



УДК666.914

**Булатов Б.Г.** – ассистент

E-mail: [bfd82@mail.ru](mailto:bfd82@mail.ru)

**Башкирский государственный аграрный университет**

Адрес организации: 450001, Россия, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, д. 34

**Недосеко И.В.** – доктор технических наук, профессор

E-mail: [nedoseko\\_1964@mail.ru](mailto:nedoseko_1964@mail.ru)

**Уфимский Государственный нефтяной технический университет**

Адрес организации: 450062, Россия, г. Уфа, ул. Космонавтов, д. 1

## **Модели для создания и исследования системы управления производством стеновых изделий на основе фосфогипса**

### **Аннотация**

Рассматриваемая работа связана с автоматизацией основного технологического процесса производства, а также вариантами технологических схем производства, имеющих общие технологические операции. Проводимые исследования и полученные результаты позволили разработать программу расчета составов сырьевых смесей на основе фосфогипса «Optimum», необходимую для организации производства гипсовых стеновых и перегородочных изделий для малоэтажного строительства, а также стабилизировать проведение технологического процесса и повысить качество готовой продукции.

**Ключевые слова:** фосфогипс; технологическая операция; система автоматического управления; пропорционально-интегрально-дифференциальное регулирование; этапы управления.

На территории России в отвалах находится более 200 млн. т фосфогипса. В Республике Башкортостан в отвалах Мелеузовского ОАО «Минудобрения» скопилось более 10 млн. т фосфогипса [1]. Ежегодный сброс фосфогипса-дигидрата составляет около 2 млн. т.

Одним из наиболее эффективных способов утилизации фосфогипсового отхода является использование его в малоэтажном строительстве [2, 3]. Для развития производства стеновых элементов для малоэтажного строительства на основе фосфогипса необходима автоматизация технологического процесса. Это стабилизирует протекание технологического процесса и повысит качество готовой продукции [4, 5].

На рисунке (рис. 1) представлено взаимодействие технологического процесса производства стеновых элементов для малоэтажного строительства на основе фосфогипса и САУ этим процессом [6]. Технологический процесс на этом рисунке представлен в самом общем виде – основные компоненты, технологические операции и САУ верхнего и нижнего иерархического уровня.

САУ верхнего уровня (рис. 2) как правило, не имеет связи непосредственно с технологическим процессом, а контролирует состояние процесса и управляет им через подсистему нижнего уровня [6, 7]. Эта подсистема решает следующие основные задачи:

- Построение статистических моделей процесса. Имеющиеся аналитические зависимости между отдельными показателями и качеством готовой продукции либо отсутствуют, либо имеют невысокую точность. Поэтому по мере накопления фактических данных в СУБД реализуются различные статистические модели процесса. При этом следует постоянно оценивать точность моделей и использовать их только при удовлетворительной точности.

- Как показывают исследования различных технологических процессов в строительной индустрии [8] в САУ верхнего уровня управления широко используется динамика различных показателей. Это подразумевает решение двух взаимосвязанных задач:

- Идентификация – оперативная оценка параметров модели временного ряда.

- Прогнозирование. При достаточной точности идентификации можно использовать найденные динамические характеристики для решения задач прогнозирования.

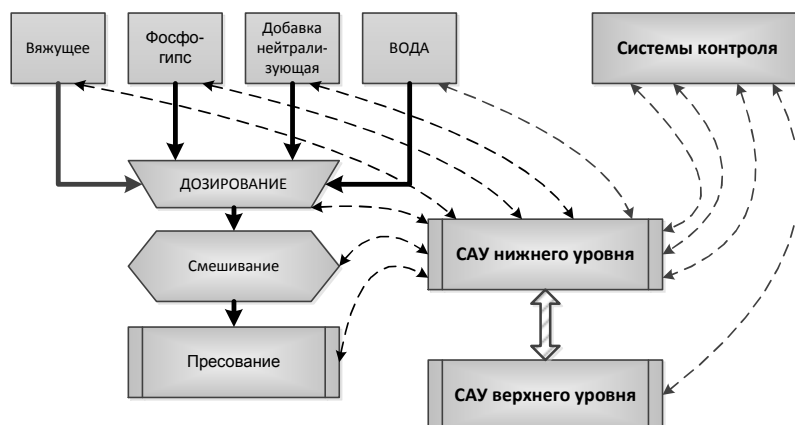


Рис. 1. Взаимодействие технологического процесса производства стеновых элементов для малоэтажного строительства на основе фосфогипса и САУ



Рис. 2. Основные задачи САУ верхнего иерархического уровня

Для исследования взаимодействия технологического процесса производства изделий из фосфогипса, системы управления этим производством и оптимизации информационного обеспечения процесса управления необходимо проведение экспериментальных исследований. Постановка реального эксперимента не представляется возможной. Поэтому эффективным средством исследований является имитационное моделирование.

Модель управляемого технологического процесса производства изделий из фосфогипса разрабатывается для решения следующих задач:

- Создание инструмента для исследования взаимодействия:
  - Модели технологического процесса;
  - Модели динамики свойств компонентов;
  - Модели системы управления.
- Обеспечить возможность оперативного изменения следующих величин:
  - свойств компонентов смеси;
  - параметров технологического процесса;
  - параметров связи показателей качества компонентов смеси и технологического процесса со свойствами готового изделия из фосфогипса.
- Динамических свойств переменных.

Для решения этих задач необходимо разработать комплекс моделей:

- технологического процесса;
- модель динамики свойств компонентов;
- системы управления технологическим процессом.

Ниже представлена общая структура имитационной модели (рис. 3). Общая модель функционирует следующим образом.

- Блок управления моделированием. Этот блок обеспечивает управление всем процессом моделирования. В этом блоке решаются следующие основные задачи:
  - Задается число циклов моделирования;

- Задаются основные статистические характеристики для каждого моделируемого параметра;
  - Управление записью и чтением данных с базой данных;
  - Задаются начальные параметры моделей для всех переменных и для моделей связи параметров;
  - Управление работой блока обработки результатов моделирования;
  - По мере накопления результатов моделирования и их обработки в модели динамики свойств, технологического процесса и системы управления вносятся необходимые коррективы.
- Блок задания начальных параметров моделирования. Для работы модели необходимо задать начальные значения для модели динамики свойств, модели технологического процесса и модели системы управления. Затем по мере накопления результатов моделирования начальные параметры моделей корректируются. Естественно, что при каждом моделировании начальные модели уточняются, что повышает эффективность исследования.
  - Блок обработки результатов моделирования. В этом блоке проводятся все операции статистической обработки данных и синтеза моделей.
  - База данных. Обеспечивает упорядоченное хранение всех результатов моделирования. Это позволяет оптимизировать алгоритмы моделирования.
  - Модель динамики свойств. В этом блоке моделируется возмущение и другие временные ряды с заданными характеристиками.
  - Модель технологического процесса. Обеспечивает моделирование связей между параметрами и расчет показателей качества готовой продукции.
  - Модель системы управления. В этом блоке моделируется работа системы управления.

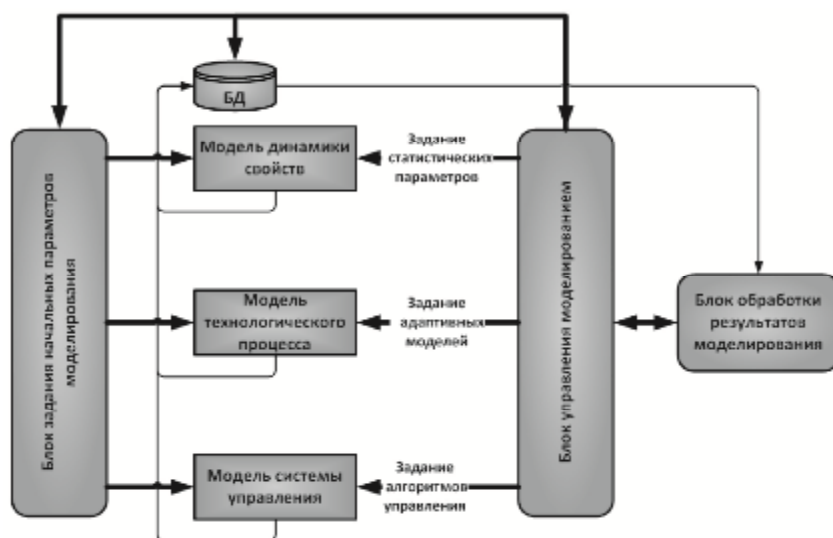


Рис. 3. Общая структура имитационной модели

На основе анализа списков контролируемых параметров и известных связей между отдельными параметрами всего получено 44 уравнения [6, 7, 8]. По выходному параметру они распределены следующим образом:

- Выходной параметр прочность – 8 уравнений;
- Выходной параметр плотность – 16 уравнений;
- Выходной параметр пористость капиллярная – 6 уравнений;
- Выходной параметр пористость воздушная – 6 уравнений;
- Выходной параметр пористость интегральная – 6 уравнений;
- Выходной параметр пористость – 2 уравнения.

По виду связи уравнения связи имеют вид:

**ЛИНЕЙНАЯ**

$$Y = a \cdot X + b, \tag{1}$$

**ЛОГАРИФМИЧЕСКАЯ**

$$Y = a \cdot \ln(X) + b, \tag{2}$$

**ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ 4-го порядка**

$$Y = a_1 \cdot X^4 + a_2 \cdot P^3 + a_3 \cdot P^2 + a_4 \cdot P + b, \tag{3}$$

**ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ 2-го порядка**

$$Y = a_1 \cdot P^2 + a_2 \cdot P + b. \tag{4}$$

Разработана модель технологического процесса (Рис. 4).

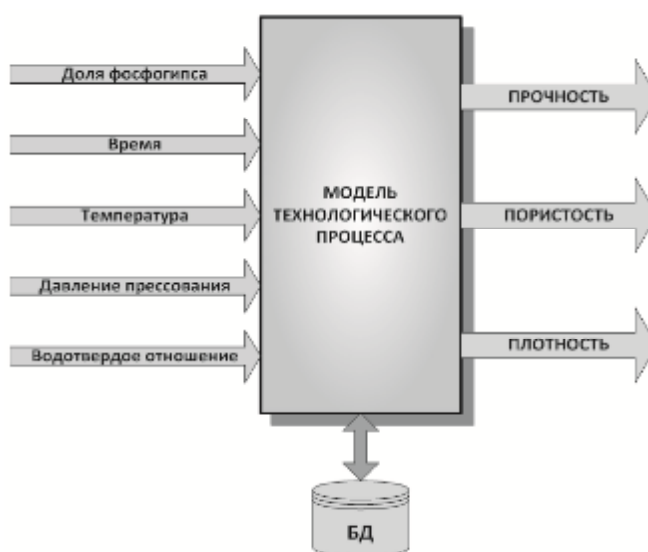


Рис. 4. Модель технологического процесса

Для моделирования вариации динамических характеристик показателей качества и параметров технологического процесса используем два показателя:

- Межпартионная вариация показателей показывает изменение свойств при новых поставках материалов –  $Y_i^{MP}(t)$ ;
- Внутрипартионная вариация показателей показывает изменение свойств для той или иной поставки материалов –  $Y_i^{VP}(t)$ .

В качестве модели вариации в момент времени  $t$  для  $i$ -ого показателя будем использовать следующее выражение:

$$Y_i^{SUM}(t) = Y_i^{MP}(t) + Y_i^{VP}(t) = n(t) \cdot D[Y_i^{MP}] + M[Y_i^{MP}] + n(t) \cdot D[Y_i^{VP}] + M[Y_i^{VP}], \tag{5}$$

где  $Y_i^{SUM}(t)$  – общая вариация в момент времени  $t$  для  $i$ -ого показателя;  
 $n(t)$  – случайное число в момент времени  $t$ . Закон распределения нормальный, математическое ожидание  $M[Y_i] = 0$ , а дисперсия  $D[Y_i]$  равна дисперсии соответствующего случайного сигнала.

Для моделирования динамических характеристик в соответствии с выражениями (5) используется пакет программ Simulink MATLAB (рис. 5). При моделировании общей вариации в данной реализации принята для межпартионной вариации доля в 80 %, а для внутрипартионной вариации 20 % (рис. 6).

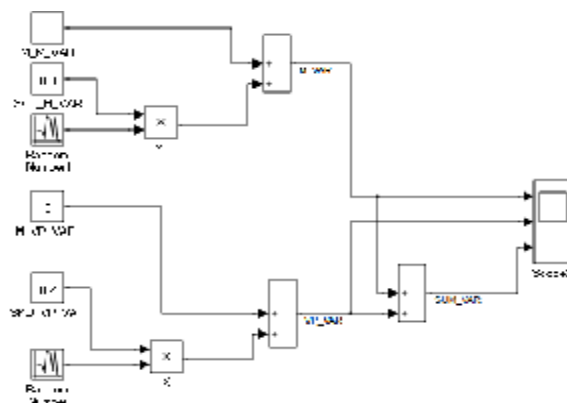


Рис. 5. Объединенная модель межпартионной и внутрипартионной вариаций

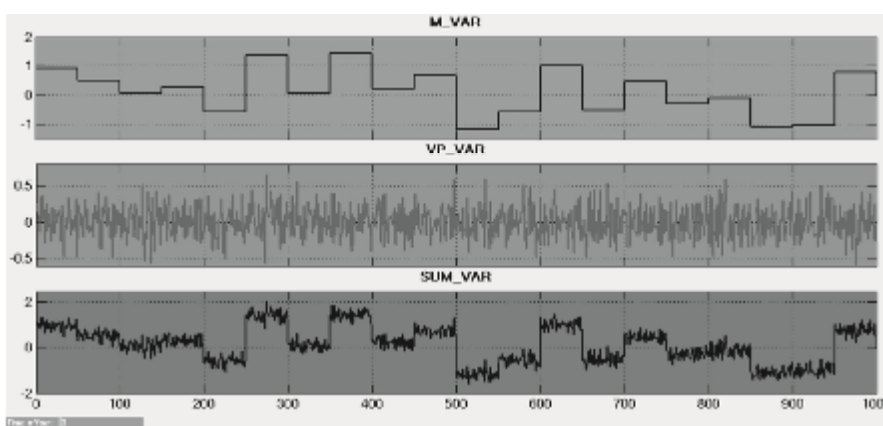


Рис. 6. Результат моделирования межпартионной и внутрипартионной вариаций.  
Доля межпартионной вариации 80 %, доля внутрипартионной вариации 20 %

Проведенные исследования и результаты исследований других авторов [6, 8] показывают, что динамика показателей качества может быть адекватно представлена в виде модели временного ряда с дискретным временем. В общем виде модель формирующего фильтра может быть представлена в виде комбинированной модели авторегрессии – скользящего среднего (АРСС)

$$x[n] = -\sum_{i=1}^p \alpha[i] \cdot x[n-i] + \sum_{k=1}^q b[k] \cdot u[n-k], \quad (6)$$

где  $x[n]$  – последовательность на выходе фильтра;

$u[n]$  – входная возбуждающая последовательность (центрированный и нормированный импульс типа «белый шум»);

$p, q$  – порядок модели авторегрессии и скользящего среднего соответственно;

$\alpha[i], b[k]$  – вектора коэффициентов модели.

Динамическую модель (6), ее эффективность во многом определяют адекватные значения коэффициентов.

Как показывают многочисленные примеры, представленные в литературных источниках [7, 8], а также наш опыт на практике относительно редко используют модели скользящего среднего порядка  $q$  – СС( $q$ ) и комбинированной модели авторегрессии – скользящего среднего (АРСС).

Гораздо большее применение находит представление временного ряда с использованием модели авторегрессии порядка  $p$  – АР( $p$ ). Авторегрессионная (AR-) модель (англ. autoregressive model) — модель временных рядов, в которой значения временного ряда в данный момент линейно зависят от предыдущих значений этого же

ряда [8]. Авторегрессионный процесс порядка  $p$  (AR( $p$ )-процесс) определяется следующим образом:

$$x[n] = C + \sum_{i=1}^p \alpha[i] \cdot x[n-i] \quad (7)$$

где  $C$  – постоянная (часто для упрощения предполагается равной нулю, тогда процесс является центрированным.)

Для модели (7) необходимо найти значения параметров  $C$  и  $\alpha[i]$  на основе статистических характеристик моделируемого процесса.

Параметр  $C$  представляет собой математическое ожидание случайной величины. В ряде случаев случайная величина центрируется. Тогда  $C=0$ .

Значения коэффициентов  $\alpha[i]$  находятся из решения системы уравнений Юла-Уоркера вида [1, 7]:

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{p-1} \\ \rho_1 & 1 & \dots & \rho_{p-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{p-1} & \rho_{p-2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha[1] \\ \alpha[2] \\ \dots \\ \alpha[p] \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_p$  – значения автокорреляционной функции процесса для временных сдвигов  $1, 2, \dots, p$ ;

$\alpha[1], \alpha[2], \dots, \alpha[p]$  – искомые коэффициенты (3.9).

Значения автокорреляционной функции для стационарного процесса можно вычислить по формуле:

$$\rho[k] = \frac{\sum_{i=1}^{N-k} (x[i]-\bar{x})(x[i+k]-\bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N-k} (x[i]-\bar{x})^2 \sum_{i=1}^{N-k} (x[i+k]-\bar{x})^2}} \quad (9)$$

где

$$\bar{x} = \frac{1}{N-k} \cdot \sum_{i=1}^{N-k} x[i]. \quad (10)$$

Для моделирования динамических характеристик показателей качества компонентов и готовой смеси, параметров технологического процесса используется пакет программ Simulink MATLAB. представляет модель показателя с учетом межпартионной (MP), внутрипартионной (VP) и общей вариации (SUM) в системе Simulink MATLAB. При этом моделирующие фильтры соответствуют следующим передаточным функциям.

Для межпартионной вариации:

$$F_{MP}(z) = \frac{1}{1-0.95z^{-1}+0.1z^{-2}} \quad (11)$$

Для внутрипартионной вариации:

$$F_{VP}(z) = \frac{1}{1+0.5z^{-2}} \quad (12)$$

Рис. 6 представляет структуру в системе Simulink MATLAB, которая моделирует внутрипартионную (VP) и межпартионную (MP) вариации в соответствии с выражениями (11) и (12) для фильтров.

На рисунке (Рис. 8) представлены результаты моделирования в соответствии с моделью (рис. 7) в Simulink MATLAB. Общая длина реализации – 1000 точек может быть изменена, так же как и все другие параметры фильтров.

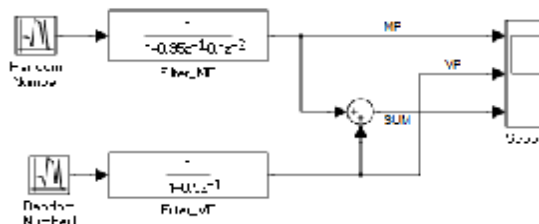


Рис. 7. Модель межпартионной (MP), внутрипартионной (VP) и общей вариации (SUM) в системе Simulink MATLAB

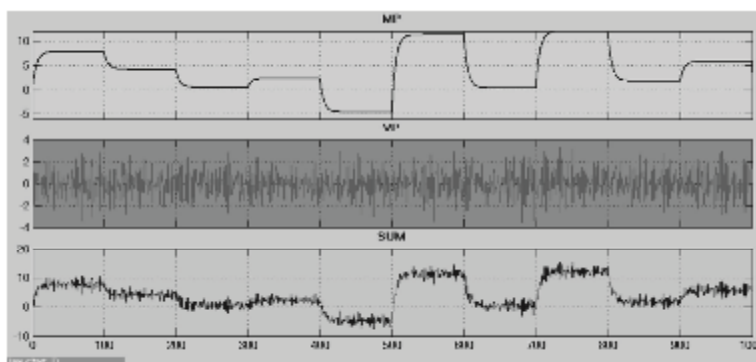


Рис. 8. Результат моделирования межпартионной (MP), внутрипартионной (VP) и общей вариации (SUM) в системе Simulink MATLAB

Необходимость прогнозирования свойств материалов и значений параметров технологического процесса обусловлена наличием в технологическом процессе транспортного запаздывания.

Пусть в момент времени  $t_0$  имеется набор характеристик компонентов  $X[t_0]$  и параметров технологического процесса  $TP[t_0]$ . Через время  $\tau$  (транспортное запаздывание) на выходе технологического процесса будет получен набор характеристик готового изделия из фосфогипса  $Y[t + \tau]$ . В это время на выход технологического процесса действует совокупное возмущение  $F[t + \tau]$  (рис. 9).

Эту связь можно представить в следующем виде:

$$Y[t + \tau] = \psi\{X[t_0], TP[t_0]\} + F[t + \tau]. \tag{13}$$

Но в момент времени  $t_0$  будущее значение  $F[t + \tau]$  неизвестно и не доступно для измерения. Это ставит задачу прогнозирования  $F[t + \tau]$  на период управления, который совпадает со значением  $\tau$ .

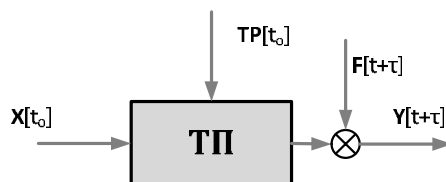


Рис. 9. Модель технологического процесса производства фосфогипса с учетом запаздывания

В момент времени  $t_{0-1}$  известны следующие значения  $\{X[t_{0-1}], TP[t_{0-1}], Y^f[t_0]\}$ , где  $Y^f[t_0]$  – фактическое (измеренное) значение свойств готового изделия. Тогда можно записать:

$$F[t_0] = Y^f[t_0] - \psi\{X[t_0], TP[t_0]\}. \tag{14}$$

Тогда в момент времени  $t_0$  имеется набор характеристик вычисленного возмущения:

$$\{F[t_0]; F[t_0 - 1]; F[t_0 - 2]; \dots; F[t_0 - k]\}. \tag{15}$$

На основе (15) можно построить модель авторегрессии порядка  $p$  – AP(p):

$$F[t_0] = \alpha[1]F[t_0 - 1] + \alpha[2]F[t_0 - 2] + \dots + \alpha[p]F[t_0 - p] + \delta. \tag{16}$$

где  $\alpha[1], \alpha[2], \dots, \alpha[p]$  – коэффициенты авторегрессионной модели;  $\delta$  – ошибка (математическое ожидание равно нулю).

Тогда для момента времени  $[t_0 + 1]$  можно из выражения (16) записать прогноз совокупного возмущения:

$$F[t_0 + 1] = \alpha[1]F[t_0] + \alpha[2]F[t_0 - 1] + \dots + \alpha[p]F[t_0 - p + 1]. \tag{17}$$

Так как ошибка  $\delta$  имеет нулевое математическое ожидание, то ее прогноз равен нулю. На основе приведенных выше выражений можно реализовать прогноз возмущения. Обобщенный алгоритм моделирования САУ представлен на рисунке (рис. 10).

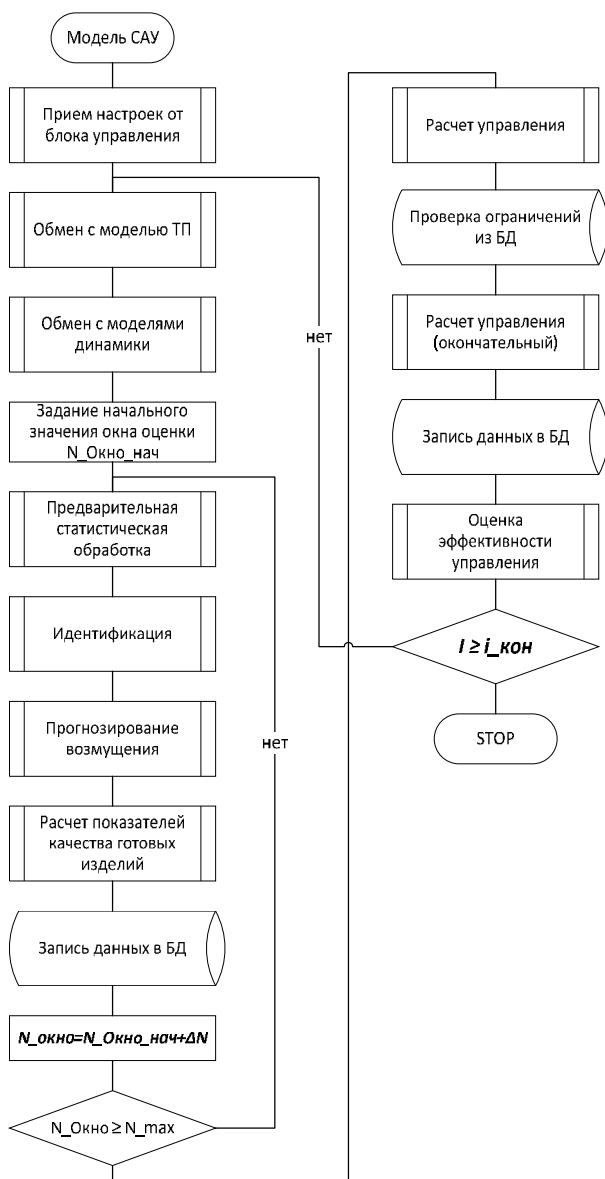


Рис. 10. Алгоритм моделирования САУ

Представленный алгоритм обеспечивает решение всех поставленных задач моделирования. В алгоритме (рис. 10) реализовано два цикла:

- Цикл, обеспечивающий оперативную адаптацию модели к внешним условиям, за счет поиска оптимального значения окна оценки.
- Цикл, обеспечивающий требуемое значение числа циклов моделирования, что повышает статистическую достоверность проводимых вычислений.

Расчет управления проводится дважды:

- Предварительный расчет управления. Эти значения проверяются на известные ограничения, уточняются и в результате проводится
- Расчет управления окончательный, который удовлетворяет всем известным на данный момент времени ограничениям.

В алгоритме предусмотрена оценка эффективности управления в соответствии с квадратичными целевыми функциями.



**Список библиографических ссылок**

1. Мирсаев Р.Н., Недосеко И.В., Бабков В.В. Фосфогипсовые отходы химической промышленности в производстве стеновых изделий. – М.: Химия, 2004. – 176 с.
2. Мирсаев Р.Н., Недосеко И.В., Бабков В.В. Опыт производства и эксплуатации гипсовых стеновых изделий // Строительные материалы, 2008, № 3. – С. 78-80.
3. Мирсаев Р.Н., Недосеко И.В., Бабков В.В. Гипсошлаковые композиции из отходов промышленности в строительных технологиях // Строительные материалы, 2010, № 7. – С. 4-6.
4. Белов В.В. Теоретические основы методики оптимизации гранулометрического состава композиции для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века, 2012, № 6 (161). – С. 43-45.
5. Петропавловская В.Б., Белов В.В., Бурьянов А.Ф. Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем негидратационного твердения // Строительные материалы, 2010, № 7. – С. 22-23.
6. Булатов Б.Г., Недосеко И.В. Разработка структуры системы управления производством стеновых изделий на основе гипсосодержащих отходов // Вестник Башкирского государственного аграрного университета, 2014, № 2 (30). – С. 109-112.
7. Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. Пер. с англ. Вып.1-2. Под ред. В.Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1974, Кн. 1. – 406 с. Кн. 2. – 197 с.
8. Воробьев В.А., Суворов Д.Н., Котлярский Э.В., Доценко В.И., Попов В.А. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Кн. 2. Практические разработки. – М., Изд-во Российской инженерной академии, 2008. – 608 с.

**Bulatov B.G.** – assistant

E-mail: [bfd82@mail.ru](mailto:bfd82@mail.ru)

**Ufa Bashkir state agrarian University**

The organization address: 450001, Russia, Ufa, 50th Anniversary of October st., 34

**Nedoseko I.V.** – doctor of technical sciences, professor

E-mail: [nedoseko1964@mail.ru](mailto:nedoseko1964@mail.ru)

**Ufa State oil technical University**

The organization address: 450062, Russia, Ufa, Cosmonauts st., 1

**The model for the creation and study of systems  
of production management of phosphogypsum****Resume**

The work connected with automation of the main production process and the option of technological schemes of production with common process steps. Ongoing research and the results obtained will allow to develop a program to calculate the compositions of raw mixtures on the basis of phosphogypsum «Optimum» necessary for the development of the production of wall and partition products for low-rise construction, and stabilize the technological process and to improve the quality of the finished product.

**Keywords:** phosphogypsum, process operation, automatic control system, proportional-integral-differential control, the management stages.

**Reference list**

1. Mirzaev R.N., Nedoseko I.V., Babkov V.V. Experience in the production and exploitation of gypsum wall products // Building materials, 2008, № 3. – P. 78-80.
2. Mirzaev R.N., Nedoseko I.V., Babkov V.V. and others. Fosfogipsovaya waste of the chemical industry in the manufacture of wall products. – M.: Khimiya, 2004. – 176 p.
3. Mirzaev R.N., Nedoseko I.V., Babkov V.V. Gypsumslag composition of industrial wastes in construction technology // Building materials, 2010, № 77. – P. 4-6.
4. Belov V. V. Theoretical basis of methods of optimizing the granulometric composition of the composition for the manufacture of chemically bonded construction conglomerates // Building materials, equipment, technologies of XXI century, 2012, № 6 (161). – P. 43-45.
5. Petropavlovskaja B.V., Belov V.V., Burjanov A.F. Optimization of the internal structure of disperse systems dehydration hardening // Building materials, 2010, № 7. – P. 22-23.
6. Bulatov B.G., Nedoseko I.V. Designing the structure of a control system of production of wall materials based on gypsum-containing wastes // Vestnik BGAU, 2014, № 2 (30). – P. 109-112.
7. Box G., Jenkins G. Time series Analysis. Prognosis and management. TRANS. angl., Vol. 1-2. Under the editorship of V.F. Pisarenko. – M.: Mir, 1974, Book 1. – 406 p. Book 2. – 197 p.
8. Vorob'ev V.A., Suvorov D.N., Kotlyarska E.V., Dotsenko V.I., Popov V.A. Computer simulation automate the production of asphalt mixtures, Book 2, Practical development. – M.: Publishing house of the Russian engineering Academy, 2008. – 608 p.