

Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет  
Институт прикладной математики и механики  
Кафедра “Механика и Процессы Управления”

## **ДИССЕРТАЦИЯ на соискание академической степени МАГИСТРА**

**Тема: Совместная разработка объекта и системы управления на примере  
смесительно-усреднительных автоматизированных комплексов**

Направление: 151600 – Прикладная механика

Магистерская программа: 151600.68.01 – Вычислительная механика и компьютерный инжиниринг

Выполнил студент гр. 63602/1

Денисов Н.В.

Руководитель, д.т.н., проф.

Яковис Л.М.

Консультанты:

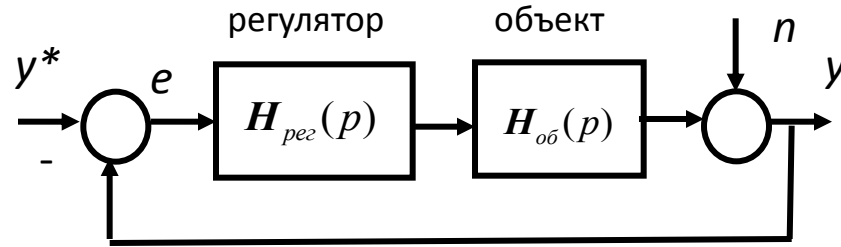
По истории механики, к.ф.-м.н., проф.

Смольников Б.А.

По вопросам охраны труда, к.т.н., доц.

Монашков В.В.

# Два подхода к оптимизации управляемых систем



$$e = \frac{1}{1 + H_{рег}(p)H_{об}(p)}(y^* - n)$$

Традиционная задача оптимизации регулятора

Задан объект управления  $H_{об}(p)$ . Найти регулятор  $H_{рег}(p)$ , решив задачу:

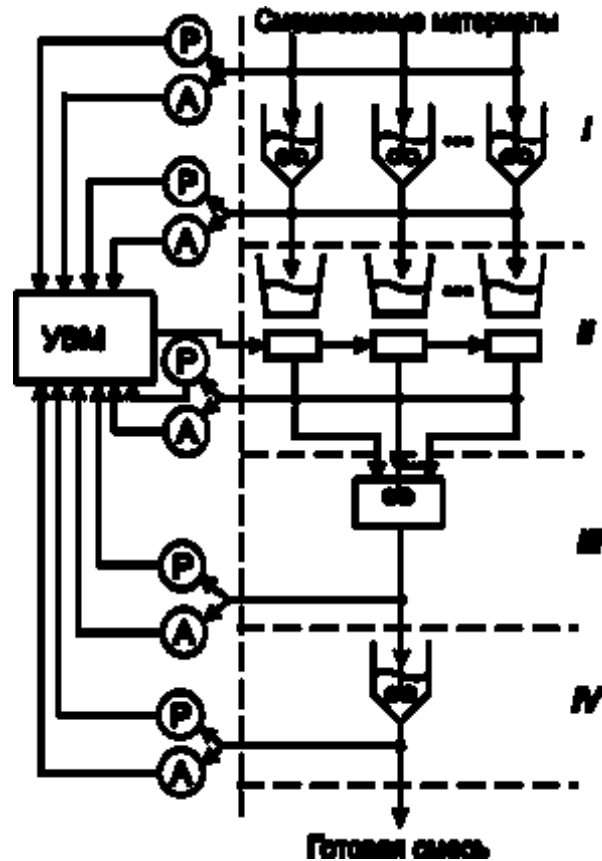
$$\min_{H_{рег}(p)} \left\{ J(e) \mid H_{рег}(p) \in \mathbf{G}_{рег}(p) \right\}$$

Задача оптимизации системы «Объект – регулятор»

Найти объект  $H_{об}(p)$  и регулятор  $H_{рег}(p)$ , решив задачу:

$$\min_{H_{рег}(p), H_{об}(p)} \left\{ J(e) \mid H_{рег}(p) \in \mathbf{G}_{рег}(p), H_{об}(p) \in \mathbf{G}_{об}(p) \right\}$$

# Блок-схема АТК приготовления многокомпонентной смеси



Стадии производства смесей:

- I – усреднение предварительное;
- II – дозирование;
- III – смешивание;
- IV – окончательное усреднение.

УВМ – управляющая вычислительная машина,  
А – анализаторы, Р – расходомеры.

# Модель штабельного усреднительного склада

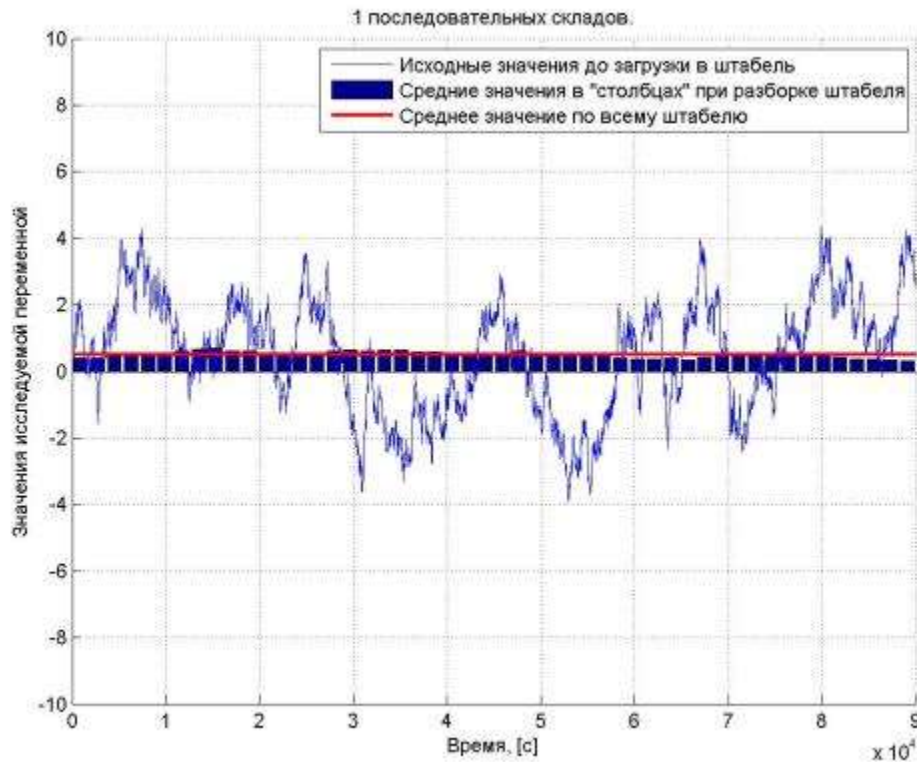


Основной принцип функционирования склада – продольная загрузка и поперечная разгрузка.

Алгоритм работы склада:

1. Исходный материальный поток поступает на вход склада;
2. Штабелеукладчик возвратно-поступательными движениями укладывает исходный поток слоями;
3. Разгрузочное устройство, двигаясь с постоянной скоростью вдоль склада, разрыхляет материал в поперечном сечении штабеля и сбрасывает его на приемный конвейер, формируя таким образом поток на выходе склада.

# Влияние склада на поток



Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 50;
- Количество столбцов  $r$ : 50;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 1 склада.

Параметры сигнала:

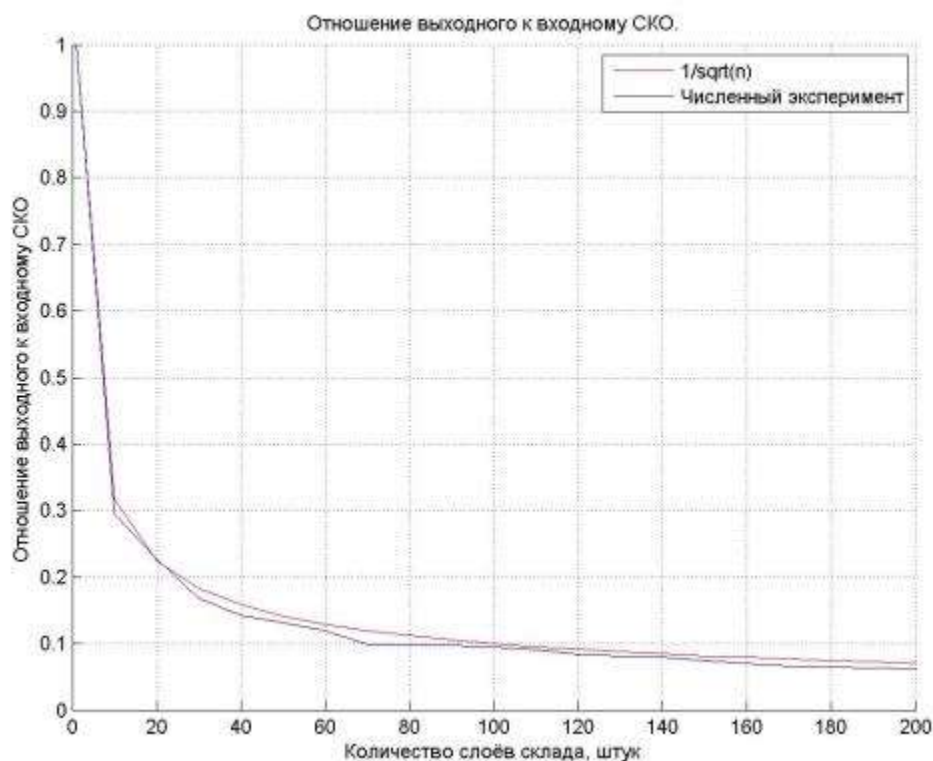
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 1 час.

# Влияние склада на поток



На каждом отрезке «большой» реализации склад усредняет к среднему именно на этом отрезке, а не к среднему по всей реализации.

# Влияние склада на поток СКО потока



Параметры склада:

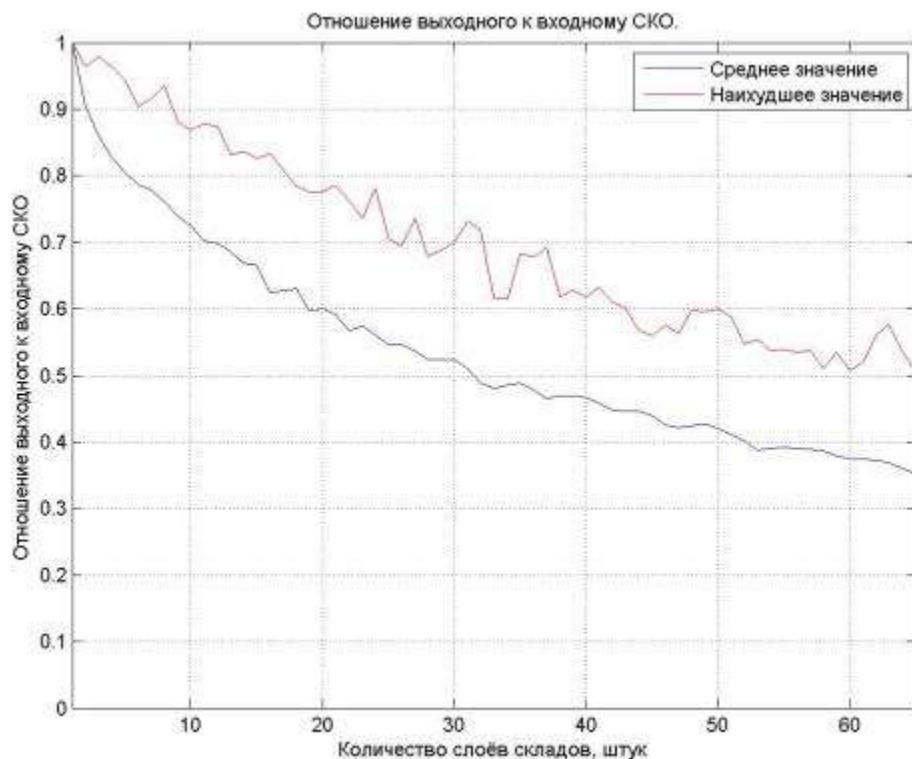
- Количество слоёв  $n$ : 10:10:200;
- Количество столбцов  $r$ : 100;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 1 склада.

Параметры сигнала:

- 10 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 0:100:7200 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 14600 численных экспериментов.

# Влияние склада на поток СКО потока



Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 1:1:65;
- Количество столбцов  $r$ : 50;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

Параметры сигнала:

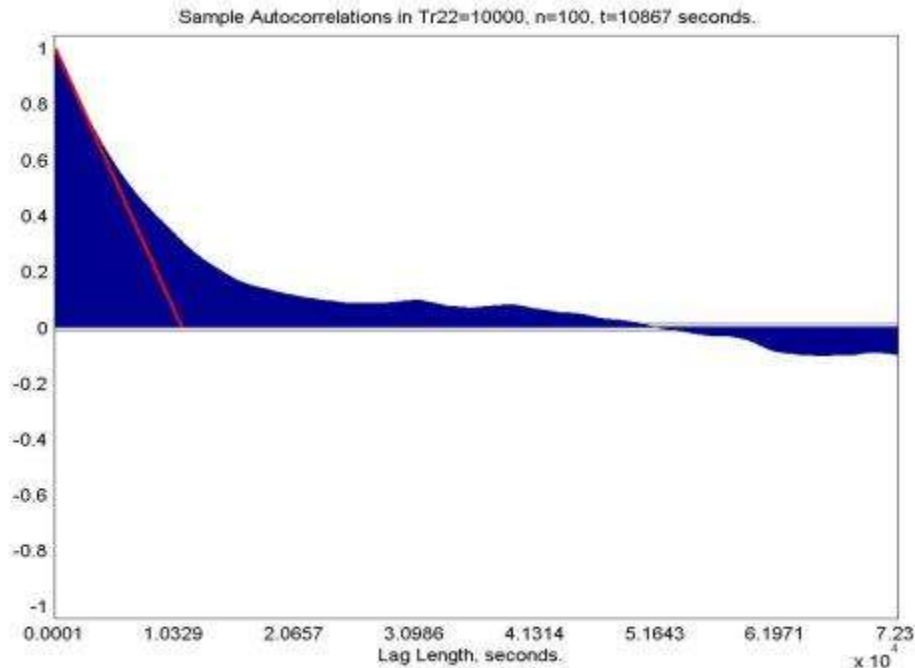
- 50 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 0:100:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 328250 численных экспериментов.



# Влияние склада на поток Спад автокорреляционной функции потока

На входе склада спад равен 10867 секундам (3 часа 1 минута 7 секунд)



Параметры склада:

- Количество слоёв **n**: 100;
- Количество столбцов **r**: 30;
- Время загрузки одного слоя **t**: 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

Параметры сигнала:

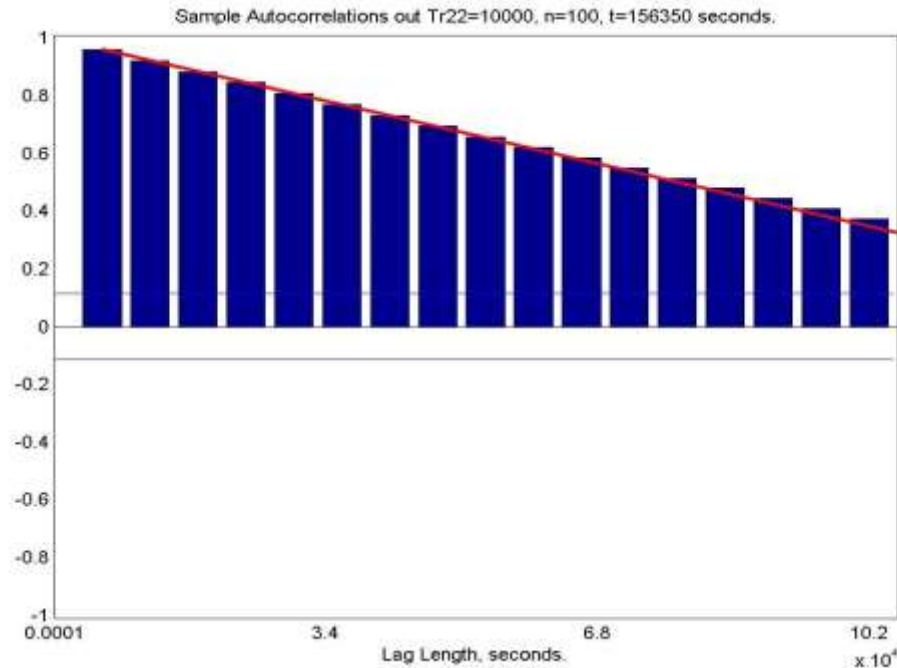
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 10000 секунд.

Спад автокорреляционной функции потока находится графическим способом при помощи касательной в первой точке графика. Полученный результат близок к теоретическому (погрешность 8,7%).

# Влияние склада на поток

## Спад автокорреляционной функции потока

- На выходе склада спад равен 156350 секундам (43 часа 25 минут 50 секунд)



Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

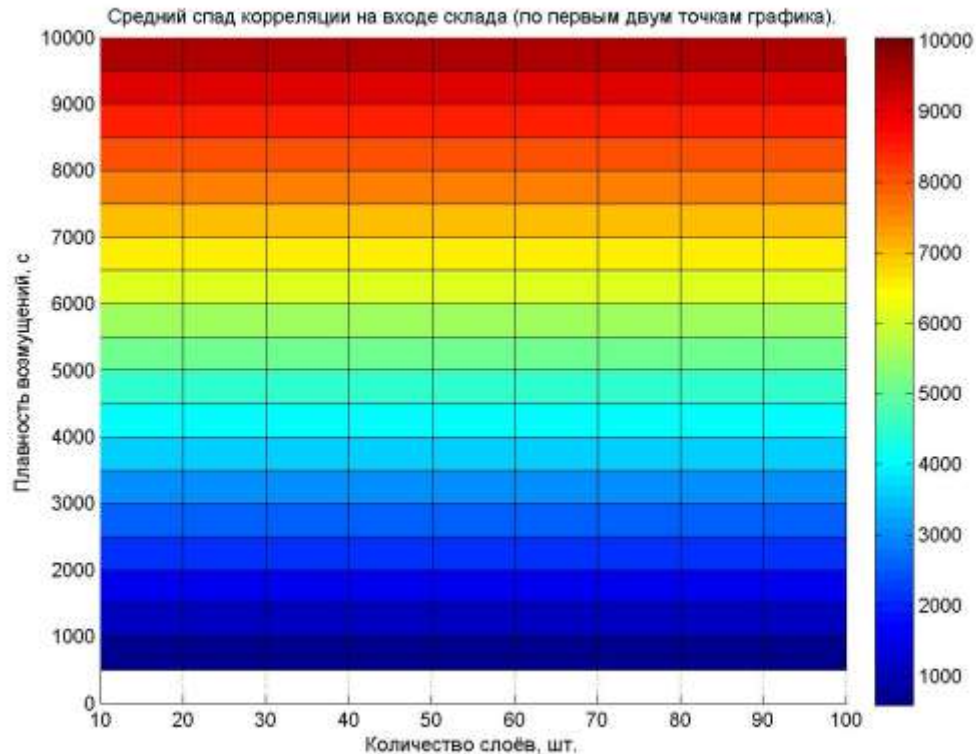
Параметры сигнала:

- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 10000 секунд.

Спад автокорреляционной функции потока при прохождении через склад увеличился более, чем в 14 раз. Увеличение данного показателя положительно сказывается на эффективности дальнейшей компенсации возмущений.

# Влияние склада на поток

## Спад автокорреляционной функции потока на входе склада



### Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 10:10:100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

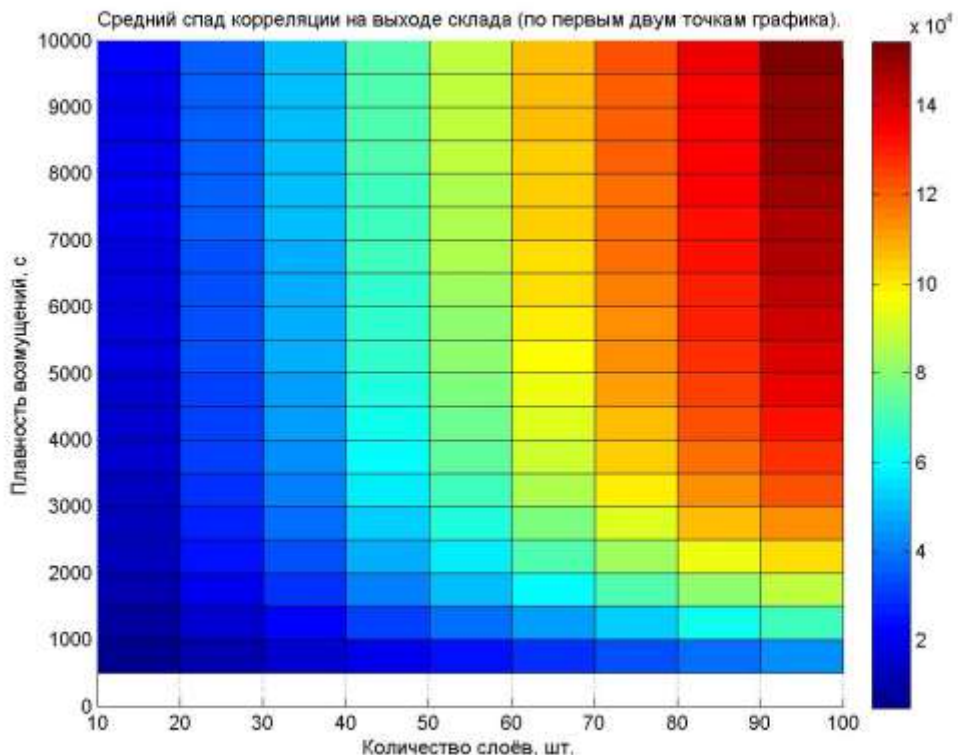
### Параметры сигнала:

- 40 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 500:500:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 8000 численных экспериментов.

# Влияние склада на поток

## Спад автокорреляционной функции потока на выходе склада



### Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 10:10:100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

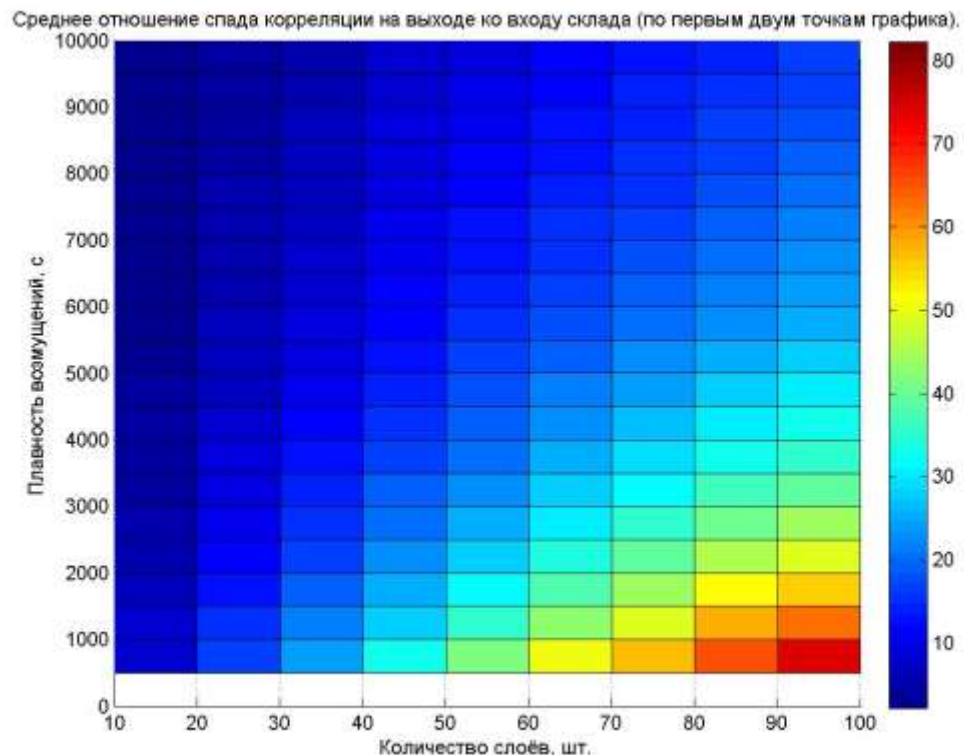
### Параметры сигнала:

- 40 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 500:500:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 8000 численных экспериментов.

# Влияние склада на поток

## Среднее отношение спада автокорреляционной функции потока на выходе склада к аналогичной функции на его входе



### Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 10:10:100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

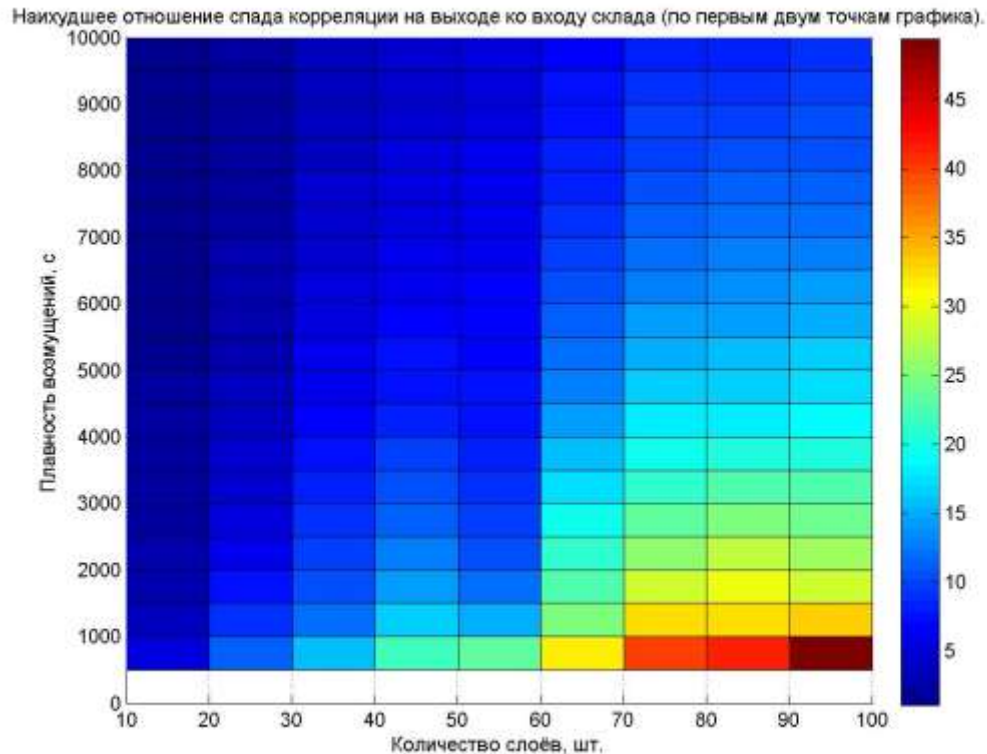
### Параметры сигнала:

- 40 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 500:500:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 8000 численных экспериментов.

# Влияние склада на поток

## Худшее отношение спада автокорреляционной функции потока на выходе склада к аналогичной функции на его входе



### Параметры склада:

- Количество слоёв  $n$ : 10:10:100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

### Параметры сигнала:

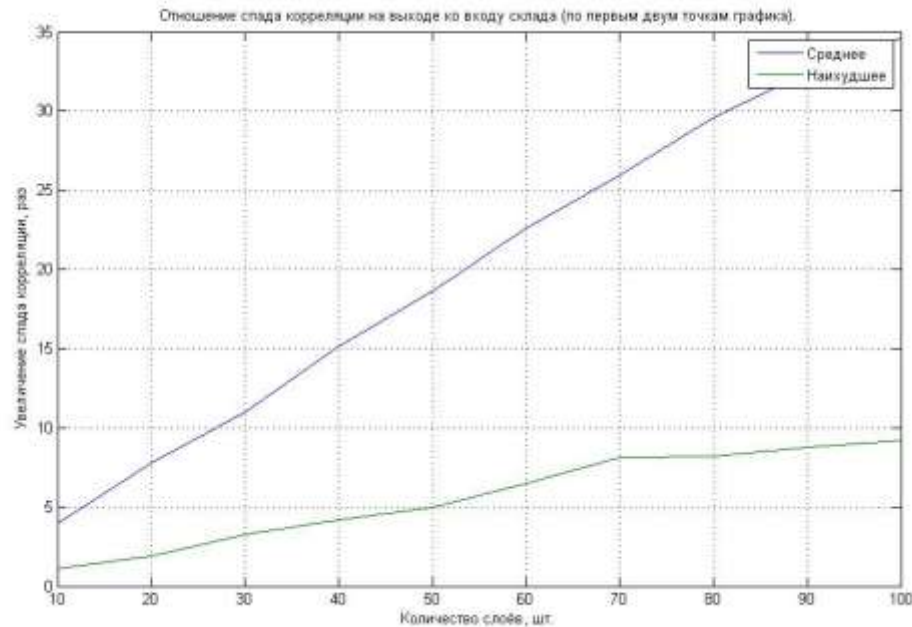
- 40 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 500:500:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 8000 численных экспериментов.



# Влияние склада на поток

## Отношение спада автокорреляционной функции потока на выходе склада к аналогичной функции на его входе



Параметры склада:

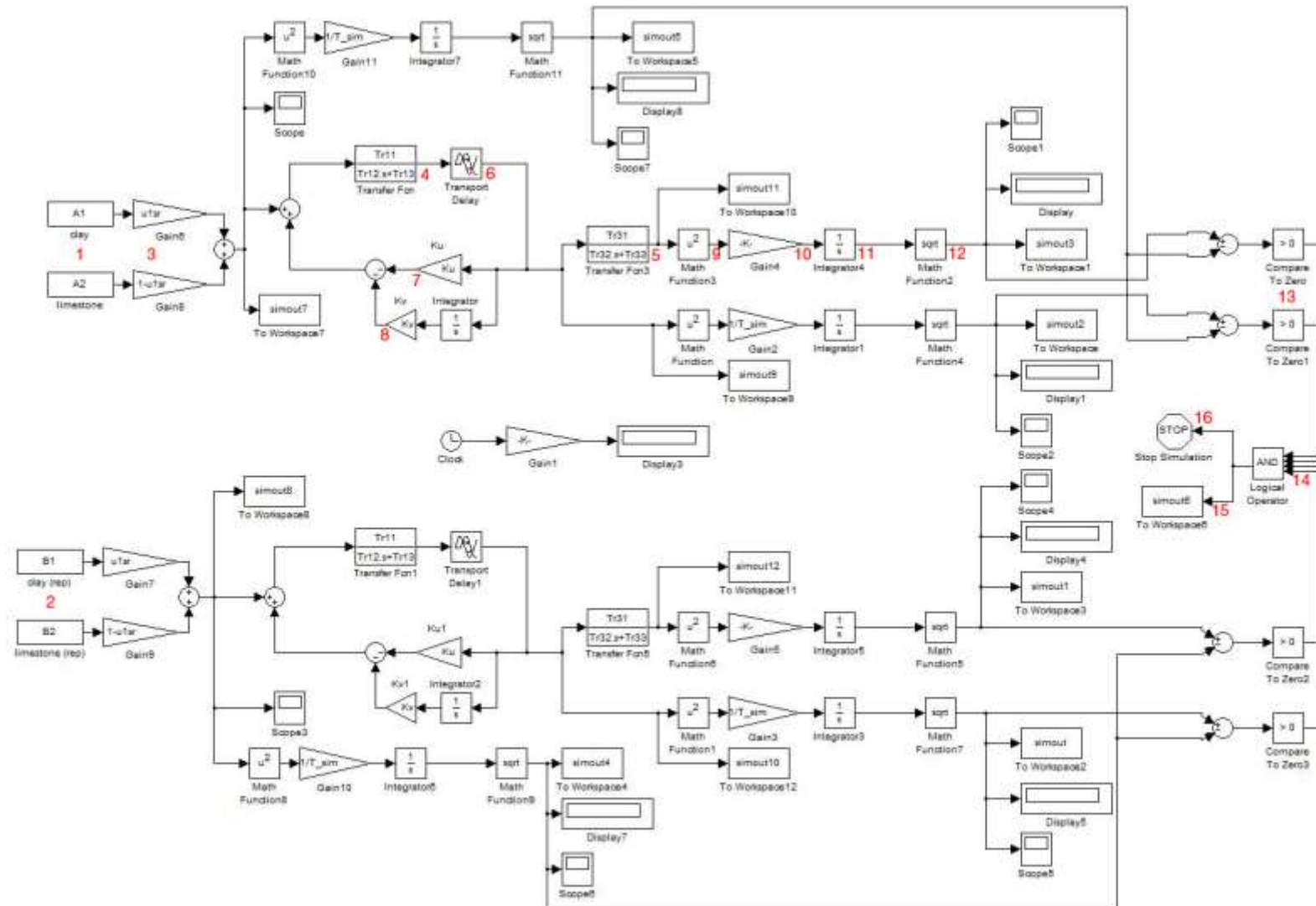
- Количество слоёв  $n$ : 10:10:100;
- Количество столбцов  $r$ : 30;
- Время загрузки одного слоя  $t$ : 30 минут;
- Длина реализации: длительность загрузки/разгрузки 10 складов.

Параметры сигнала:

- 40 реализаций белого шума;
- Спектральная плотность мощности белого шума: 0.1 Дж;
- Постоянная времени фильтра белого шума: 500:500:10000 секунд.

На графике приведены данные, полученные на основании 8000 численных экспериментов.

# Имитационная модель АТК







## Задачи проектирования АТК

- для каждого из вариантов, оптимизировав настройки ПИ-регулятора, выбрать наименьшую по объему емкость усреднителя смеси, которая в совокупности с системой предварительного усреднения и системой управления смешиванием материалов позволит обеспечить требуемый показатель стабильности смеси на выходе смесительно-усреднительного АТК (заданное среднеквадратическое отклонение);
- из полученных управляемых технологических схем выбрать ту, реализация которой потребует наименьших затрат.

# Варианты АТК

Вариант АТК	Склад 1 компонента (известняк)	Склад 2 компонента (глина)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

# Параметры АТК

Примем следующие значения параметров сравниваемых вариантов АТК:

$$Tr_{11} = Tr_{13} = Tr_{23} = Tr_{31} = Tr_{33} = 1 \quad Tr_{12} = 0c \quad Tau = 1ч$$

$Tr_{32}$  – варьируемая величина (длительность заполнения усреднителя):

$$Tr_{32}^{\min} = 0c \quad Tr_{32\Delta} = 1000c \quad Tr_{32}^{\max} = 54000c = 15ч$$

Склады (одинаковые параметры для обоих компонентов смеси):

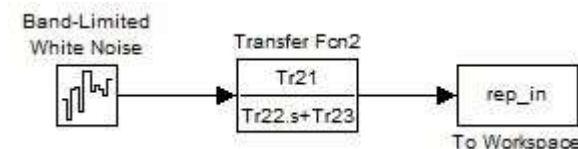
$$n = 50 \quad t = 1800c = 30\text{мин} \quad r = 50$$

Сырьё №1 (известняк):

$$Tr_{21} = 541 \quad Tr_{22} = 3600c = 1ч \quad \bar{\beta}_1 = 50\%$$

Сырьё №2 (глина):

$$Tr_{21} = 572 \quad Tr_{22} = 1800c = 30\text{мин} \quad \bar{\beta}_2 = 5\%$$



Параметры входящих потоков были подобраны таким образом, чтобы их СКО равнялись соответственно:

$$\sigma_1 \approx 2\% \quad \sigma_2 \approx 3\%$$

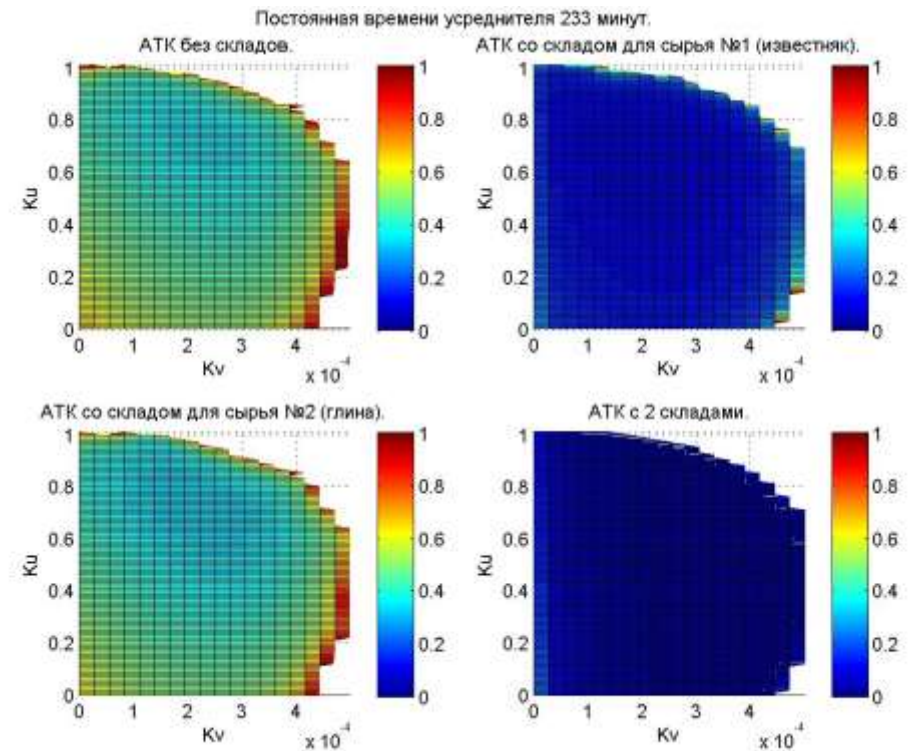
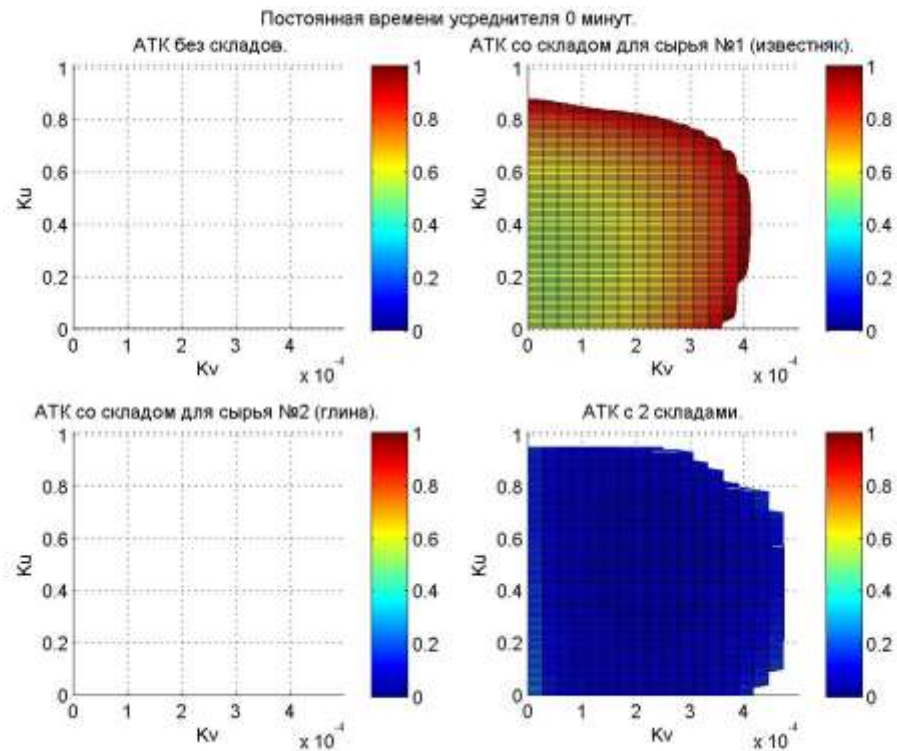
На выходе склада необходимо получить смесь со следующими параметрами:

$$\bar{\beta} = 42\% \quad \sigma \leq 0.1\%$$

# Результаты работы АК

АК с 2 складами достиг необходимого нам показателя выходного СКО без усреднительной ёмкости

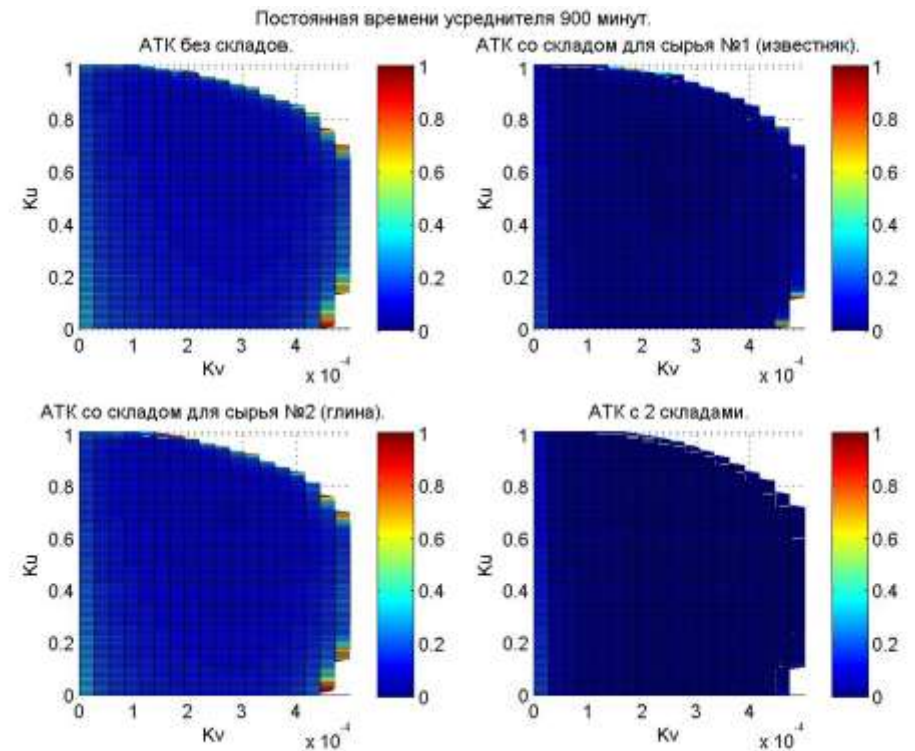
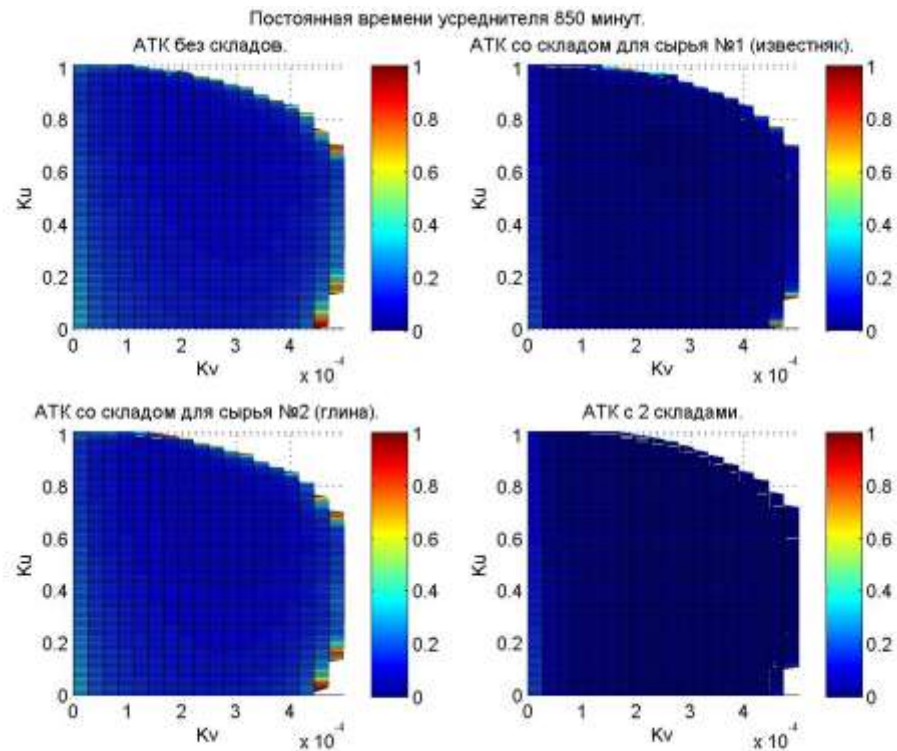
АК со складом для известняка понадобился усреднитель с длительностью заполнения 233 минуты (3 часа 53 минуты)



# Результаты работы АТК

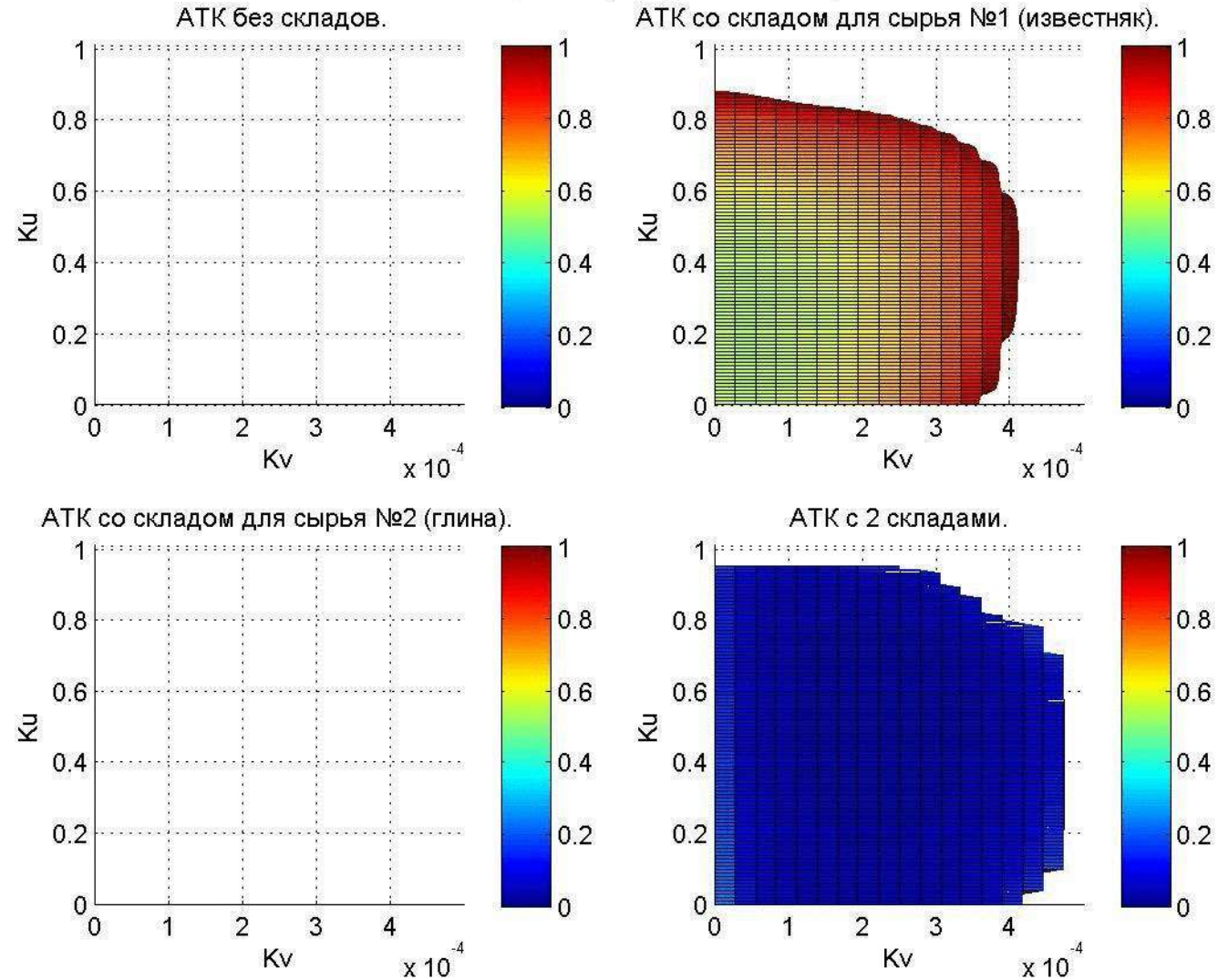
АТК со складом для глины понадобился усреднитель с длительностью заполнения 850 минут (14 часов 10 минут)

АТК без складов предварительного усреднения понадобился усреднитель с длительностью заполнения 900 минут (15 часов)



# Результаты работы АК

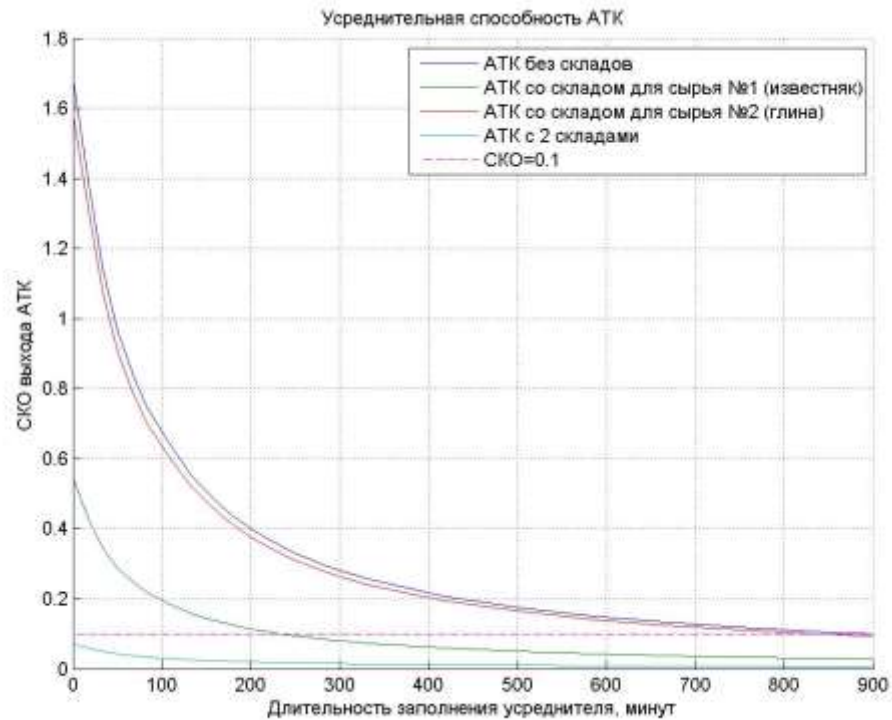
Постоянная времени усреднителя 0 минут.



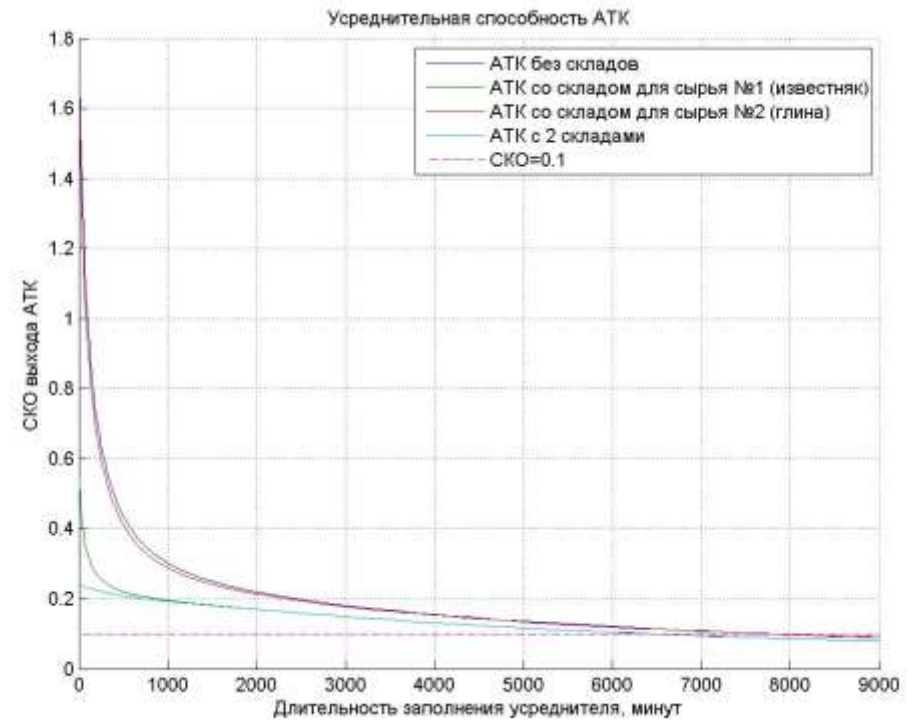


# Результаты работы АТК

АТК с учётом управления (подобраны оптимальные коэффициенты  $K_u$  и  $K_v$ )



АТК без учёта управления (коэффициенты  $K_u$  и  $K_v$  равны нулю)





# Результаты работы АТК

АТК с учётом управления (подобраны оптимальные коэффициенты  $K_u$  и  $K_v$ )

АТК без учёта управления (коэффициенты  $K_u$  и  $K_v$  равны нулю)

Необходимая длительность заполнения усреднителя	Вариант АТК	Необходимая длительность заполнения усреднителя
15 часов	Без складов	130 часов 40 минут
3 часа 53 минуты	Со складом для известняка	108 часов 20 минут
14 часов 10 минут	Со складом для глины	130 часов 40 минут
0 минут	С 2-мя складами	108 часов 20 минут

Ввиду колоссальной стоимости усреднительных агрегатов и мизерной на их фоне стоимости ПИ-регуляторов схему без управления рассматривать как потенциально экономически выгодную не будем.

# Выбор оптимального варианта АТК

Для определения затрат на строительство и эксплуатацию АТК была получена следующая формула:

$$S = (\gamma_{скл} \cdot (\bar{u}_1 \cdot n_{скл_1} \cdot t_{скл_1} + \bar{u}_2 \cdot n_{скл_2} \cdot t_{скл_2}) + \gamma_{уср} \cdot T_{уср}) \cdot Q$$

Формула для определения *удельных* затрат, с учётом весовых коэффициентов известняка и глины:

$$S_{уд} = 0.82 \cdot n_{скл_1} \cdot t_{скл_1} + 0.18 \cdot n_{скл_2} \cdot t_{скл_2} + 3T_{уср}$$

Для 4-ёх вариантов АТК были получены следующие удельные затраты:

Вариант АТК	Удельные затраты
Без складов	$S_{уд} = 162000 \frac{y.e. \cdot ч}{m}$
Со складом для известняка	$S_{уд} = 116000 \frac{y.e. \cdot ч}{m}$
Со складом для глины	$S_{уд} = 169000 \frac{y.e. \cdot ч}{m}$
С 2-мя складами	$S_{уд} = 90000 \frac{y.e. \cdot ч}{m}$

# Выводы

- В работе рассмотрена схема создания смесительно-усреднительного АТК, предусматривающая комплексную разработку технологической и информационно-управленческой структур.
- Разработана имитационная модель штабельного усреднительного склада с возвратно-поступательным движением штабелеукладчика и исследовано влияние склада на снижение амплитуды и изменение частотных характеристик входного материального потока.
- Применение системного подхода к разработке АТК продемонстрировано с использованием построенной имитационной модели на примере задачи оптимизации структуры и параметров управляемой схемы приготовления смеси заданного состава.