

УДК 661.25

**В.Н. Ткаченко, Н.Н. Чернышев**

Донецкий национальный технический университет, г. Донецк  
кафедра автоматизации и телекоммуникаций  
E-mail: [kolyachernishov@mail.ru](mailto:kolyachernishov@mail.ru)

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПРОИЗВОДСТВА СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

### *Abstract*

*Tkachenko V.N., Chernishov N.N. Design and mathematical model analysis sulphuric acid production process. In article technological process of reception of sulphurous anhydride of hydrogen sulphide is considered. The basic variables influencing process are defined. The equations of thermal and material balance are worked out. The dynamic equations describing changes of temperatures in technological devices are received. Modeling of investigated processes in package MATLAB is made.*

**Key words:** sulphuric acid, technological process, thermal and material balance, dynamics equations, control object.

### *Анотація.*

*Ткаченко В.М., Чернышев М.М. Розробка та дослідження математичної моделі технологічного процесу виробництва сірчаної кислоти. Виконано аналіз процесу виробництва сірчаної кислоти методом мокрої каталізу. Для кожної ланки технологічного ланцюга виділені змінні, що чинять вплив на хід процесу й визначені взаємозв'язки між всіма апаратами технологічної схеми.*

**Ключові слова:** сірчана кислота, технологічний процес, тепловий та матеріальний баланс, динамічні рівняння, об'єкт управління.

### *Аннотация*

*Ткаченко В.Н., Чернышев Н.Н. Разработка и исследование математической модели технологического процесса производства серной кислоты. Произведен анализ процесса производства серной кислоты методом мокрого катализа. Для каждого звена технологической цепочки выделены переменные, оказывающие влияние на ход течения процесса и определены взаимосвязи между всеми аппаратами технологической схемы.*

**Ключевые слова:** серная кислота, технологический процесс, тепловой и материальный баланс, уравнения динамики, объект управления.

**Общая постановка проблемы.** В статье рассматривается технологический участок получения диоксида серы из сероводорода на установке производства серной кислоты методом мокрого катализа [1,2,5]. Существующие методы построения системы управления отдельными технологическими участками установки мокрого катализа не рассматривают установку как объект управления с взаимосвязанной структурой, то есть управление осуществляется по отдельным каналам без взаимного согласования и корректировки.

**Постановка задач исследования.** Решение задачи построения САУ объектом за счет совершенствования систем управления отдельными технологическими участками без учета их взаимосвязи и взаимного влияния не позволит достичь основной цели процесса — максимального удельного выхода серной кислоты. Таким образом, возникает задача

исследования влияния многосвязности и многомерности на динамику объекта. Однако в связи с недостаточным развитием методики синтеза САУ для рассматриваемого объекта на основе современных методов управления является отсутствие подходящей для этого математической модели процесса. Следовательно, одной из основных задач является разработка математической модели технологических участков и всей установки в целом, адекватно отражающей статические и динамические свойства объекта.

**Цель работы.** Разработка математической модели печного технологического участка установки мокрого катализа как объекта с сосредоточенными параметрами.

**Решение задач и результаты исследования.** На коксохимических предприятиях отчистка коксового газа от сероводорода в основном производится вакуум-карбонатными методами. Полученный при этом сероводородный газ затем используется для производства серной кислоты на установках мокрого катализа [4].

Первым этапом этого процесса является окисление сероводорода до диоксида серы кислородом воздуха в печи, при этом выделяется большое количество тепла. В связи с этим в печи располагают змеевики котла-утилизатора (см. рис.1). В настоящее время на всех установках мокрого катализа работающих на территории Украины процесс сжигания сероводородного газа ведут в соответствии с режимом, предложенным А.П. Сергеевым. Суть этого режима заключается в том, что процесс сжигания сероводородного газа ведут при небольшом недостатке воздуха, несгоревшая часть сероводорода и образовавшаяся сера поступают с продуктами горения из печи в камеру дожигания, где окисляются небольшим количеством воздуха. Такой режим позволяет минимизировать в продуктах сжигания количество оксидов азота ухудшающих потребительские свойства серной кислоты. Полученный диоксид серы охлаждается в камере смешения до температуры 440–450 °С, что необходимо для эффективной работы последующего технологического участка (контактный аппарат) [4,5].

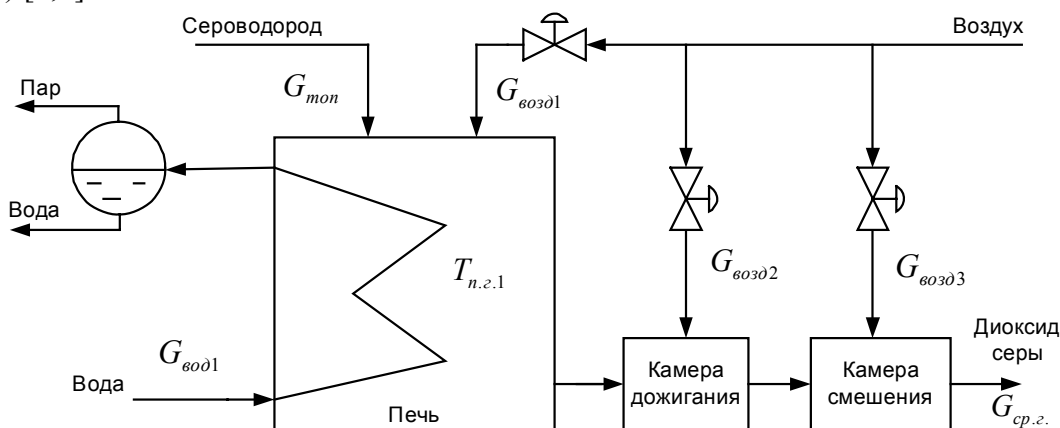


Рисунок 1 — Структурная схема печного участка

Выполним анализ печного участка как объекта управления с выделением всех факторов, оказывающих влияние на динамику объекта, т.е. определим входные, выходные и возмущающие переменные (см. рис.2).

Печной участок как объект управления характеризуется следующими компонентами векторов:  $\bar{f}_1$  — вектор возмущений;  $\bar{u}_1$  — вектор управления;  $\bar{y}_1$  — вектор выходных сигналов подсистемы:

$$\begin{cases} \bar{u}_1 = (G_{\text{возд}1}, G_{\text{возд}2}, G_{\text{возд}3}, G_{\text{вод}}); \\ \bar{y}_1 = (T_{n.z.1}, T_{n.z.2}, T_{\text{сп.з.}}, T_{\text{пар}}, G_{\text{пар}}, G_{\text{сп.з.}}); \\ \bar{f}_1 = (T_{\text{возд}}, T_{\text{вод}}, G_{\text{мон}}). \end{cases} \quad (1)$$

где  $G_{возд1}$  — расход воздуха на горение в печи;  $G_{возд2}$  — расход воздуха в камеру дожига;  $G_{возд3}$  — расход воздуха в камеру смешения;  $G_{вод}$  — расход воды;  $T_{ср.с.}$  — температура (диоксида серы)  $SO_2$  на выходе из камеры смешения;  $T_{н.с.1}$  — температура газа в печи;  $T_{н.с.2}$  — температура газа в камере дожига;  $G_{ср.с.}$  — расход полученного  $SO_2$ ;  $T_{возд}$  — температура воздуха окружающей среды;  $T_{вод}$  — температура воды из системы охлаждения;  $G_{мон}$  — расход перерабатываемого сероводородного газа.

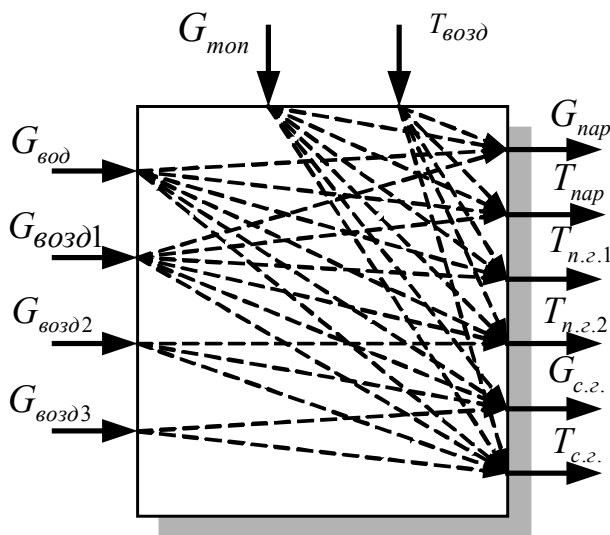


Рисунок 2 — Печной участок как объект управления

На рис. 3 представлены основные массо- и теплообменные процессы между отдельными аппаратами печного технологического участка, с учетом теплового и массового баланса.

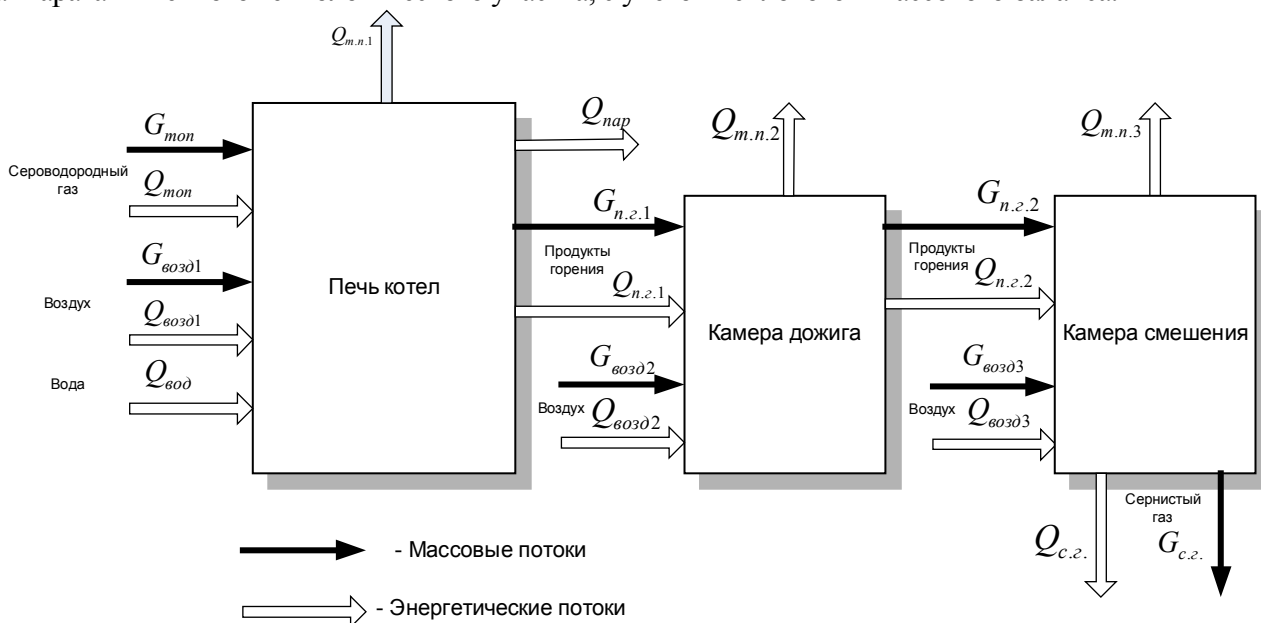


Рисунок 3 — Структурная схема массовых и тепловых потоков в печном участке

Составим уравнения теплового и массового баланса для печного участка:

Массовый баланс для печи,  $m^3/\text{час}$ :

$$G_{мон} + G_{возд1} = G_{н.с.1} \tag{2}$$

Массовый баланс для камеры дожига,  $m^3/\text{час}$ :

$$G_{n.2.1} + G_{возд2} = G_{n.2.2} \quad (3)$$

Массовый баланс для камеры смешения, м<sup>3</sup>/час:

$$G_{n.2.2} + G_{возд3} = G_{c.2.} \quad (4)$$

Тепловой баланс для печи, кДж/час:

$$G_{c.2.}c_{c.2.}T_{c.2.} + G_{возд1}c_{возд}T_{возд} + \alpha_1 G_{мон}q' + \alpha_2 G_{мон}q'' + G_{цв}q_{цв} + G_{вод}c_{вод}(T_n - T_{вх}) - G_{вод}q - G_{нар}c_{нар}(T_{вых} - T_n) - k_m F_1(T_{n.2.1} - T_{окр}) - G_{n.2.1}c_{n.2.1}T_{n.2.1} = 0, \quad (5)$$

где  $c_{c.2.}, c_{возд}, c_{вод}, c_{нар}, c_{n.2.1}$  — теплоемкости, соответственно, сероводородного газа, воздуха, пара, воды и продуктов горения в печи;  $q', q'', q_{цв}$  — удельные величины теплоты горения сероводородного газа до диоксида серы, до серы и теплота горения цианистоводорода;  $q$  — удельная теплота парообразования;  $T_{вых}, T_{вх}, T_n$  — температура воды на входе и выходе в печи и температура кипения;  $k_n F_1(T_{n.2.1} - T_{окр})$  — составляющая потерь тепла через стенки в печи.

Тепловой баланс для камеры дожига, кДж/час:

$$G_{n.2.1}c_{n.2.1}T_{n.2.1} + G_{возд2}c_{возд}T_{возд} + G_{c}q' + G_{св}q'' - k_{кд}F_2(T_{n.2.2} - T_{окр}) - G_{n.2.2}c_{n.2.2}T_{n.2.2} = 0 \quad (6)$$

где  $c_{n.2.2}$  — теплоемкость продуктов горения в камере дожига;  $k_{кд}F_2(T_{n.2.2} - T_{окр})$  — составляющая потерь тепла в камере дожига через стенки.

Тепловой баланс для камеры смешения, кДж/час:

$$G_{n.2.2}c_{n.2.2}T_{n.2.2} + G_{возд3}c_{возд}T_{возд} - k_{кс}F_3(T_{ср.2.} - T_{окр}) - G_{ср.2.}c_{ср.2.}T_{ср.2.} = 0. \quad (7)$$

где  $c_{ср.2.}$  — теплоемкость продуктов в камере смешения;  $k_{кс}F_3(T_{ср.2.} - T_{окр})$  — составляющая потерь тепла в камере смешения через стенки.

На основании полученных уравнений теплового и массового баланса, получим динамические уравнения, описывающие изменение температур в печи, камере дожига и камере смешения (8–10):

$$V_m c_{n.2.1} \frac{dT_{n.2.1}}{dt} = G_{c.2.}c_{c.2.}T_{c.2.} + G_{возд1}c_{возд}T_{возд} + \alpha_1 G_{св}q' + \alpha_2 G_{св}q'' + G_{цв}q_{цв} - G_{вод}c_{вод}(T_n - T_{вх}) - G_{нар}c_{нар}(T_{вых} - T_n) - G_{вод}q - k_m F_1(T_{n.2.1} - T_{окр}) - G_{n.2.1}c_{n.2.1}T_{n.2.1}, \quad (8)$$

$$V_{кд}c_{n.2.2} \frac{dT_{n.2.2}}{dt} = G_{n.2.1}c_{n.2.1}T_{n.2.1} + G_{возд2}c_{возд}T_{возд} + G_c q_c + G_{св}q' - G_{n.2.2}c_{n.2.2}T_{n.2.2} - k_{кд}F_2(T_{n.2.2} - T_{окр}), \quad (9)$$

$$V_{кс}c_{ср.2.} \frac{dT_{ср.2.}}{dt} = G_{n.2.2}c_{n.2.2}T_{n.2.2} + G_{возд3}c_{возд}T_{возд} - G_{ср.2.}c_{ср.2.}T_{ср.2.} - k_{кс}F_3(T_{ср.2.} - T_{окр}). \quad (10)$$

Уравнения (8)–(10) образуют систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений, динамика которых легко моделируются на основе численного метода Рунге-Кутты. Различные модификации метода Рунге-Кутты выведены из соответствующего разложения в ряд Тейлора таким способом, чтобы окончательная общая ошибка решения имела порядок  $O(h^N)$ , где  $h$  — величина шага дискретизации временной области. Метод позволяет на каждом шаге вычислить несколько функций и исключить необходимость вычисления производных высоких порядков. Модификации метода можно построить для любого порядка  $N$ . Наиболее популярен метод Рунге-Кутты четвертого порядка. В большинстве случаев это хороший выбор, так как он вполне точен, стабилен и прост для программирования. Существует мнение, что нет необходимости переходить к методу высшего порядка, поскольку увеличение точности не компенсирует дополнительную сложность вычислений [3].

Метод Рунге-Кутта четвертого порядка по точности подобен методу рядов Тейлора четвертого порядка. Формула для решения дифференциального уравнения  $\dot{y} = f(t, y(t))$  с шагом  $h$  при  $y(t_0) = y_0$  методом Рунге-Кутта четвертого порядка имеет вид [3]:

$$y_{k+1} = y_k + \frac{h(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4)}{6}, \quad (11)$$

где

$$f_1 = f(t_k, y_k), \quad (12)$$

$$f_2 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}f_1\right), \quad (13)$$

$$f_3 = f\left(t_k + \frac{h}{2}, y_k + \frac{h}{2}f_2\right), \quad (14)$$

$$f_4 = f(t_k + h, y_k + hf_3). \quad (15)$$

Поскольку в полученных уравнениях (8)–(10) в правой части отсутствует независимая переменная времени  $t$ , тогда

$$f_1 = f(y_k), \quad (16)$$

$$f_2 = f\left(y_k + \frac{h}{2}f_1\right), \quad (17)$$

$$f_3 = f\left(y_k + \frac{h}{2}f_2\right), \quad (18)$$

$$f_4 = f(y_k + hf_3). \quad (19)$$

Представленный алгоритм решения дифференциальных уравнений методом Рунге-Кутта четвертого порядка реализован в среде MATLAB в виде функции с именем *mrk4(f,a,b,ya,M)*. В качестве входных параметров функции фигурируют:  $f$  — имя функции расчета дифференциального уравнения или непосредственно само уравнение в символьном виде,  $a$  и  $b$  — соответственно левая и правая крайние точки интервала, на котором производится вычисления,  $ya$  — начальное значение функции,  $M$  — число шагов.

На основании данных представленных в работах [4,5], по методике ведения технологического процесса сжигания сероводородного топлива на установках мокрого катализа, произведено моделирование процессов происходящих в печном участке. В результате выполнения расчетов в среде MATLAB получены следующие переходные процессы (см. рис.4).

Проанализировав полученные переходные процессы представленные на рис.4, можно сделать вывод, что установившиеся значения температуры в печи, камере дожигания и смешения составляют 770 °С, 800 °С и 444 °С, переходный процесс заканчивается за 36 с.

Получены статические характеристики температуры в печи при изменении расхода воздуха, сероводородного газа и воды, которые подаются в печь (см. рис. 5). Из рис.5 а) видно, что температура в печи возрастает до определенного значения, а затем уменьшается при увеличении расхода воздуха. Это объясняется тем, что до тех пор, пока в печь подается количество воздуха меньше стехиометрического соотношения топливо-воздух, температура будет возрастать, как только расход воздуха становится больше стехиометрического, происходит разбавление продуктов горения более холодным воздухом, поэтому температура газовой смеси понижается. Аналогично для случая представленного на рис.6. При неизменном расходе воздуха, воды и переменном расходе сероводородного газа температура в печи растет до того момента пока соотношение расхода топлива и воздуха достигнет стехиометрического, как только расход топлива становится больше, температура в печи понижается (см. рис.5 б)). При увеличении (уменьшении) расхода охлаждающей воды температура в печи понижается (повышается) (см. рис.5 в)).

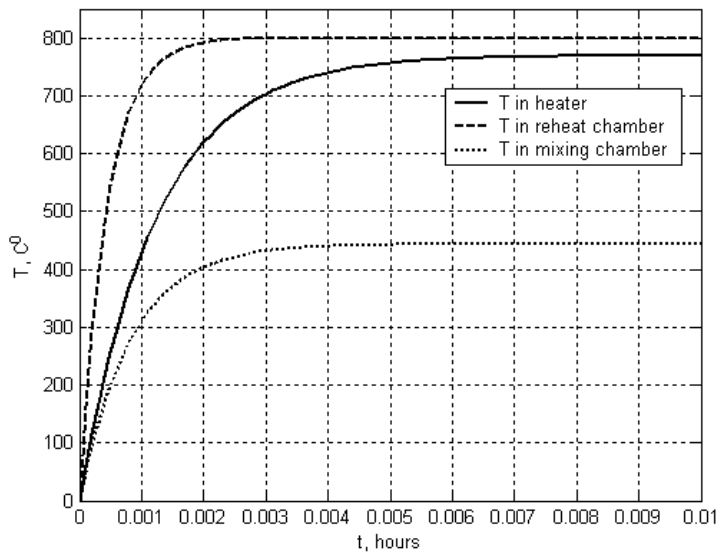
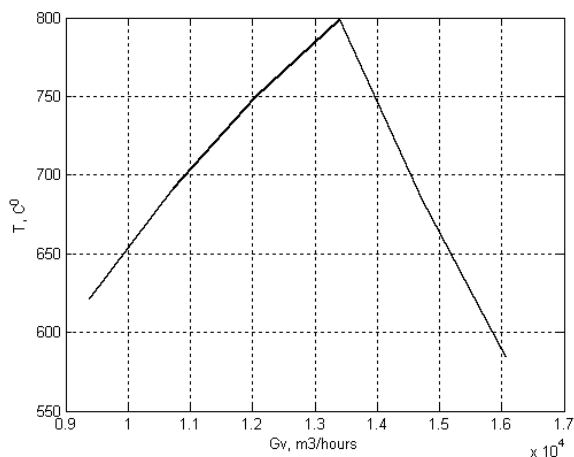
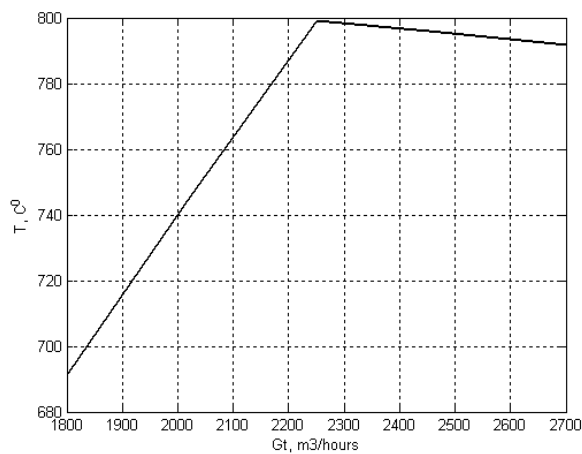


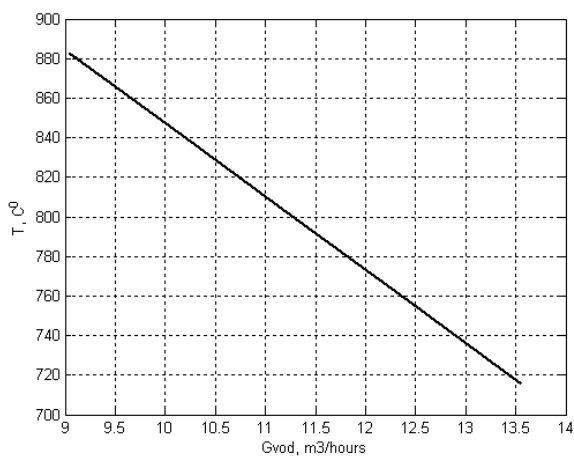
Рисунок 4 — Переходные процессы в печи (T in heart), камере дожига (T in reheat chamber) и смешения (T in mixing chamber) при постоянном расходе сероводородного газа



а)



б)



в)

Рисунок 5 — Статические характеристики зависимости температуры в печи от расхода а) воздуха, б) сероводородного газа, в) воды

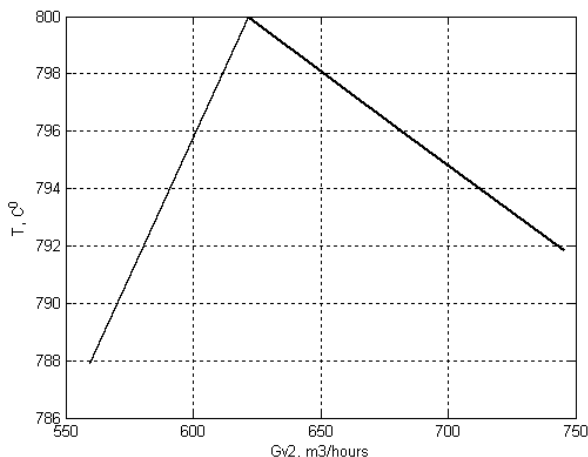


Рисунок 6 — Статическая характеристика зависимости температуры в камере дожига от расхода воздуха

На рис. 7 представлены графики изменения температуры газовой смеси в печи и камере дожига при изменении расхода воздуха и сероводородного топлива (рис. 7 а) и рис. 8, воды и сероводородного топлива (рис. 6 б) и воздуха и воды (рис.6 в).

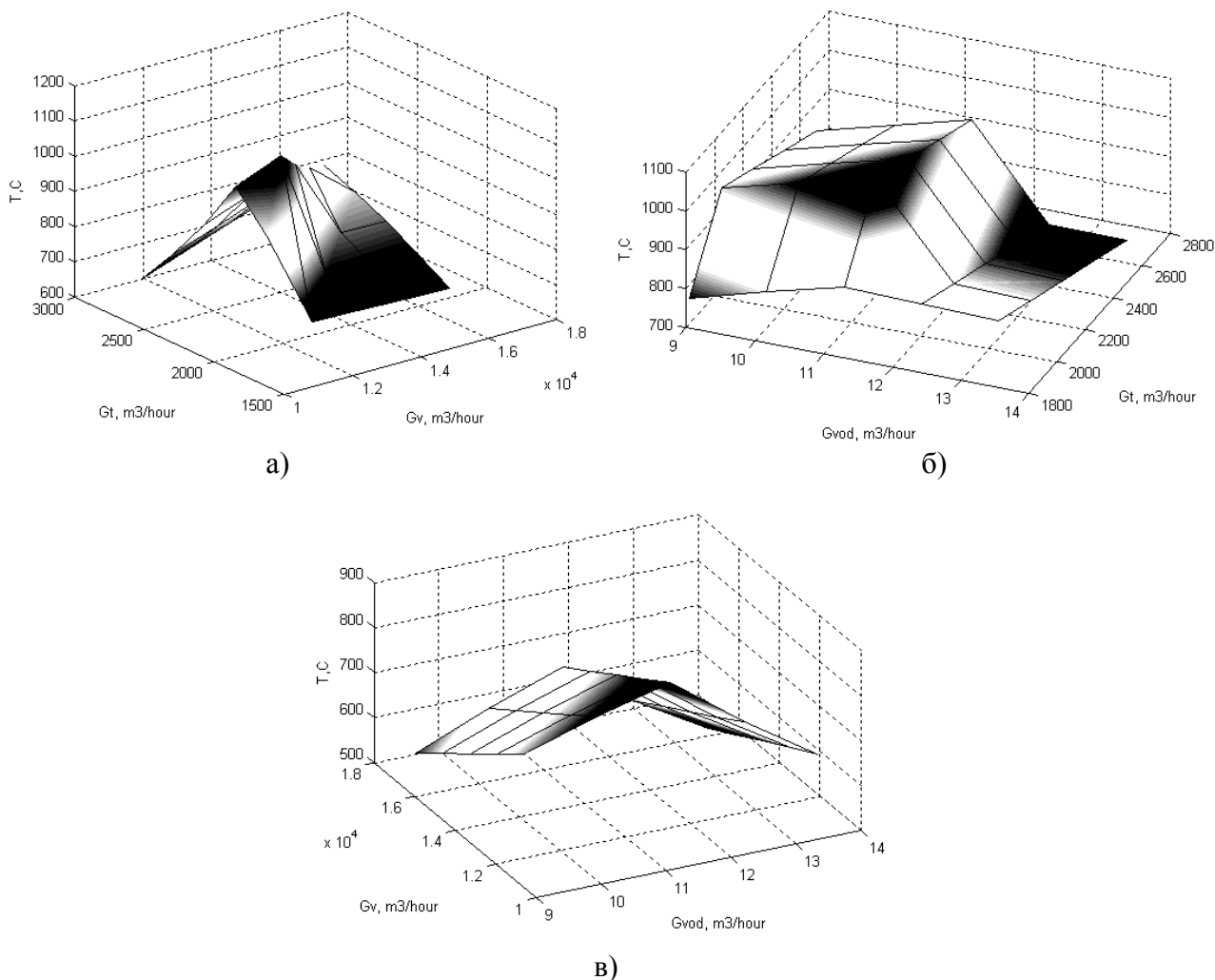


Рисунок 7 — Графики зависимости температуры в печи при изменении расхода: а) воздуха и сероводородного газа, б) сероводородного газа и воды, в) воздуха и воды

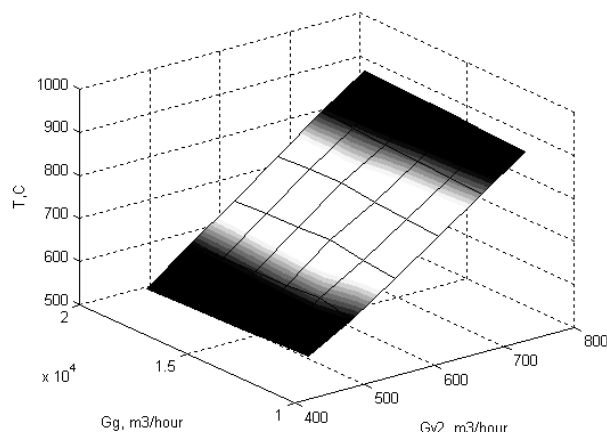


Рисунок 8 — График зависимости температуры в камере дожига при изменении расхода воздуха и сероводородного газа

### Выводы.

1. Выполнен анализ печного участка как объекта управления с выделением всех факторов, оказывающих влияние на динамику объекта, определены входные, управляющие, выходные и возмущающие воздействия.

2. На основании уравнений теплового и массового балансов получена динамическая модель технологических процессов, представляющая собой систему обыкновенных линейных дифференциальных уравнений.

3. Моделированием на ЭВМ получены переходные процессы для температуры в печи, камере дожига и смешения.

4. Получены статические характеристики температуры в печи и камере дожига при изменении расхода воздуха, сероводородного газа и воды.

5. Анализ результатов моделирования подтверждает соответствие качественного поведения модели основным характеристикам изучаемого технологического процесса.

### Литература

1. Ткаченко В.Н., Бессараб В.И., Чернышев Н.Н. Анализ процесса получения серной кислоты из сероводорода в системе комплексной автоматизации углехимических производств // “Практика и перспективы развития партнерства в высшей школе”: Материалы восьмого научно-практического семинара. В 3-х томах. Том 3. — Донецк: ДонНТУ, 2007. — №7. — С. 329–334.
2. Ткаченко В.Н., Чернышев Н.Н. Разработка статической модели печного технологического участка производства серной кислоты методом мокрого катализа // Автоматика-2008: доклады XV международной конференции по автоматическому управлению, 23–26 сентября 2008. — Одесса: ОНМА. — С. 608–610.
3. Джон Г. Мэтьюз, Куртис Д. Финк Численные методы. Использование MATLAB, 3-е издание.: Пер. с англ. — М.: Издательский дом “Вильямс”, 2001. — 720 с.
4. Гребенюк А.Ф., Пьянков М.В., Милютин А.В., Черныш А.Ф. Особенности и принципы регулирования режима сжигания сероводородного газа в установках мокрого катализа // Углехимический журнал. — 2007. — №3–4. — С. 41–44.
5. Гребенюк А.Ф., Коробчанский В.И., Власов Г.А., Кауфман С.И. Улавливание химических продуктов коксования. Учебное пособие. — ч.2. — Донецк: Восточный издательский дом, 2002. — 208 с.

Здано в редакцію:  
18.02.2009р.

Рекомендовано до друку:  
д.т.н, проф. Воронцов О.Г.