – calorиметрическая температура горения топлива, °C; $T_{\text{ух}}$ – температура уходящих из зоны обжига газов, °C; $T_{\text{м}}$ – температура извести на выходе из печи, °C. Таким образом, при использовании критериальных зависимостей (1) между критерием качества ($K_{\text{CaO}} = f(T_{\text{м(опт)}} / T_{\text{эф}})$) и значениями B_o , W , $T_{\text{эф}}$ представляется возможным определить температурный уровень ($T_{\text{м(опт)}}$, °C) нагрева известняка в зоне обжига вращающейся печи. С помощью компьютерной программы (рис. 2) расчет $T_{\text{эф}}$ и K_{CaO} с учетом данных по критериям B_o , C_k и W осуществляется анализ результатов обжига сырья с оценкой эффективности теплообмена [3], [6] по теплотехнологическим показателям (q , G , $\eta_{\text{кплд}}$, $T_{\text{г}}$ и др.) работы вращающейся печи.

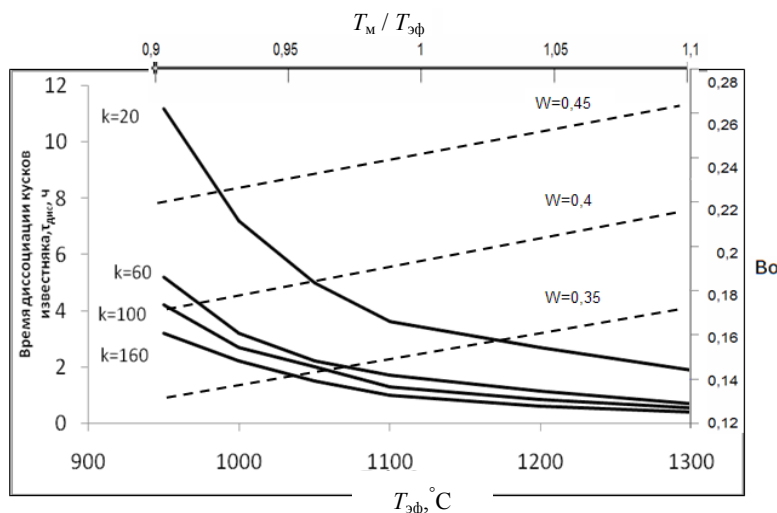


Рис. 1. Зависимость $\tau_{\text{дис}}$ от эффективной температуры ($T_{\text{эф}}$, °C) в зоне обжига известняка при различных значениях коэффициентов теплопередачи (k , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$) от потока газа теплоносителя (азот, скорость потока $0,055 \text{ м}/\text{с}$) к поверхности материала, а также зависимость отношения $T_{\text{м}}/T_{\text{эф}} = f(B_o; W)$, где B_o – критерий Больцмана и W – критерий, характеризующий соотношение между падением температуры в конце факела газа и подъемом температуры материала при противотоке в печи вследствие влияния экзотермических реакций в потоке известняка

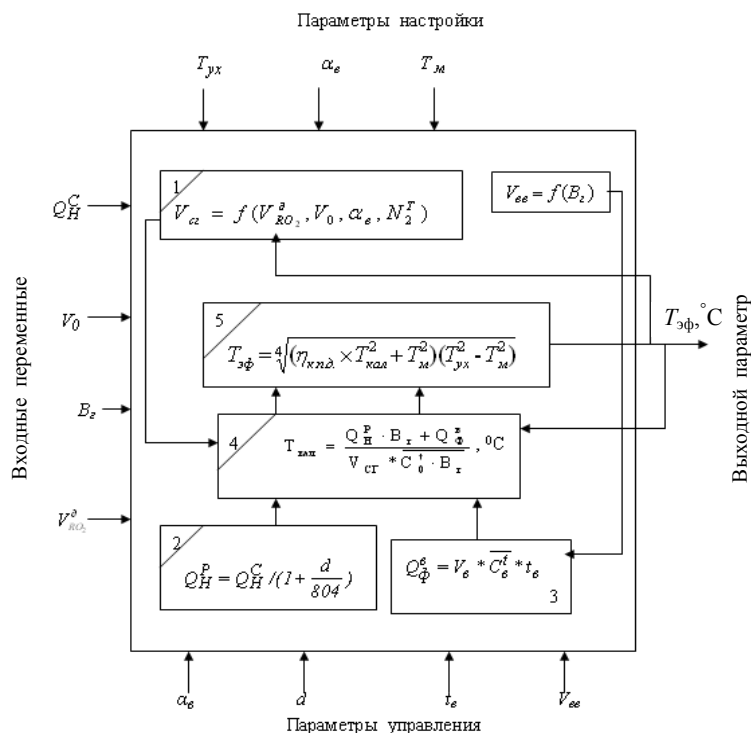


Рис. 2. Блок-схема алгоритма модели расчета эффективной температурой в системе «факел–материал–футеровка» в рабочем пространстве вращающейся печи

Результат расчета эффективной температурой ($T_{эф}$, °C) (рис. 2) зависит от ряда входных параметров, таких как: химический состав природного газа, расход топлива B_r , (м³/ч) на горение, состав продуктов сгорания, температуры t_b и теплоемкость воздуха $\overline{C}_b^t$, идущего на горение, коэффициент расхода воздуха, температуры материала на выходе из печи T_M и температура уходящих газов из печи T_{yx} , которые используются для расчета следующих величин: количество сухих продуктов сгорания V_{CG} , м³/м³ (блок 1), низшая теплота сгорания газа Q_H^P , ккал/м³ (блок 2), физическое тепло воздуха Q_{Φ}^B , ккал/м³ (блок 3), калориметрическая температура горения $T_{кал}$, °C (блок 4), эффективная температура в рабочем пространстве печи $T_{эф}$, °C (блок 5). Программное решение задачи базируется на языке программирования Delphi7Lite 7.3.4.1_N, в которой определяются: расход вентиляторного воздуха $V_{вв}$, объем продуктов сгорания V_{CG} , физическое тепло воздуха, вносимое в зону горения Q_{Φ}^B и калориметрическая температура горения $T_{кал}$.

Алгоритм программы математической модели расчета факела и теплового состояния технологического процесса во вращающейся печи позволяет определить поток результирующего излучения факела [8] по уравнению (4) с учетом того, что $T_{о.м.} = f(T_{M(опт)})$ или $T_{эф}$, а T_{yx} и T_M изменяются по ходу работы агрегата. В обобщенном виде алгоритм расчета Q_{Φ} имеет вид:

$$Q_{\Phi} = \begin{cases} Q_H^P + \varepsilon_{пр} \cdot \sigma \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\Phi}}{a_{\Phi}} (T_{\Phi} + 273)^4 - (T_M + 273)^4 \right) \cdot \frac{F_{у.ф.}}{1000}; \\ \text{при } T_{\Phi} = \frac{I_{\Gamma} - I_{дис}}{C_{\Phi}}; T_{кал} = \frac{Q_H^P \cdot B_r + Q_{\Phi}^B}{V_{CG} \cdot C_0^T \cdot B_r}; \\ \varepsilon_{пр} = 1 / \left[(1/a_{\Phi}) + (((1/\varepsilon) - 1) \times F_{у.ф.}) / F_n \right]; \\ a_{\Phi} = 1 - e^{-K_2 \cdot \delta_{ic}} \end{cases} \quad (4)$$

где K_2 – коэффициент поглощения при температуре стенки, 1/м, $\delta_{ic} = 1,8R_{\Phi}$ – эффективная толщина излучающего слоя, м, R_{Φ} – радиус турбулентной струи, м, ε – степень черноты внутренней поверхности стенки печи (F_n , м²).

Результаты расчета величины Q_{Φ} используются для определения значения удельного расхода топлива $q = \frac{Q_{\Phi}}{G \cdot \tau}$ с целью оценки тепловых критериев

(уравнение 1), позволяющих характеризовать текущие параметры тепловой работы печи.

Режим обжига известняка во вращающейся печи для производства качественной извести [7], [3] должен обеспечивать требуемую производительность агрегата, пониженный удельный расхода тепла и рациональный предел конечной температуры извести $T_{из. (в)}$, °C на выходе из печи при входе ее в холодильник агрегата [5].

На основе анализа данных работы вращающихся печей обжига известняка в ЦОИ ОАО «ОЭМК» и по данным лабораторных исследований установлены

характер влияния параметров температурного режима (рис. 3) в агрегате на показатели качества извести. Влияние температуры извести на выходе из вращающейся печи, $T_{из. (в)}$, °C на содержание CaO в извести (рис. 3а, кривая 1) свидетельствует о достижении экстремума (более 90 %) при температуре извести на выходе из вращающейся печи, $T_{из. (в)}$, равной около 780–800 °C при допустимых потерях при прокаливании в извести около 4 % (рис. 3а, линия 2). При этом установлено влияние температуры обжига известняка $T_{из-к. (о)}$, °C на размеры кристаллов CaO (рис. 3б, кривая 4) после обжига материала.

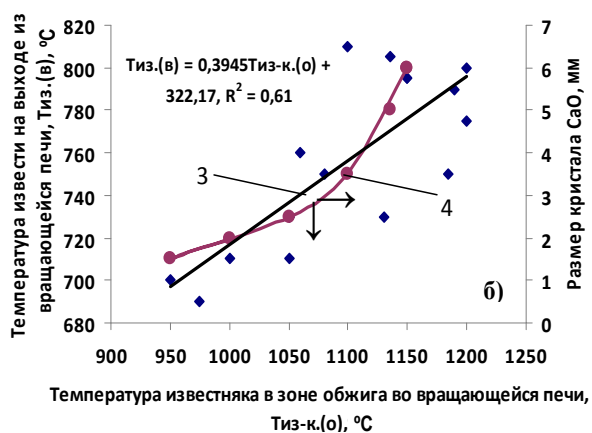
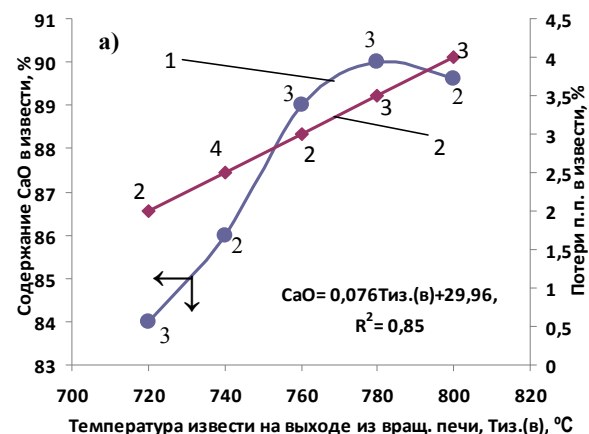


Рис. 3. Зависимость (а) содержания CaO (кривая 1) и потерь при прокаливании (линия 2) в извести от ее температуры на выходе из вращающейся печи ($T_{из. (в)}$, °C) и влияние температуры известняка в зоне обжига печи (б) ($T_{из-к. (о)}$, °C) на $T_{из. (в)}$ (линия 3) и размер кристаллов CaO (кривая 4)

По результатам обработки данных установлена (рис. 3б, линия 3) тесная корреляционная зависимость $T_{из. (в)} = 0,3945 \cdot T_{из-к. (о)} + 322,17$, $R^2 = 0,61$, указывающая на достоверность и взаимосвязь температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{из. (в)}$, °C и температуры известняка в зоне обжига агрегата $T_{из-к. (о)}$, °C. Анализ данных тепловой работы вращающихся печей [5] обжига известняка указывает на необходимость определения температуры $T_{из-к. (о)}$, °C. Таким образом, определив $T_{из-к. (о)}$, находим

затем $T_{из. (в)}$, что позволяет осуществлять контроль содержания CaO в извести (рис. 3).

Определение оптимального расхода извести [2] в дуговую печь при электроплавке металлизированных окатышей осуществляли исходя из накапливающейся массы шлака ($G_{шл}$, кг) с учетом образующегося (FeO) по формуле:

$$G_{шл} = G_{шл(0)} + (V_{ок} \cdot B / 100 + V_{(FeO)} + V_{изв}) \cdot (\tau - \tau_0), \quad (5)$$

где $G_{шл(0)}$ – количество шлака в печи в момент начала (τ_0 , с) подачи окатышей в ванну, кг; $V_{ок}$ – расход окатышей, кг/с; B – содержание пустой породы в окатышах (CaO и SiO_2), %; $V_{(FeO)}$ – суммарная скорость образования (FeO) в шлаке, кг/с; $V_{изв}$ – скорость подачи извести в печь, кг/с; τ_0 и τ – начальное и текущее время по ходу плавки, сек.

По ходу плавки окатышей необходимо поддерживать оптимальный уровень основности шлака ($B = CaO/SiO_2$), подавая в печь соответствующее количество извести. Для расчета из выражения (5) распишем массы CaO и SiO_2 в следующем виде:

$$CaO = (CaO)_0 + (V_{ок} \times (CaO)_{ок} / 100 + V_{изв}) \cdot (\tau - \tau_0), \quad (6)$$

$$SiO_2 = (SiO_2)_0 + (V_{ок} \cdot (SiO_2)_{ок} / 100 + V_{изв}) \cdot (\tau - \tau_0), \quad (7)$$

где $CaO_{ок}$ и $(SiO_2)_{ок}$ – содержание этих оксидов в окатышах, кг; CaO_0 и $(SiO_2)_0$ – начальная масса этих оксидов в шлаке перед подачей окатышей в печь, кг.

Тогда из выражений (6) и (7) получили оптимальную скорость подачи извести в дуговую печь по ходу электроплавки окатышей:

$$V_{изв(опт)} = (B \cdot (SiO_2)_{ок} - (CaO)_{ок}) \cdot V_{ок} / 100 + (B \cdot (SiO_2)_0 - (CaO)_0) / (\tau - \tau_0). \quad (8)$$

Таким образом, осуществляя оптимальный расход извести в ванну дуговой печи по выражению (8), можно экономить известь при электроплавке окатышей. При этом интенсифицируется также процесс шлакообразования, ускоряются процессы десульфурации и дефосфорации металла, повышается производительность печи и улучшается качество стальной продукции. Оптимизация температурного режима обжига известняка во вращающейся печи влияет на содержание CaO в извести и на конечные показатели электростали.

Выводы.

Установлены закономерности влияния параметров тепловой работы печи на основные технологические процессы обжига известняка при производстве промышленной извести. Получено критериальное уравнение зависимости показателей качества извести от числа B_0 и критерия W , позволяющее определять оптимальную температуру в зоне обжига печи в зависимости от условий производства. Изучено влияние температурного режима во вращающейся печи на состав извести и при этом определены оптималь-

ные условия температурного режима печи для производства качественной извести с содержанием в ней CaO более 90 % при ее температуре на выходе из печи равной около 780–800 °С. Установлена тесная корреляционная зависимость $T_{из. (в)} = 0,3945T_{из-к(о)} + 322,17$, $R^2 = 0,61$, указывающая на достоверность и взаимосвязь температуры извести на выходе из вращающейся печи $T_{из(в)}$, °С и температуры известняка в зоне обжига агрегата $T_{из-к(о)}$, °С. Изучены закономерности влияния показателей качества извести на интенсификацию процессов шлакообразования при электроплавке стали и предложена к использованию методика, позволяющая оптимизировать присадки извести в агрегате и улучшить показатели процесса.

Литература

1. Антонов, Г. Л. Особенности эксплуатации коротких вращающихся печей обжига известняка / [Г. Л. Антонов и др.] // Сталь. – 2008. – №9. – С. 97–99.
2. Бахаев, Д. А. Исследование роли извести при шлакообразовании и внепечной обработке стали инертными газами / [Д. А. Бахаев и др.] // Вестник Донского государствен-

ственного технического университета. – 2013. – №7/8(75). – С. 35–42.

3. Бергауз, А. Л. Повышение эффективности сгорания топлива в печах / А. Л. Бергауз, Э. И. Розенфельд. – Л., 1984.

4. Гамей, А. И. Освоение технологии обжига известняка во вращающихся печах / [А. И. Гамей и др.] // ОАО «Черметинформация». Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2002. – №6. – С. 3–5.

5. Меркер, Э. Э. Повышение эффективности сжигания топлива во вращающихся печах обжига извести / Э. Э. Меркер, Т. В. Агаркова, В. В. Губин // Бюллетень НТИ «Черная металлургия». – 1995. – №5. – С. 28–30.

6. Меркер, Э. Э. Совершенствование методики контроля параметров режима сжигания топлива во вращающихся печах / Э. Э. Меркер, Д. А. Харламов, А. А. Ансимов // ОАО «Черметинформация». Бюл. НТИ «Черная металлургия». – 2011. – №7. – С. 78–81.

7. Нехлебаев, Ю. П. Экономия топлива при производстве извести / Ю. П. Нехлебаев. – М., 1987.

8. Трубаев, П. А. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах / П. А. Трубаев, В. А. Кузнецов, П. В. Беседин. – Белгород, 2008.

УДК 629.7.054.07

О. В. Богданова, А. В. Богданов

*Научный руководитель: доктор технических наук, доцент И. О. Жаринов
Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет
информационных технологий, механики и оптики*

ВЫБОР ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ ИНТЕРФЕЙСОВ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ПЛАТФОРМЕ ИМА В УСЛОВИЯХ ОГРАНИЧЕНИЙ, НАЛАГАЕМЫХ БОРТОВОЙ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

В статье приводится сравнение классической и перспективной схемы построения бортовых картографических систем, производится анализ основных факторов, влияющих на выбор принципов реализации таких систем. Предложена схема организации картографической системы на основе ИМА архитектуры с операционной системой реального времени (ОС РВ), соответствующей требованиям стандарта ARINC653, с использованием преимуществ каналов видео интерфейсов по стандарту ARINC818-2.

Картографическая система, ИМА, ARINC818-2, ARINC653, APEX канал.

The paper compares the classical and promising architecture of cartographic systems and gives an analysis of the main factors influencing the choice of the principles of the implementation of these systems. The authors proposed the organization scheme of promising cartographic system based on IMA architecture with video interface based on ARINC818-2 standard and described the advantages of these systems when working together with real time operating system (RT OS) based on ARINC653.

Cartographic system, IMA, ARINC818-2, ARINC653, APEX channel.

Введение.

Для современных перспективных авиационных систем в настоящее время используются вычислительные системы на базе ИМА (интегрированная модульная авионика). В таких системах в соответствии с функциональной нагрузкой выделяются: модуль хранения и выборки цифровой базы данных, модули вычислительные (обработки информации), модули ввода-вывода и модули непосредственной растеризации (графоконтроллеры). В соответствии с

данной структурой перед разработчиком встает проблема разделения задачи картографии между этими устройствами, и, соответственно, решения следующего ряда подзадач, связанных с определением структуры БД (базы данных), определения и реализации функций предобработки (которые можно возложить на процессор БД) выбранной из БД информации, организации передачи информации по межмодульной сети. Следует учитывать, что процессор БД обслуживает нескольких абонентов. Некоторая