

# ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МАШИН И СИСТЕМ НАН УКРАИНЫ

## СИСТЕМА РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВНЕШНЕГО ОКРУЖЕНИЯ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ

---

Диссертация на соискание ученой степени кандидата  
технических наук  
по специальности 05.13.06 – Информационные технологии

**Серая Анна Андреевна**

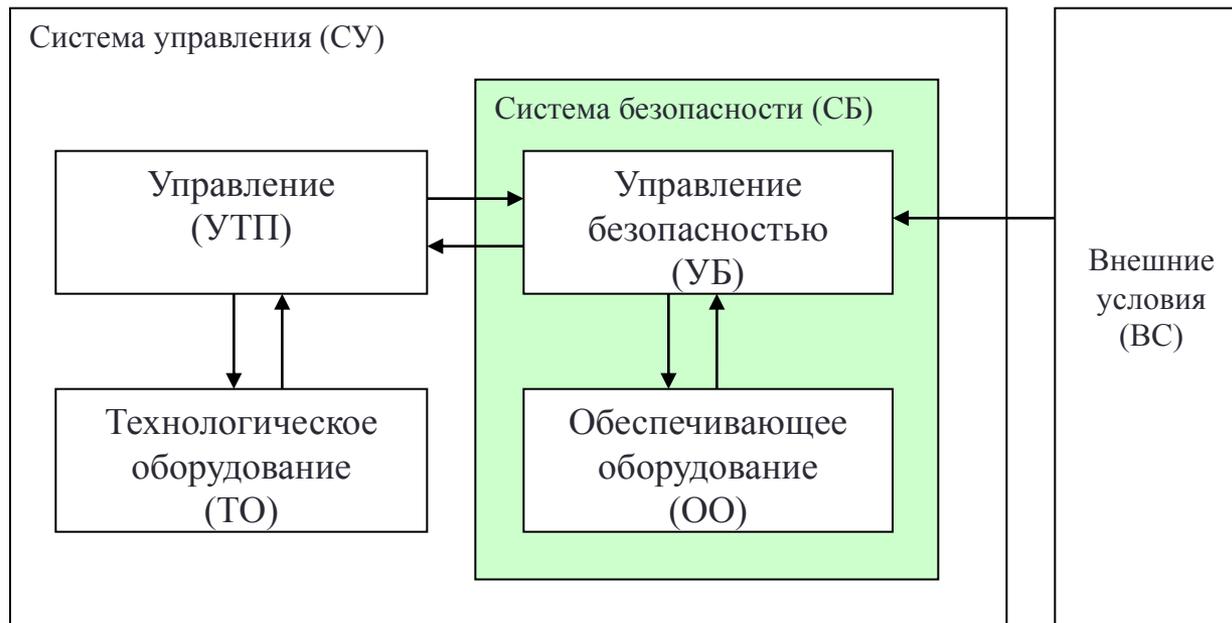
Научный руководитель д.т.н., проф.  
Казимир Владимир Викторович

Киев - 2012

# Объект и предмет исследования

- **Объект исследования** – процессы функционирования управляющих систем безопасности на потенциально опасном производстве (угольные шахты, химические предприятия, ядерные реакторы и т.п.).
- **Система безопасности** – часть системы управления, объединяющая в своем составе управляющие элементы и оборудование, обеспечивающее безопасное функционирование объекта управления (УТАС, УСБ АС, УСБ ХП и т.п.).
- **Безопасное функционирование** определяется условиями, в которых протекает технологический процесс. Данные условия вместе с объектом управления формируют **внешнее окружение систем безопасности**.
- **Предмет исследования** – методы, информационные технологии и средства построения распределенных имитационных моделей внешнего окружения систем безопасности.

# Схема работы системы безопасности



**Система безопасности** - реактивная система, работа которой характеризуется постоянной поддержкой взаимодействия с разнородным внешним окружением и реагированием на его изменения.

**Особенность исследования СБ** – невозможность проведения экспериментов в реальных условиях.

**Основной метод исследования** – распределенное имитационное моделирование.

## Существующие стандарты распределенного имитационного моделирования

1. **High Level Architecture (HLA)**. IEEE 1516, 1516.1 и 1516.2
2. **Distributed Interactive Simulation (DIS)**. IEEE 1278.1, 1278.2

№	Свойство	Наименование технологии	
		DIS	HLA
1	Использование объектно-ориентированного подхода	–	+
2	Наличие сервиса управления временем	+/-	+
3	Поддержка широкого спектра программно-аппаратных платформ	–	+
4	Гибкость архитектуры	–	+
5	Открытая технология	–	+
6	Масштабируемость	–	+
7	Наличие ограничений на язык программирования приложений	+	+
8	Наличие спецификаций на языках C++ и Java	–	+
<b>9</b>	<b>Методы формализации</b>	<b>–</b>	<b>–</b>

# Цель и задачи исследования

**Цель исследования** – разработка формального метода и программно-технологического инструментария системы распределенного моделирования на основе архитектуры HLA для моделирования внешнего окружения систем безопасности.

## **Задачи исследования:**

- анализ известных методов формализации в имитационном моделировании;
- усовершенствование теории агрегативных E-сетей как общей формальной основы построения разнородных элементов архитектуры HLA;
- разработка метода интеграции формальных моделей федератов в архитектуру HLA;
- усовершенствование формального аппарата E-сетей для моделирования непрерывных процессов внешнего окружения;
- расширение стандарта PNML для иерархических E-сетей;
- разработка архитектуры, алгоритмов функционирования и структурных компонентов web-системы распределенного моделирования на основе иерархических E-сетей;
- оценка эффективности разработанной распределенной системы имитационного моделирования;
- создание методики и примеров исследования систем безопасности с помощью разработанной системы имитационного моделирования.

# High Level Architecture (HLA)

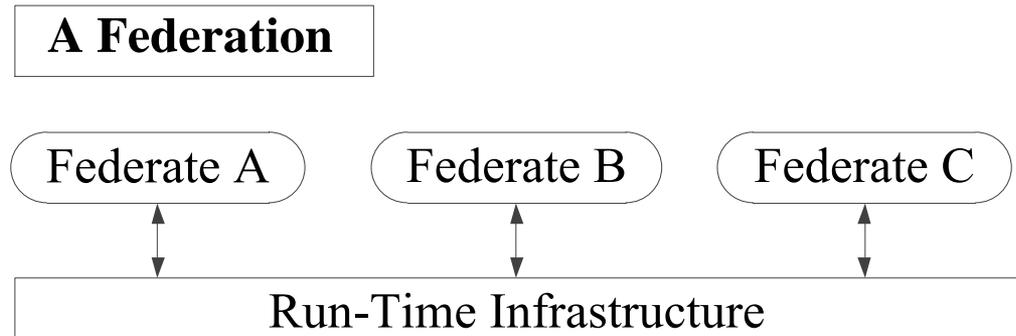
[Richard M. Fujimoto. Parallel and Distributed Simulation Systems // John Wiley & Sons, Inc., 2000. – 300p.]

Федерат – компонент имитационного моделирования (имитационная модель, тренажер, «живой участник»).

Федерация – объединение федератов, взаимодействующих в целях решения некоторой конкретной задачи.

## Компоненты HLA:

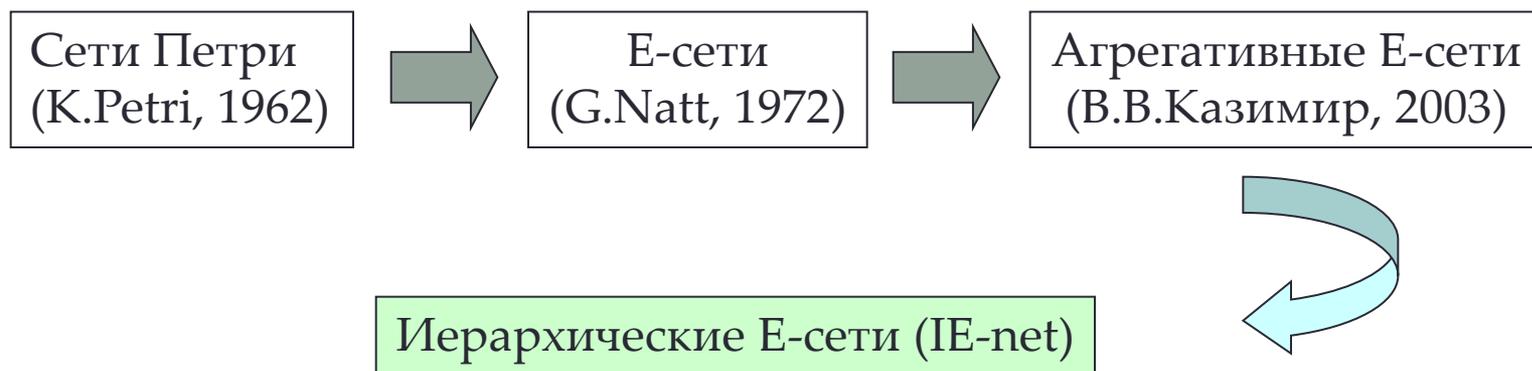
- Эталонная объектная модель (OMT)
- Правила федерации
- Спецификация интерфейсов



## Е-сети как средство формального описания поведения внешнего окружения

### Преимущества Е-сетей:

- возможность отображения потоков управления и данных;
- возможность количественного анализа моделируемых процессов;
- расширенные возможности реализации логических функций и механизмов маршрутизации развития процессов;
- поддержка объектно-ориентированного подхода;
- универсальная алгоритмическая система, эквивалентная машине Тьюринга.



# Формальное описание структуры федерации с помощью иерархических Е-сетей

Federation

$$Fed = \{F_k \mid k = \overline{1, n}\}, F_k \in F$$

Federate

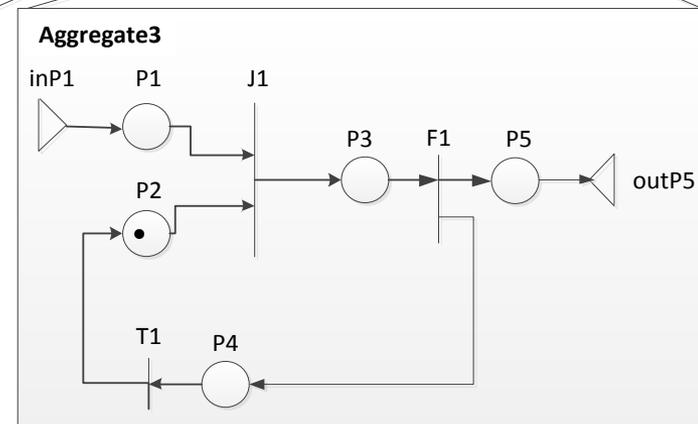
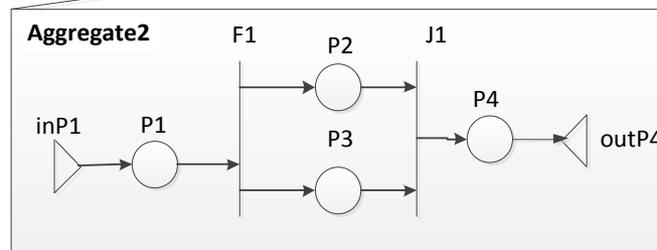
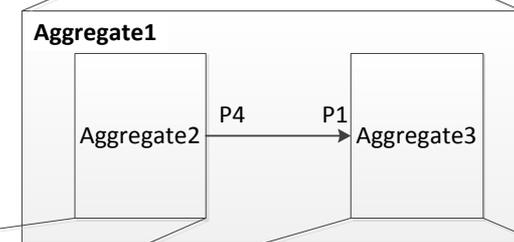
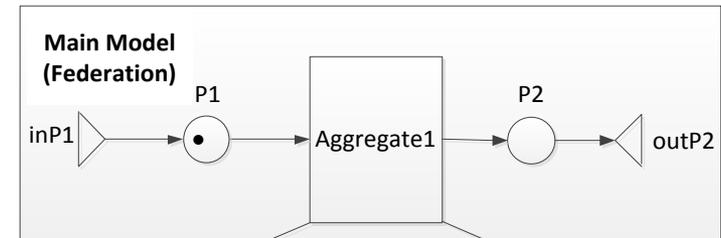
$$F_k = \{A_j \mid j = \overline{1, m}\}, A_j \in A$$

Aggregate

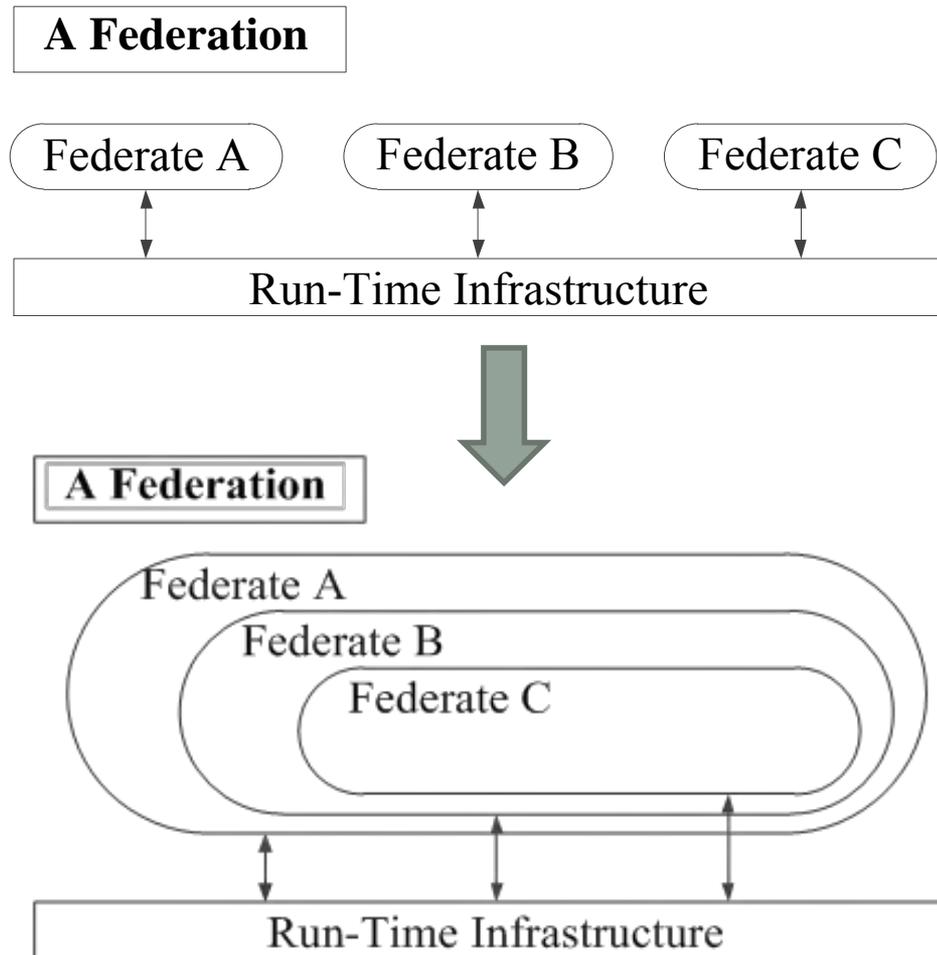
$$A_j = \{T_i \mid i = \overline{1, r}\}, T_i \in AUT$$

Переход

$T_i = (P, \tau, z)$  - кусочно-линейный агрегат (КЛА)



# Метод вложенных иерархических федератов



# Взаимодействие между федератами

1. Все обмены данными происходят через RTI
2. Механизм обмена реализован в виде подписки
3. Соглашения об обмене данными документируются в FOM.xml

4. Передача атрибутов метки:

$$d_i = (name, type, value, time), i = \overline{1, n}$$

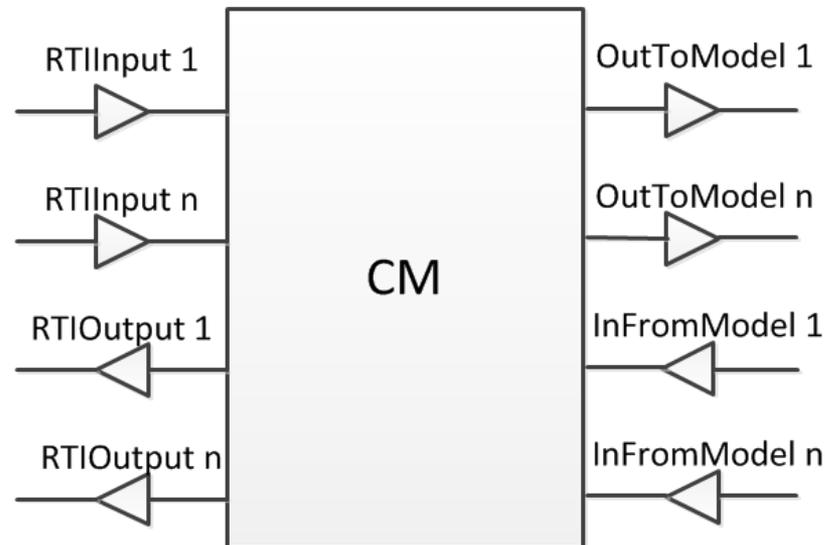
5. Передача событий:

$$V = V_I \cup V_O,$$

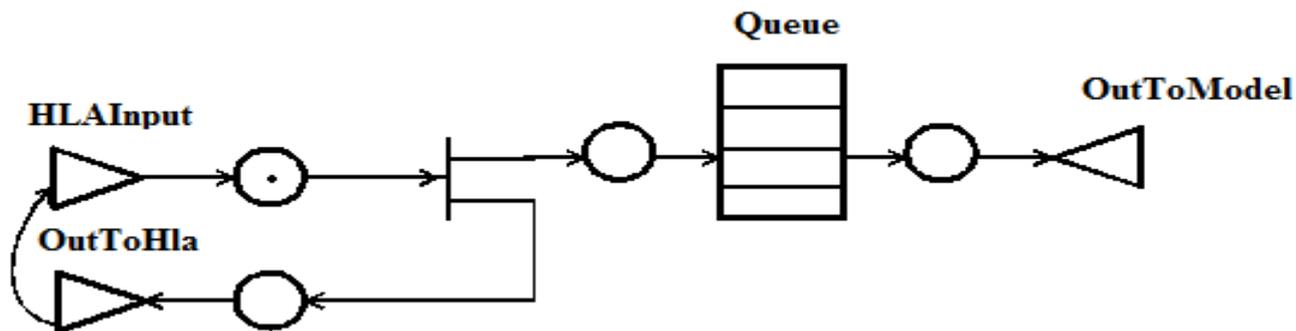
$$V_I \cap V_O = \emptyset,$$

$$V_j = (name, type, value), j = \overline{1, m}$$

# Connection Module (CM)

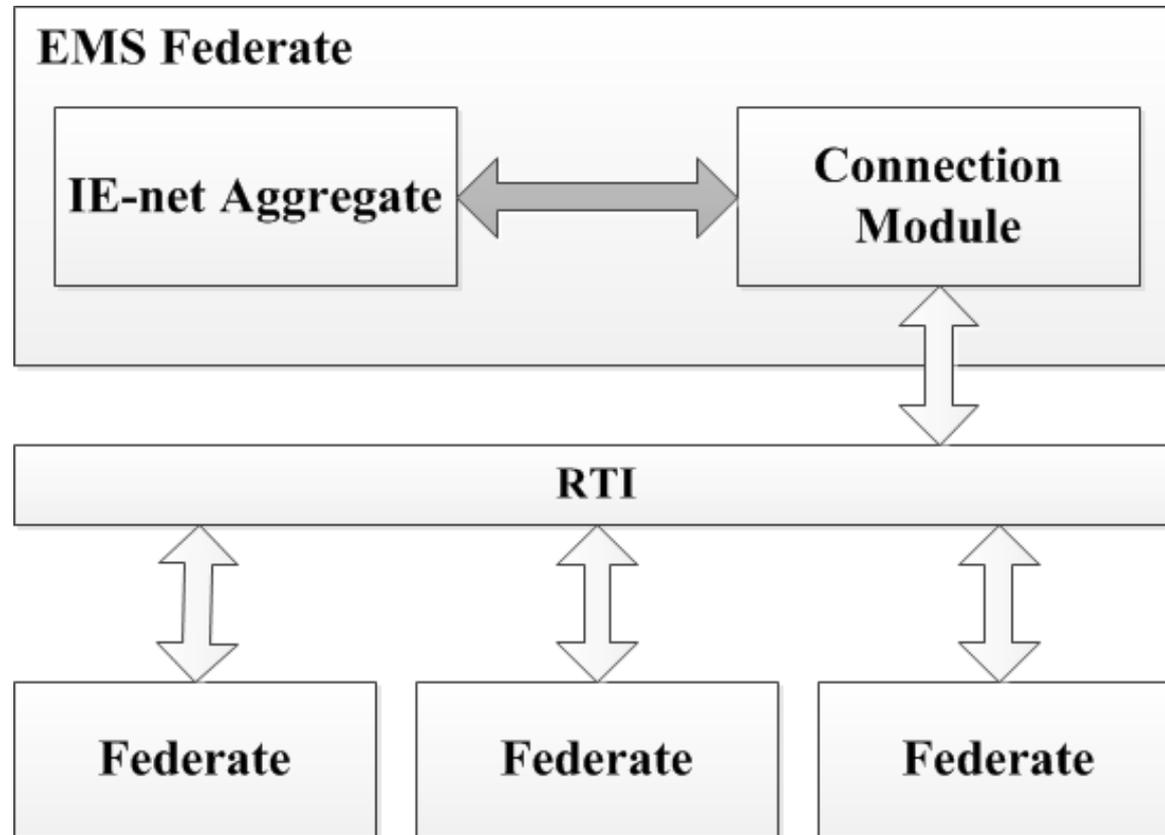


Интерфейс CM модуля

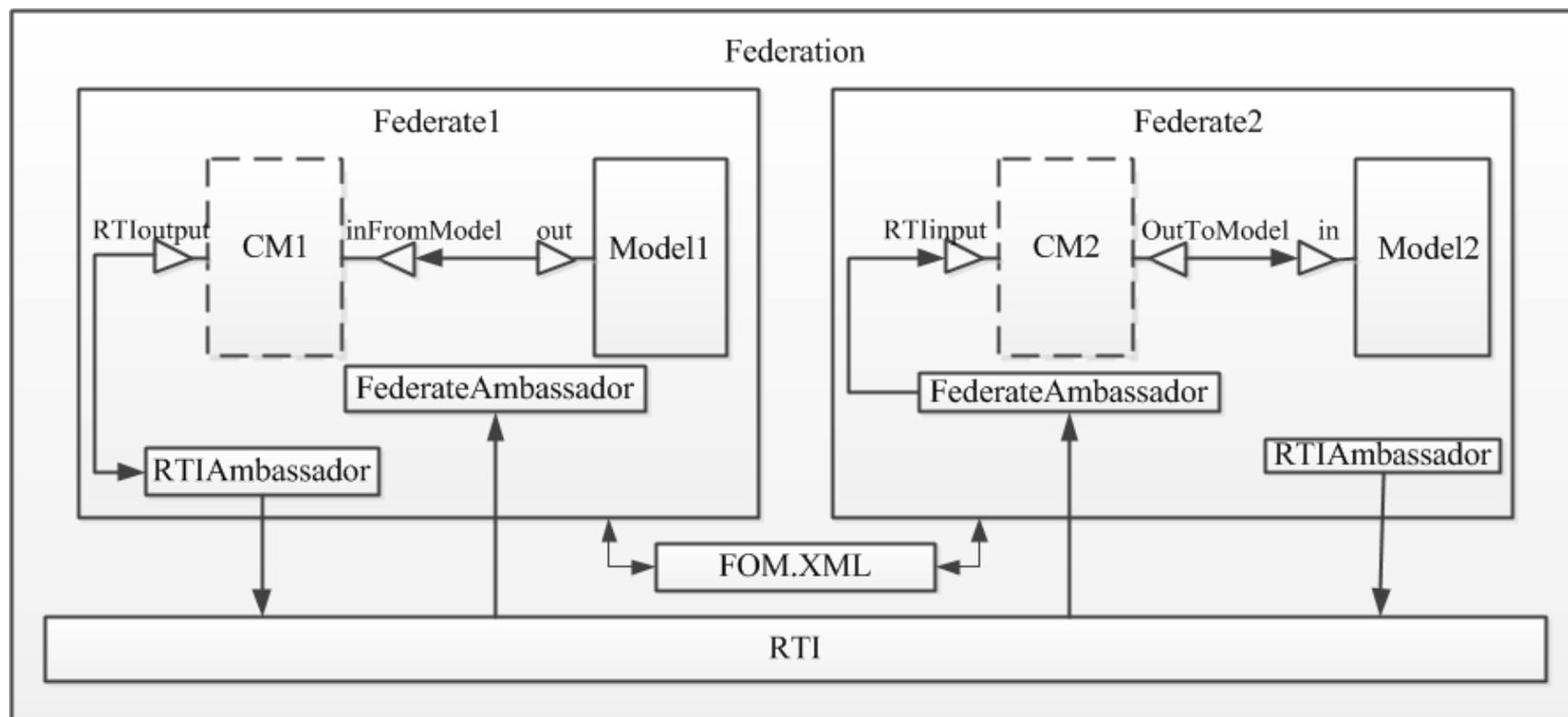


Внутренняя структура CM модуля

# Интеграция формального аппарата Е-сетей в архитектуру HLA

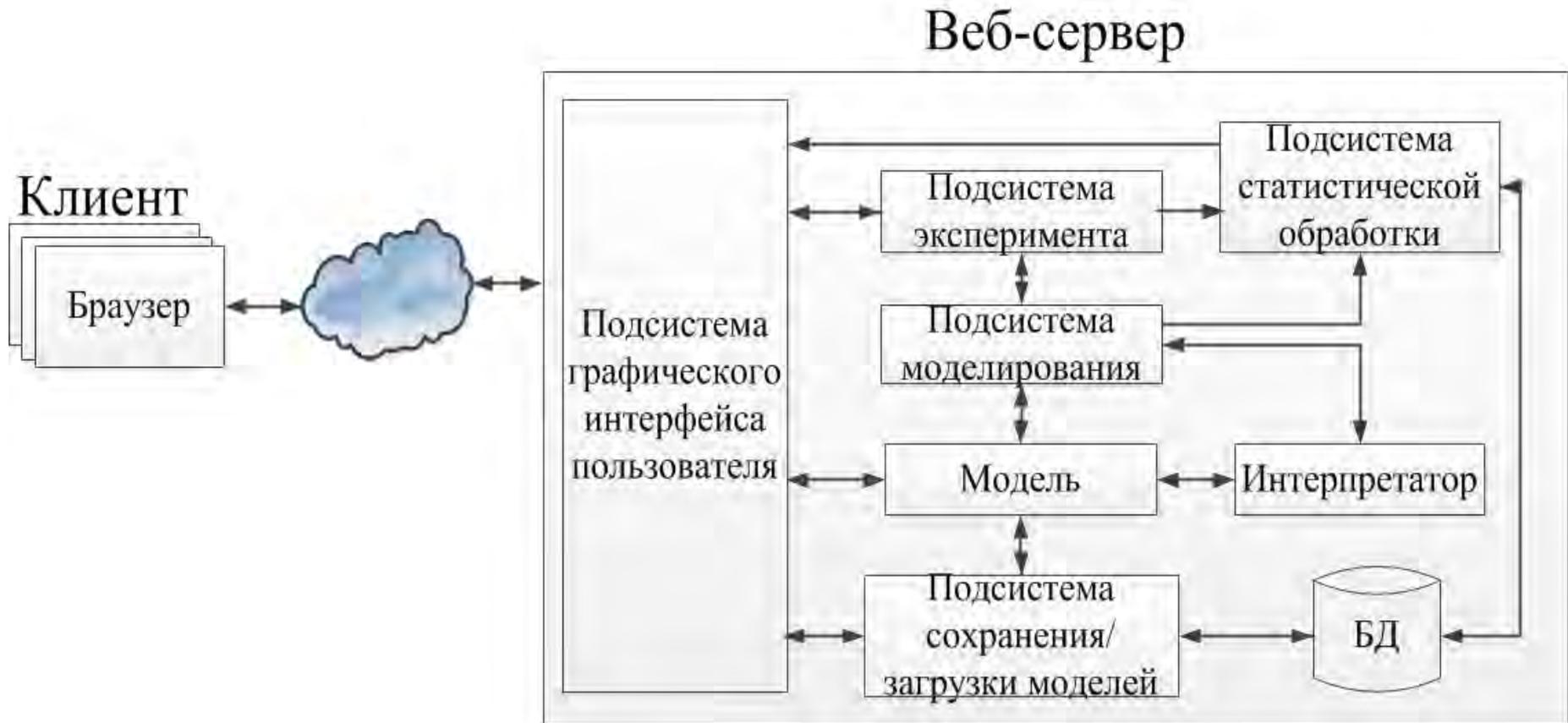


## Расширенная архитектура федерации HLA

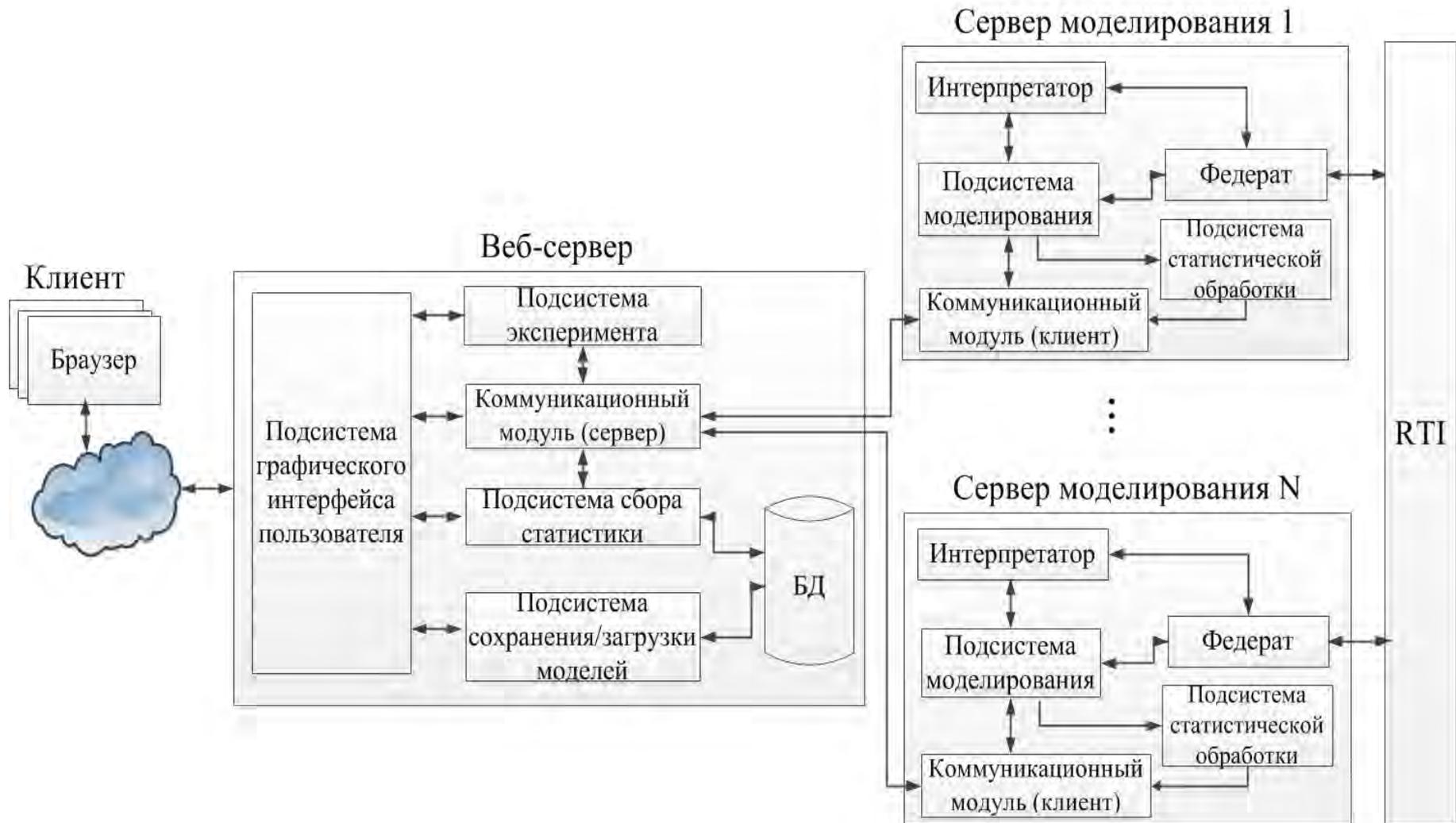


RTI - Portico

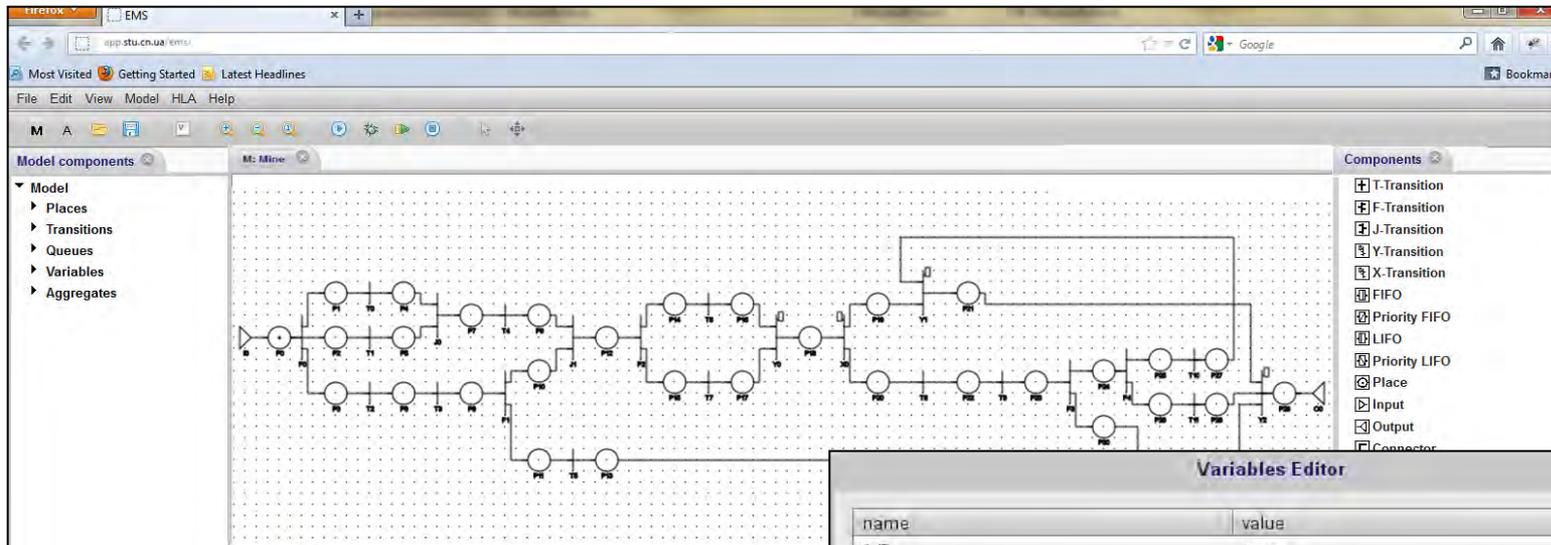
## Архитектура системы моделирования EMS (однопроцессорное моделирование)



# Архитектура системы моделирования EMS (распределенное моделирование)



# Редактор моделей системы EMS



Y0

Name  
Y0

Delay Function  
RETURN 10;

Transformation Function  
P[P16].T[1]=5;

Permitting Function  
RETURN 2;

Discard Apply

Variables Editor

name	value
V2	true
V3	string
V1	10

Create Federate

Federation name \*  
FederationExample

Federate name  
FederateModel1

Model name \*

Discard Next Apply

# Моделирование непрерывных процессов

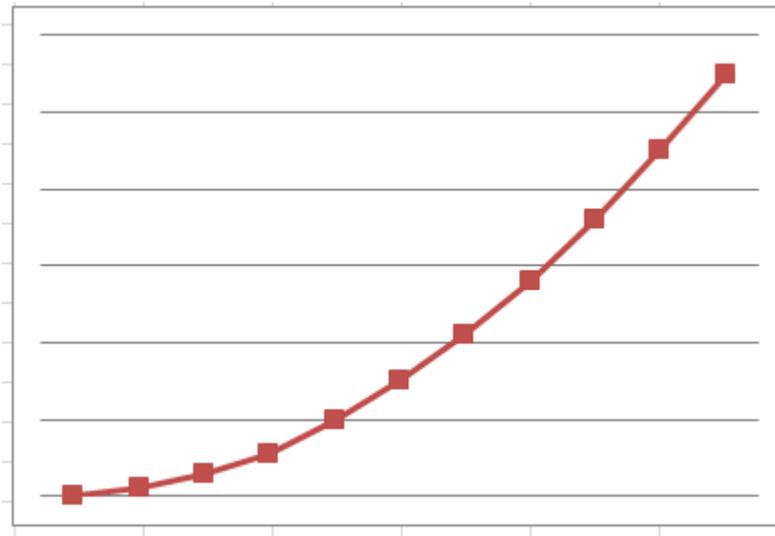
- $i$ -тое значение непрерывного процесса:

$$A^i = F_i(\text{time})$$

- кусочно-линейная аппроксимация:

$$A^i_{\text{time}_{(i+1)}} = A^i_{\text{time}_i} + (\text{time}_{(i+1)} - \text{time}_i) * F_i$$

$$F = ax^2 + bx$$



# Язык IE-net Language (IEL)

1. Обеспечивает автоматическое формирование FOM.xml файла (имя файла, путь для сохранения, список атрибутов, список параметров)

2. Позволяет задавать функции на переходах

*V['X'] = UNIFORM(0,1);*

*IF (V['X']>=0.3) RETURN 0;*

*IF (V['X']<0.3 && V['X']>=0.2) RETURN 1;*

*IF (V['X']<0.2 && V['X']>=0.1) RETURN 2;*

*IF (V['X']<0.1) RETURN 3;*

3. Поддерживает:

- задание законов изменения непрерывных величин - F;
- объявление переменных и работу с переменными IE-сети;

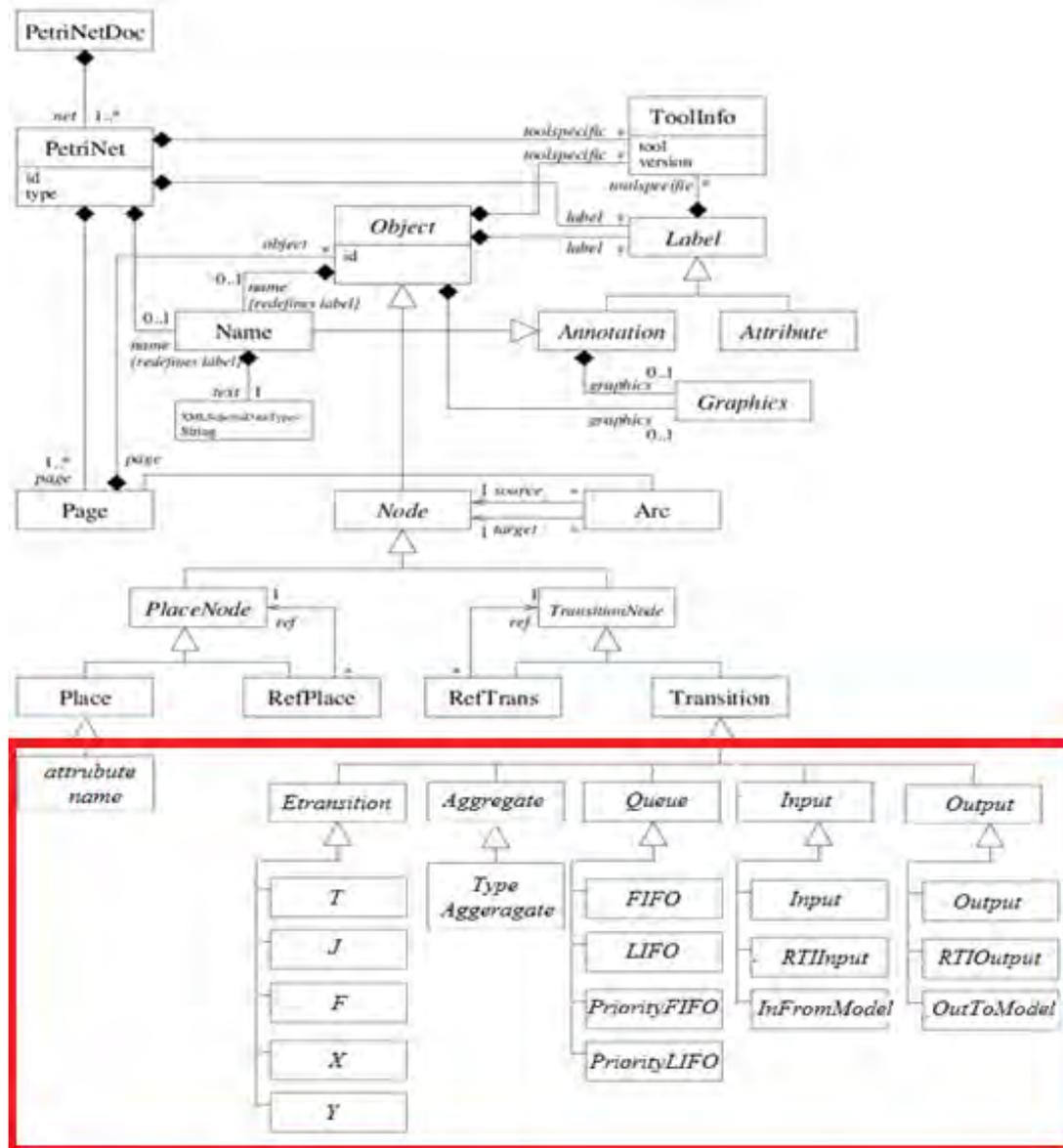
*VAR count = TRUE;      V['count'] = V['count'] +1;      A['A1'].V['Tfin']=TIME;*

- работу с атрибутами метки IE-сети

*P['P1'].T['atr1'] = 10;*

- управляющие конструкции
- основные математические функции
- функции для получения случайных величин
- написание комментариев

# Объектная модель расширенного стандарта PNML



## Расширение стандарта PNML для IE-сетей

1. Добавление нового атрибута “definition” PNML для объекта “Transition”:

`<definition type="TYPE" subType="SUBTYPE">`

type	subType	Описание
Etransition	T, F, J, X, Y	Переход IE-сети
aggregate	Имена типов агрегатов (задает пользователь)	Вложенный агрегат
queue	FIFO, LIFO, PriorityFIFO, PriorityLIFO	Очередь IE-сети
input	Input, RTIInput, InFromModel	Вход агрегата и СМ
output	Output, RTIOutput, OutToModel	Выход агрегата и СМ

2. Добавление атрибута “attribute name” для объекта “Place”
3. Введение понятия типа агрегата

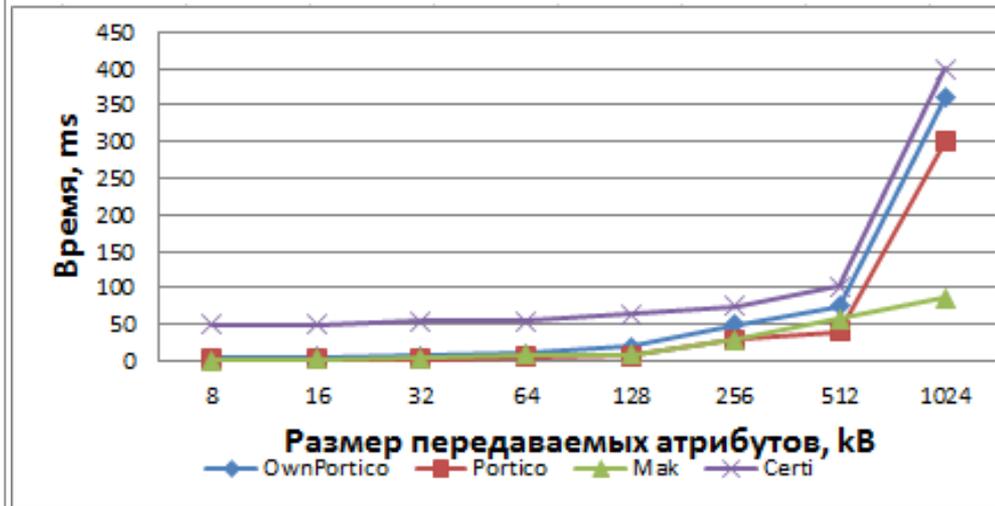
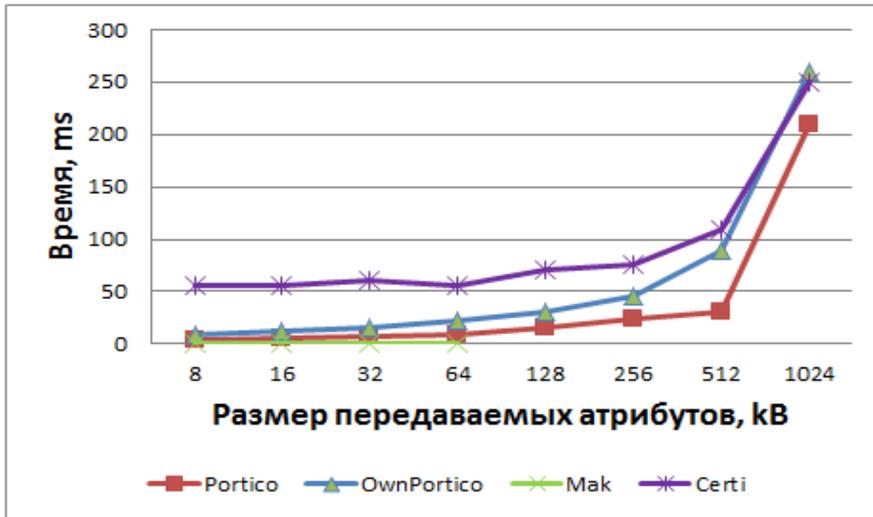
# Сравнение систем имитационного моделирования

	Arena	OpenG PSS	SPEEDES	Triad.Ne t	Parallel Solutions	AnyLogic	EMS
Графический режим построения моделей	+	-	-	+	-	+	+
Доступ к системе в режиме on-line	-	+	-	+	-	-	+
Поддержка HLA архитектуры	-	-	+	-	-	-	+
Моделирование непрерывных процессов	-	-	-	-	-	+	+
Распределенное моделирование	-	+	+	+	+	-	+
Свободно распространяемый продукт	-	+	-	+/-	+	+/-	+

# Производительность EMS

а) в режиме best\_effort

б) в режиме reliable



OwnPortico	Portico	Certi	Mak
9	4	55	0,5
12	6	55	0,5
15	7	60	0,5
22	9	55	0,5
30	15	70	
45	23	75	
90	30	110	
260	210	250	

OwnPortico	Portico	Certi	Mak
5	2	50	0,5
6	3	50	3
7,5	3,3	55	5
10	5,2	55	8,8
20	8	65	9,5
50	30	75	30
75	40	103	58
360	300	400	87

# Методика моделирования внешнего окружения СБ с помощью EMS

Модели внешнего окружения на основе иерархических E-сетей позволяют:

- воссоздать сценарии развития аварий;
- идентифицировать аварийные последовательности с определением их частоты появлений;
- определять важные с точки зрения риска элементы (процессы) в аварийных последовательностях;
- отображать зависимость систем безопасности от конкретных исходных условий;
- прогнозировать наступление аварийной ситуации и принимать решение о ее недопущении в текущий момент времени моделирования.

## Варианты исследований

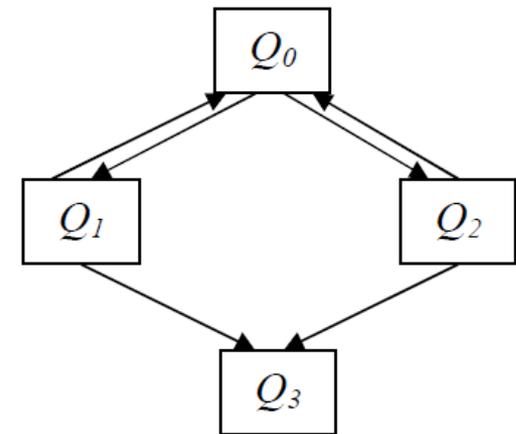
1. Прогнозирование вероятностей состояний объекта с помощью имитационной модели
2. Оценка параметров работы СБ с помощью распределенной имитационной модели

# Прогнозирование аварийной ситуации на угольной шахте

$$\frac{dP_i(t)}{dt} = -\sum_{j=0}^n \lambda_{ij} P_j(t) + \sum_{k=0}^n \lambda_{ki} P_k(t), i = 0, \dots, n,$$

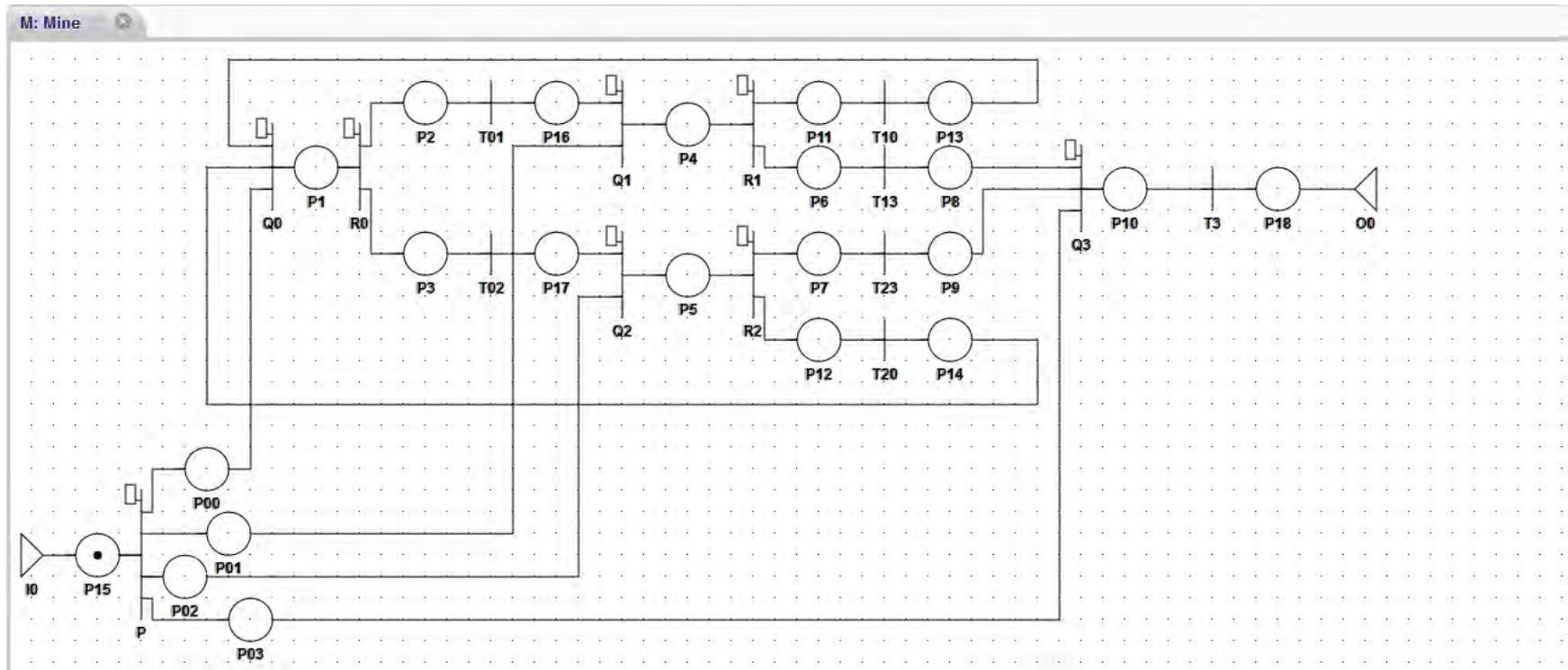
Состояния угольной шахты:

- $Q_0$  – нет метана и нет искры ( $p=0,7$ );
- $Q_1$  – есть метан, нет искры ( $p=0,1$ );
- $Q_2$  – нет метана, есть искра ( $p=0,11$ );
- $Q_3$  – есть метан и искра ( $p=0,09$ ).

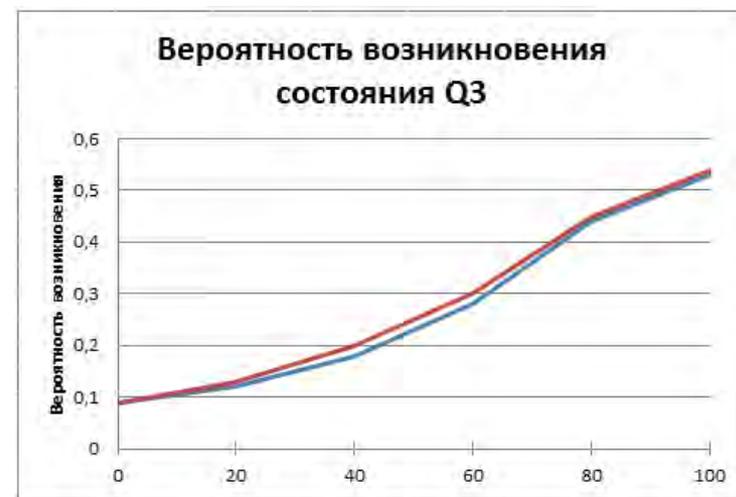
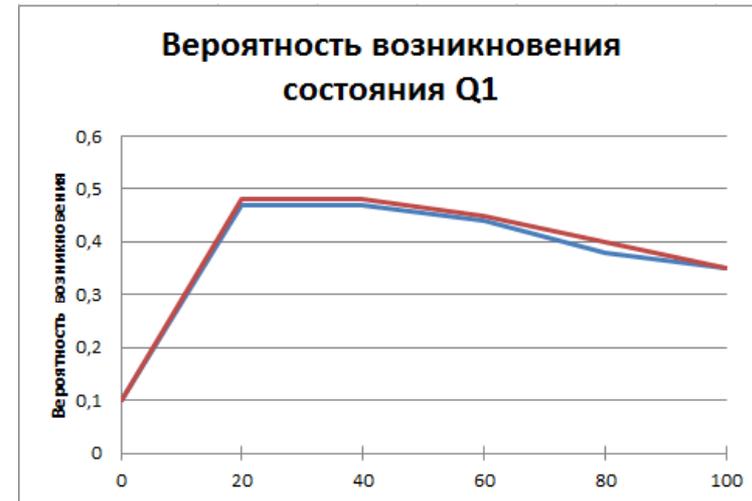
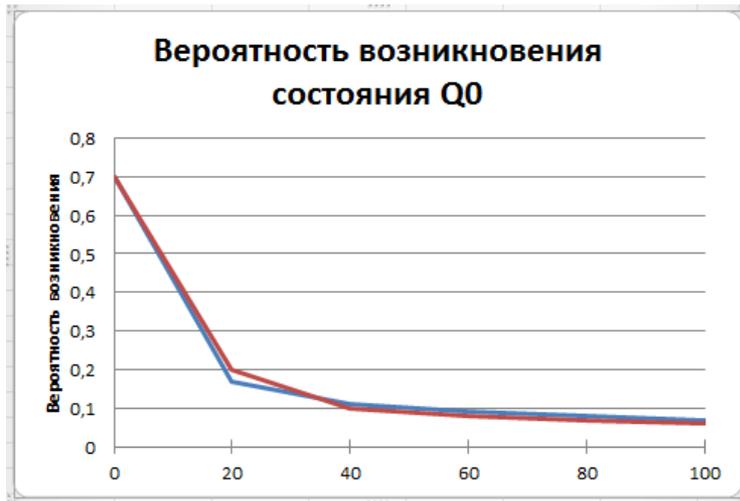


Интенсивность	$\lambda_{ij}$	$\lambda_{01}$	$\lambda_{02}$	$\lambda_{13}$	$\lambda_{23}$	$\lambda_{10}$	$\lambda_{20}$
Значение		6	0.5	1	3	0.5	5

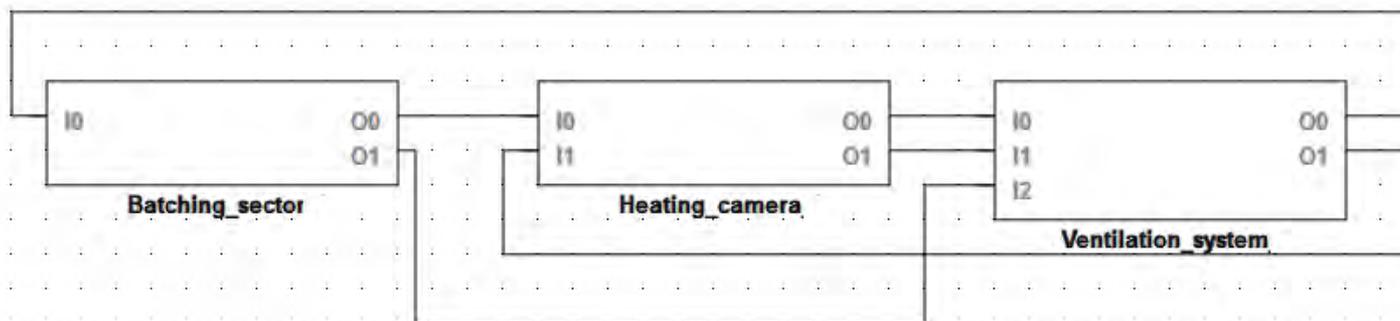
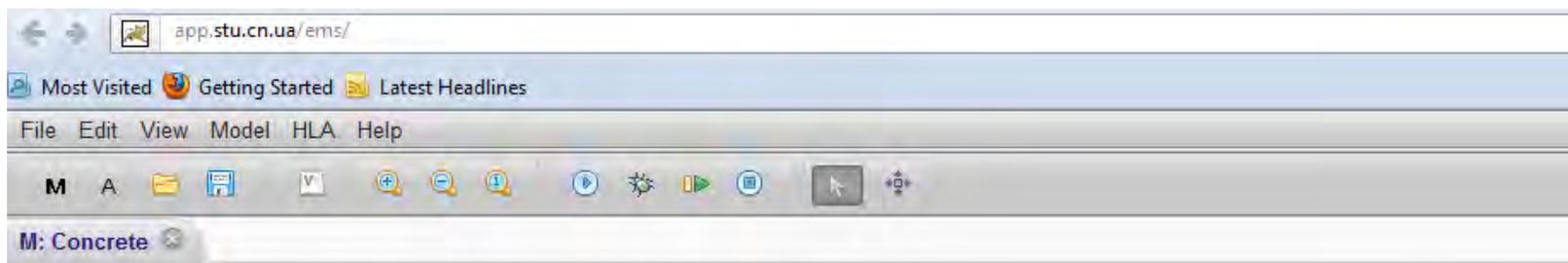
# Имитационная модель прогнозирования аварийного состояния угольной шахты



# Результаты моделирования

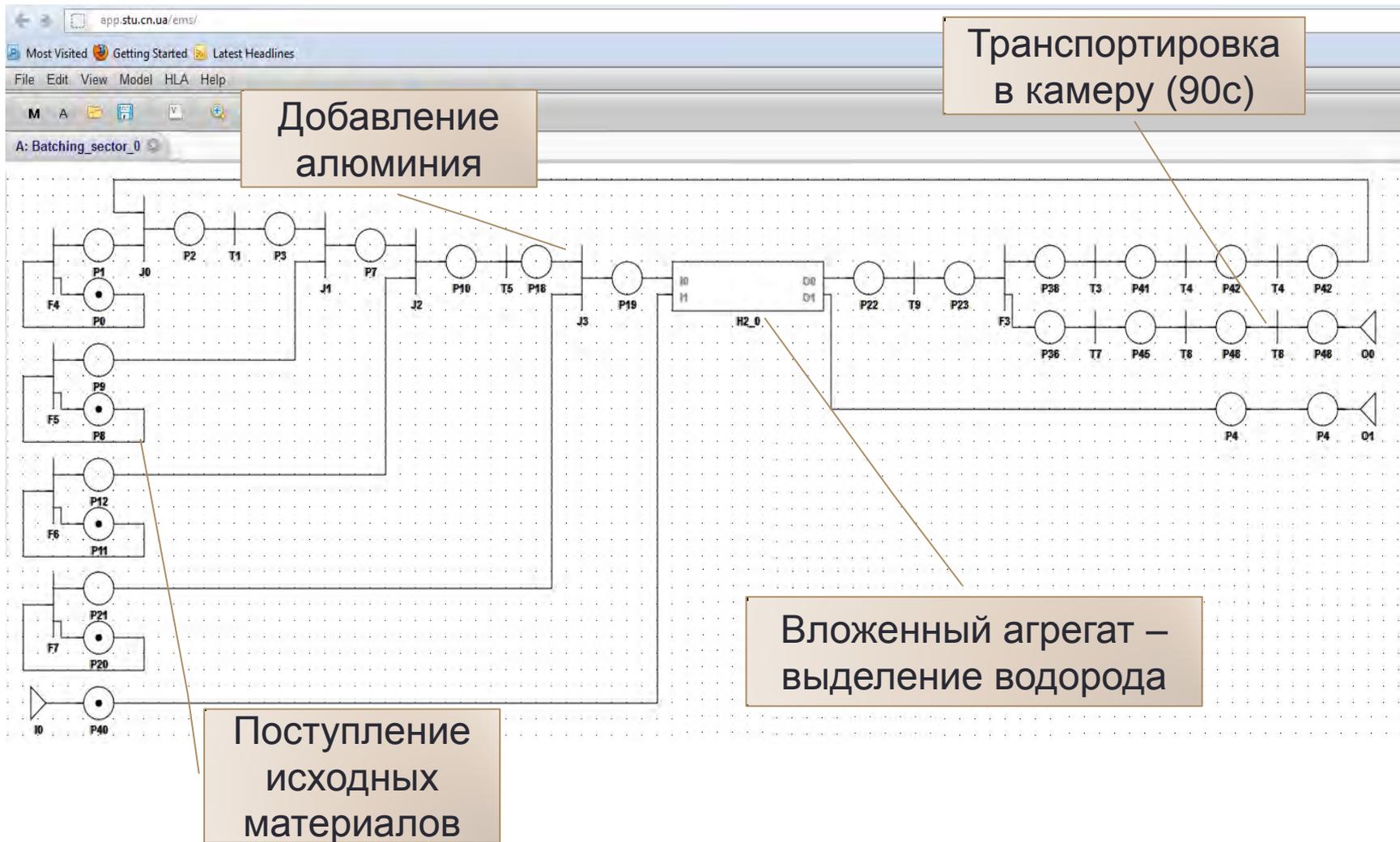


# Имитационная модель производства газобетона

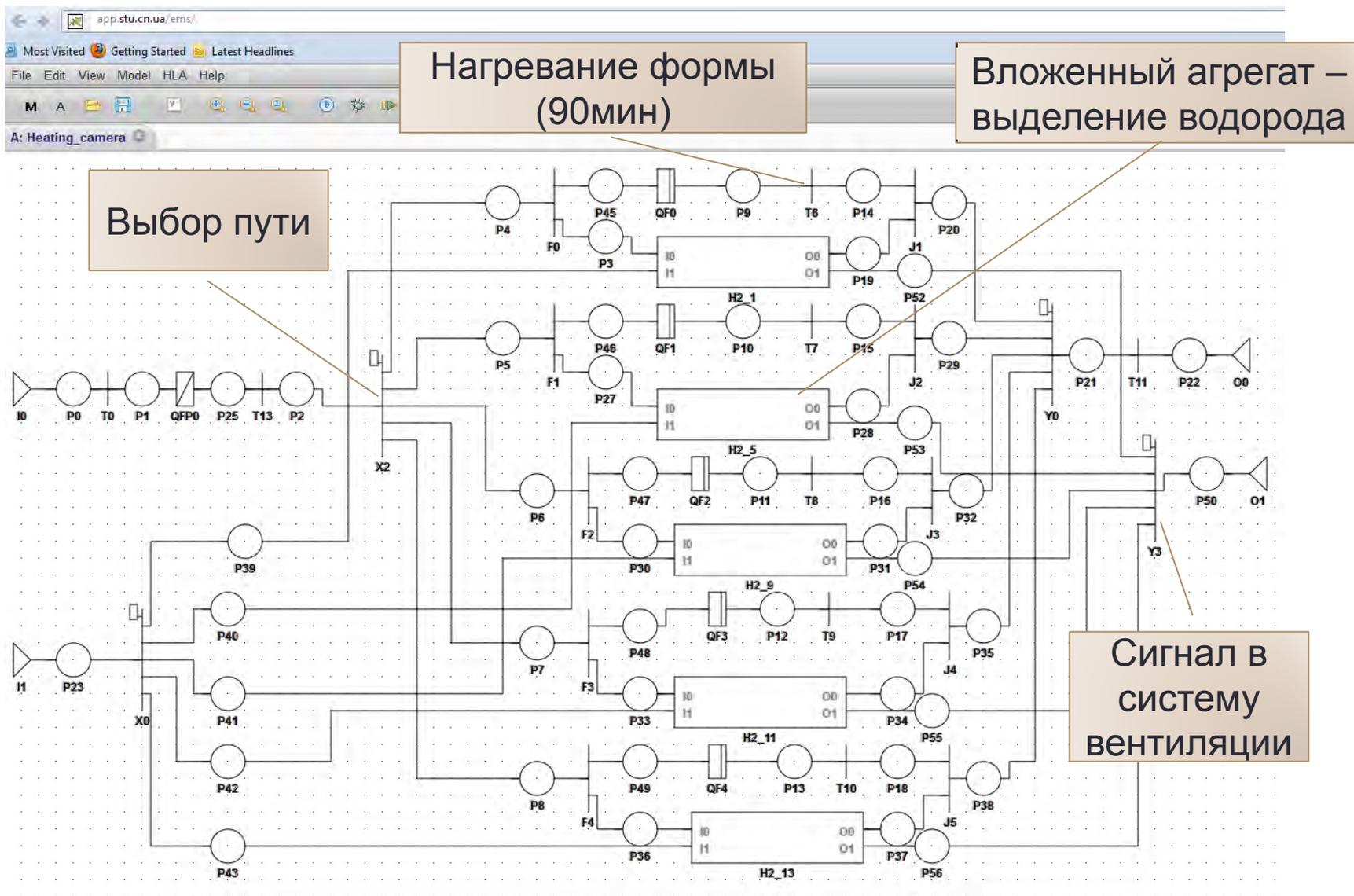


ПДК водорода = 0,8%; 1 форма выделяет 1900л = 0,1%

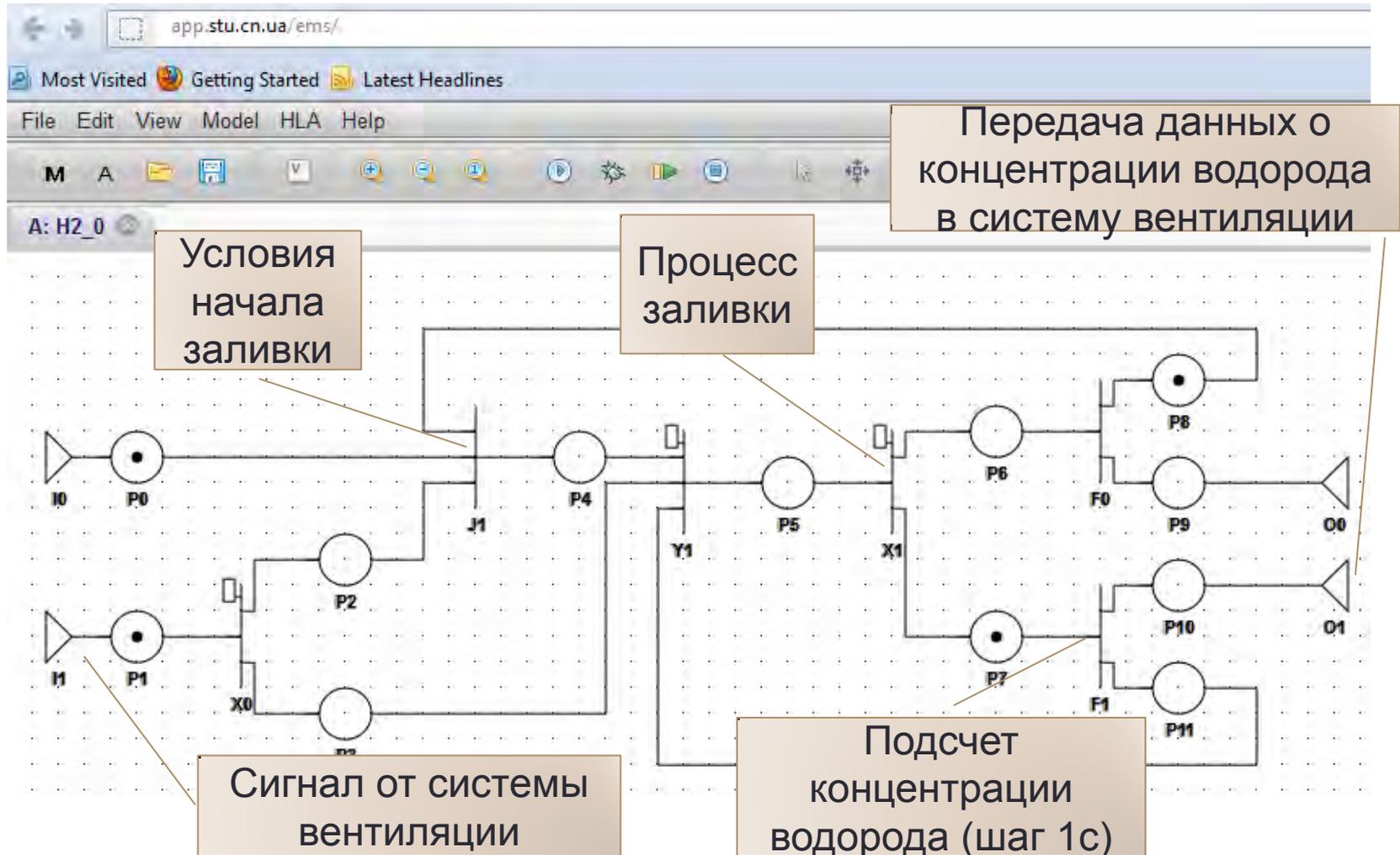
# Агрегат - сектор заливки



# Агрегат - камера нагрева

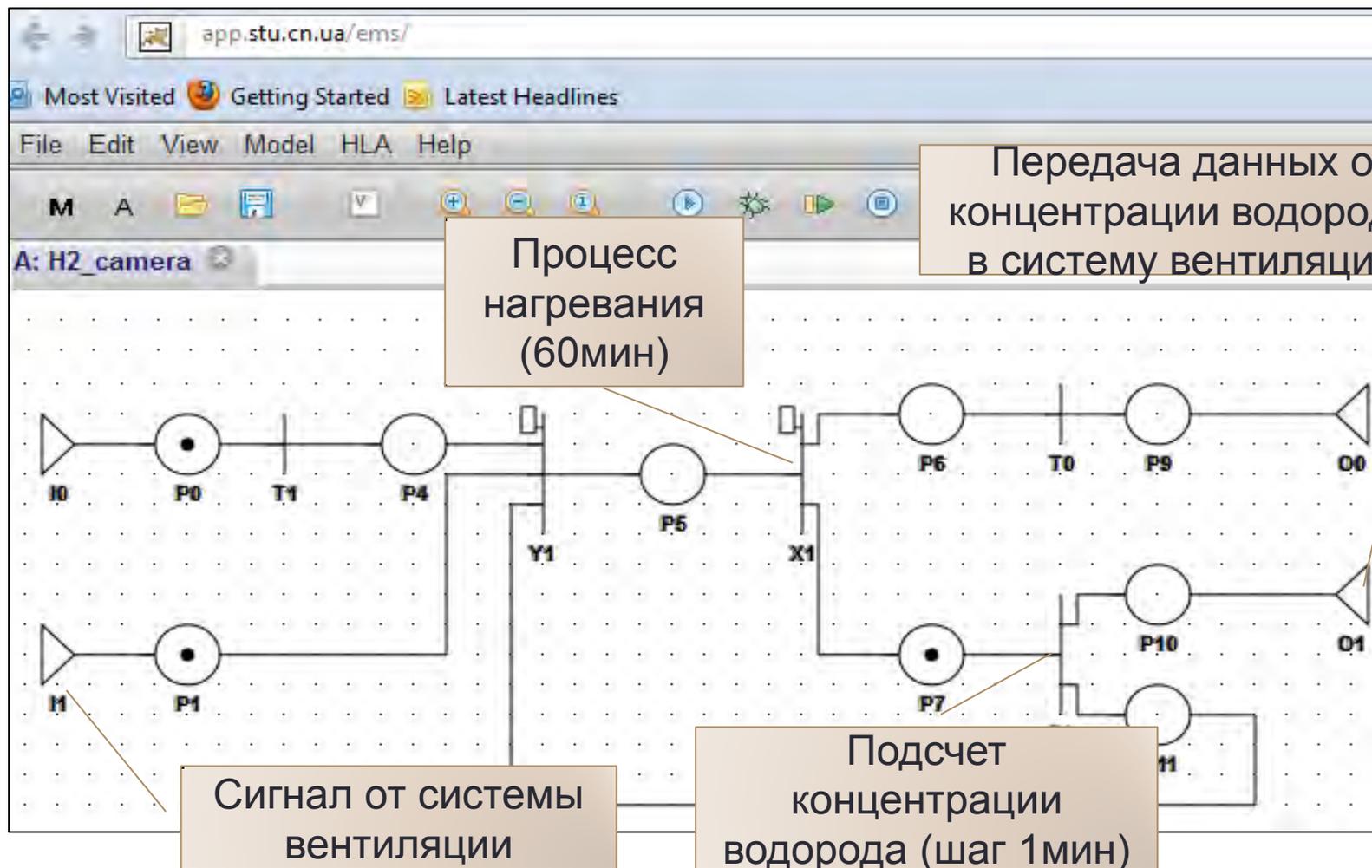


# Агрегат – выделение водорода в секторе заливки



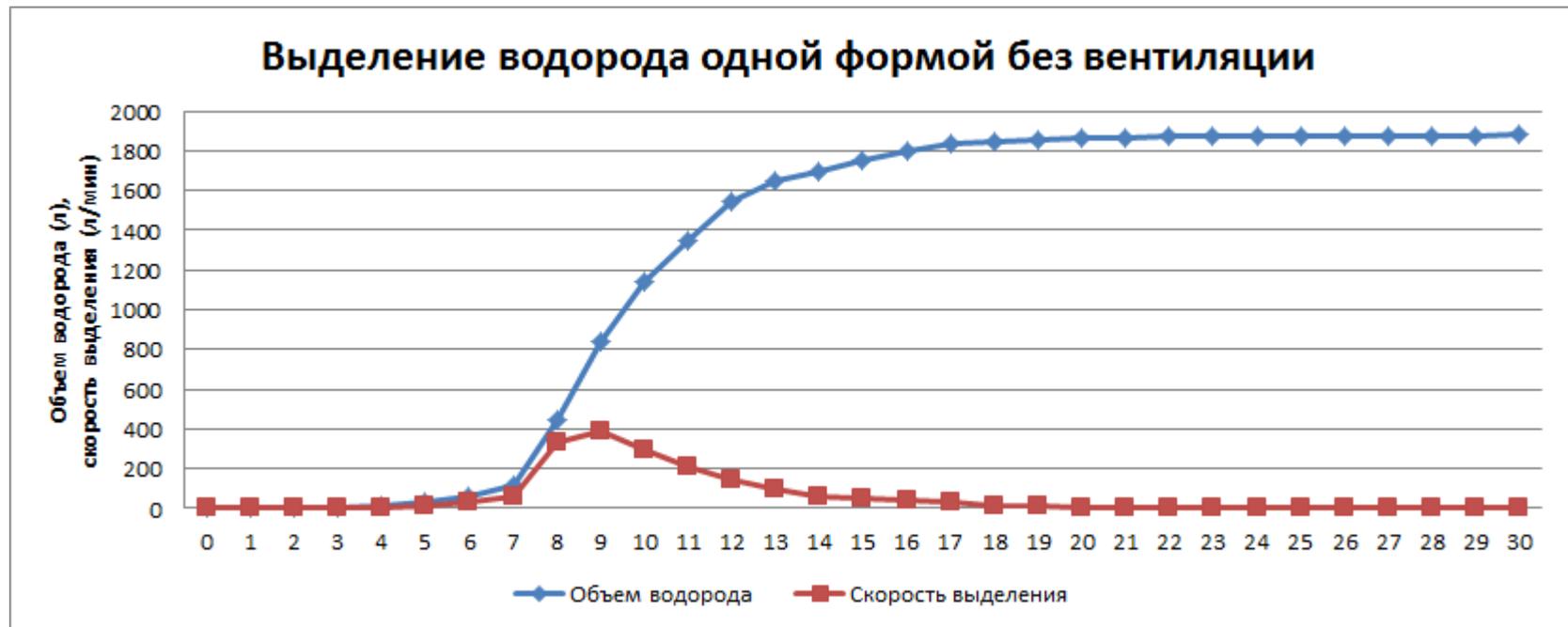
$$C = C_0 e^{k\tau}$$

# Агрегат – выделение водорода в камере нагрева

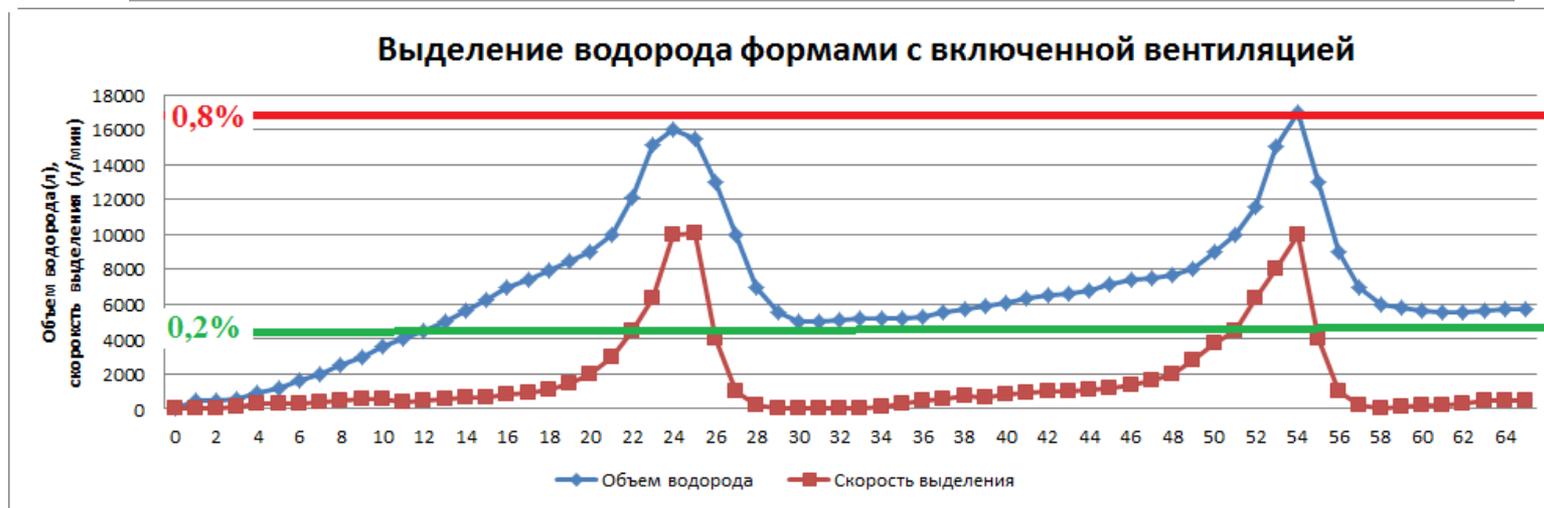
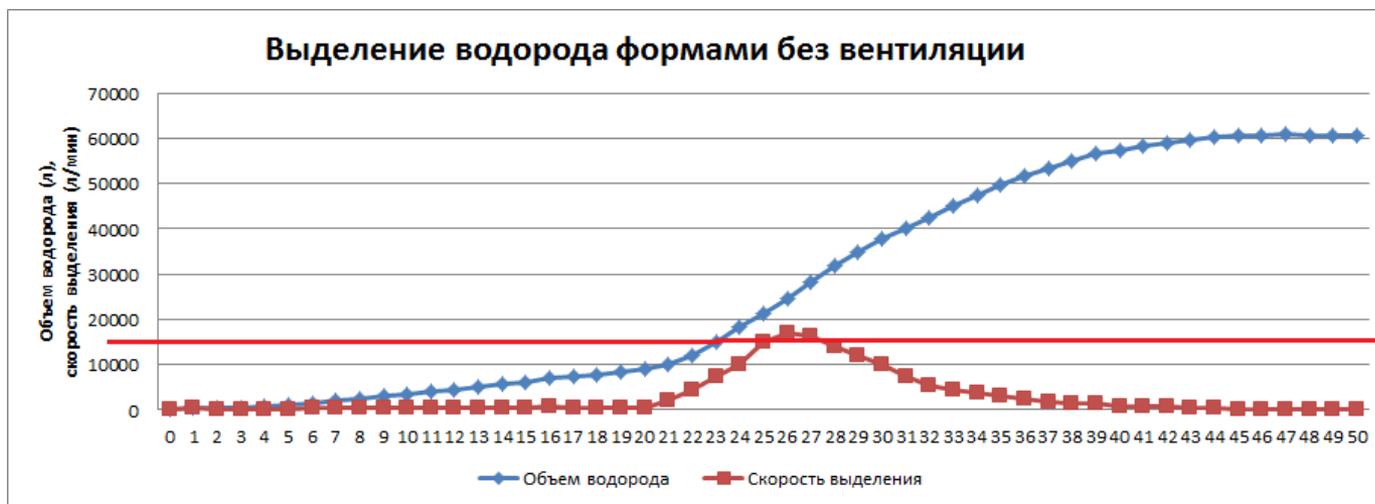


$$C = C_0 e^{kt}$$

# Результаты моделирования



# Результаты моделирования



Результат: вентиляторы необходимо включать через 25мин на 5 мин

## Основные научные и практические результаты

1. Впервые предложено формальное определение иерархических E-сетей, которое позволяет подойти к исследованию сложных систем с позиций системного анализа и моделировать разнородные процессы внешнего окружения систем безопасност
2. Впервые разработано метод интеграции иерархических E-сетей в архитектуру HLA
3. Впервые разработано архитектуру, алгоритмы функционирования веб-системы распределенного имитационного моделирования в архитектуре HLA и язык описания моделей с помощью иерархических E-сетей
4. Впервые предложено методику моделирования внешнего окружения систем безопасности с помощью разработанной системы имитационного моделирования
5. Усовершенствовано формальный аппарат E-сетей для моделирования непрерывных процессов
6. Расширено стандарт PNML для иерархических E-сетей
7. Произведена экспериментальная проверка производительности разработанных программных средств, которая показала их высокую эффективность
8. Разработаны имитационные модели внешнего окружения управляющих систем безопасности угольной шахты и процесса производства газобетона

## Публикации, апробация и внедрение результатов работы

### 1. Результаты работы изложены в 14 научных трудах:

- 5 статей – в профессиональных изданиях Украины
- 8 публикаций в сборниках и материалах научных конференций
- получено 1 авторское свидетельство.

**2. Результаты работы использованы в НИР ИПММС НАНУ «Разработка теоретических основ создания и исследования живучих гарантоспособных систем управления на основе вероятностно-физического подхода», № 0110U001005, 2010-2014pp.**

**3. Система распределенного имитационного моделирования EMS** прошла регистрацию в государственной службе интеллектуальной собственности Украины, свидетельство про регистрацию авторского права на произведение №43777 от 15.05.2012

### 4. Внедрение результатов диссертационной работы:

- ОП «Шахта имени О.Ф. Засядько», г. Донецк
- ООО «Ориентир-Будэлемент», г. Киев
- кафедра информационных и компьютерных систем Черниговского государственного технологического университета  
(<http://app.stu.cn.ua/ems/>)

Благодарю за внимание!