

# ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ВИЗАРТ КАК ИНСТРУМЕНТ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА

А.А. Рыкунова  
В.Ю. Пугачев  
В.Г. Дубосарский  
И.Р. Макеева

# Введение

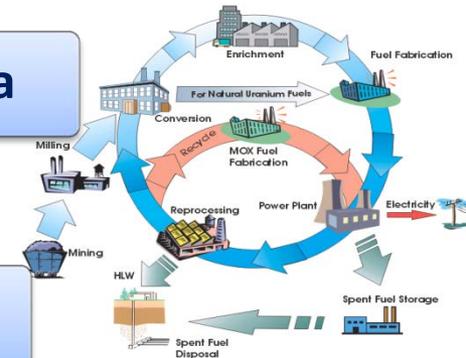


Организация замыкания топливного цикла

Создание и развитие технологий

Переработка отработавшего  
ядерного топлива

Фабрикация топлива из  
рециклированных ядерных  
материалов



Особенности при создании и проектировании технологий:

- Малая изученность многих процессов и технических решений
- Рассмотрение большого числа вариантов решений
- Сравнение и обоснование выбора технико-технологических решений

Применение расчетного моделирования



# Задачи моделирования

**Задачи, которые решаются разработчиками технологических процессов**

**Обоснование реализуемости технологических решений**

**Подготовка исходных данных для разработки проектной и конструкторской документации**

**Оценка и оптимизация решений по компоновке технологических линий**

**Оценка накопления делящихся и ядерных материалов на различных технологических переделах, в промежуточных хранилищах и емкостях**

**Оценка объемов и типов образующихся радиоактивных отходов**

**Выбор и оптимизация режимов технологических процессов**

**Оценка влияния технологических режимов на состав и качество промежуточных и конечных продуктов**

# Состав ПК ВИЗАРТ

ПК ВИЗАРТ разработан на платформе АТЭК с применением современных средств разработки – платформы Microsoft .NET Framework и языка программирования C#.



# Моделирование в ПК ВИЗАРТ

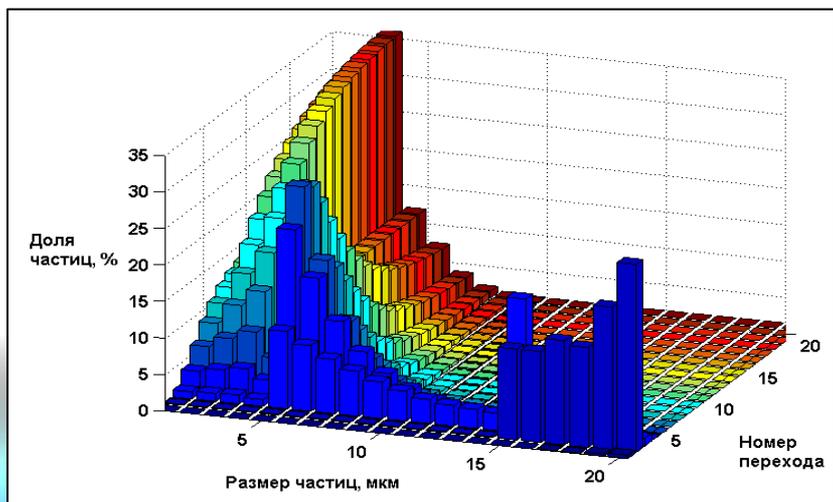
Отдельные  
технологические  
процессы

Химико-  
технологические  
системы

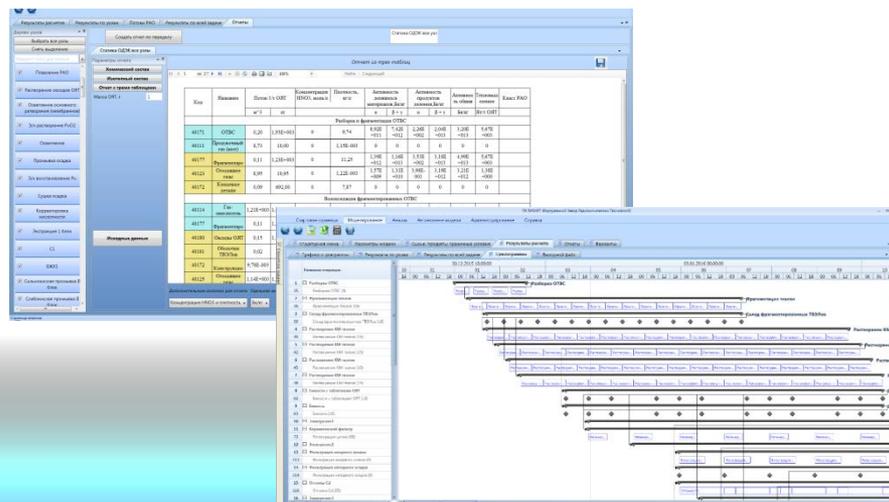
- Характеристики оборудования
- Параметры процесса

- Материальный баланс
- Циклограммы работы оборудования

Результаты расчета по модели «Измельчение порошка в аппарате вихревого слоя»



Результаты расчетов материального баланса в стационарном и динамическом режимах



# Моделирование отдельных технологических процессов

# Моделирование отдельных технологических процессов

## Виды моделей:

- Математическое описание в виде алгебраических, дифференциальных, интегральных или интегродифференциальных уравнений
- Программные модули, реализованные на базе интегрируемого внешнего приложения

## Использование моделей:

- Выбор и оптимизация технологических режимов
- Определение параметров процессов и характеристик оборудования для использования при расчете материального баланса

# Моделирование отдельных процессов в ПК ВИЗАРТ

## Интерфейс ввода исходных данных

ПК ВИЗАРТ (Виртуальный Завод Радиохимической Технологии)

Стартовая страница   Моделирование   Анализ   Автономные модели   Администрирование

Волоксияция  
Voloxidation

Исходные данные   графики

**Физико-химические параметры**

Плотность воздуха (газа)	Pg	0.5	кг/м <sup>3</sup>
Молярная масса воздуха	muGas	30	г/моль
Массовая доля кислорода в газе	deltaO2	0.21	
Молярная масса UO <sub>2</sub>	muUO2	270	г/моль
Плотность топлива	Ptopl	10.4	г/см <sup>3</sup>
Массовая доля UO <sub>2</sub> в ОЯТ	deltaUO2	0.8	
Характерный размер топливной таблетки	aTablet	6.5	мм
Площадь поперечного сечения реторты	Sr	280	см <sup>2</sup>

**Управляемые параметры**

Расход фрагментов твэлов с ОЯТ	Qs	120	шт/ч
Длина фрагмента твэла	lTv	3	см
Скорость движения твердой фазы	Vtopl	0.35	м/ч
Расход газа	UO51	2	м <sup>3</sup> /ч
Скорость реакции	kreak	0.21	см/ч
Плотность топлива (эталонная)	PtoplAt	10.4	г/см <sup>3</sup>
Плотность воздуха (эталонная)	PgAt	0.5	кг/м <sup>3</sup>

**Расчетные данные**

Характерное время волоксияции	TO		ч
Длина реторты	Lret		см
Масса перерабатываемого ОЯТ	Mojat		кг/ч

Расчёт

## Представление результатов расчета

- На пользовательском интерфейсе

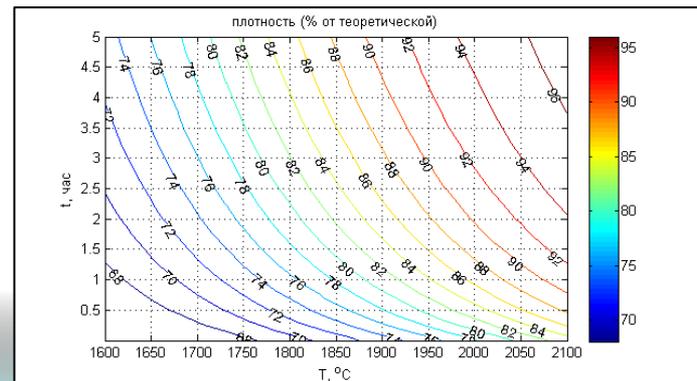
Исходные данные   Результаты расчёта

Максимальная температура на оси бидона	T	38.06	°C
Время, требуемое для спада тепловыделения до 1 Вт/л	tW <sub>1</sub>	4.75	лет
Время, требуемое для спада тепловыделения до 0.1 Вт/л	TW <sub>01</sub>	8.15	лет

- В табличном виде

Параметр	Значение
Высота исчерпывающей зоны, м	9.962
Высота концентрирующей зоны, м	2.856
Высота аппарата, м	12.818
Диаметр, м	0.058
Объем аппарата, м <sup>3</sup>	0.034
Объем насадки, м <sup>3</sup>	0.0068
Объем катализатора, м <sup>3</sup>	0.027

- В графическом виде



Карта режимов спекания топливных таблеток

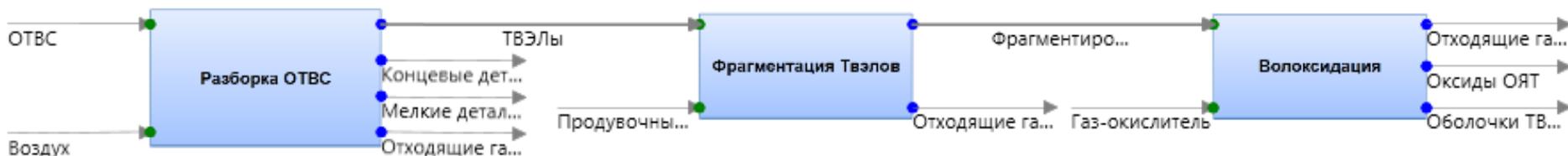
# Моделирование химико-технологических систем

# Моделирование химико-технологических систем в ПК ВИЗАРТ

Химико-технологические системы рассматриваются как совокупность отдельных стадий, на каждой из которых производится определенное воздействие на материальные потоки.

Последовательность стадий описывается с помощью технологической схемы, каждый элемент которой соответствует определенному технологическому процессу (или группе совместно протекающих процессов).

Соединения между элементами технологической схемы соответствуют материальным потокам, протекающим в системе.



Пример схемы из трех операций, реализованной в ПК ВИЗАРТ

# Функциональные возможности ПК ВИЗАРТ для расчета технологических систем

## Программные компоненты системного уровня

- Редактор моделей технологических операций
- Конструктор технологических схем
- Управляющая счетом для стационарного и динамического режимов расчета

## Компоненты прикладного уровня

- Модели технологических операций
- Расчетные модели технологических систем

## Проведение расчетов характеристик технологических схем

- В стационарном режиме
- В динамическом режиме

# Модели технологических операций

## Редактор моделей технологических операций

- Позволяет создавать и редактировать информационную часть модели
  - Позволяет генерировать шаблон (класс C#) для алгоритмической части модели

## Модели технологических операций

- Описывают соответствующий процесс и преобразование входящего потока в выходящий
- Созданы паспорта моделей для всех операций

Скриншот редактора моделей технологических операций. В центре экрана открыт документ Microsoft Word с описанием операции «Волокисление фрагментированной ОТВС». В документе содержится схематическое изображение операции и таблица параметров.

**Рисунок 1 — Схематическое изображение операции «Волокисление фрагментированной ОТВС»**

В таблице 1 представлены входные параметры операции «Волокисление фрагментированной ОТВС», используемые в расчетах.

Наименование	Обозначение	Значение
Захват ОЯТ оболочками, доля от единицы	KI	0,001
Концентрация пыли окислительного ОЯТ в отходящих газах, %	Kact	0,06
Выход воды, %	W <sub>в</sub>	80
Выход цезия в Cs <sub>2</sub> O (тв), %	WCs1	90
Выход цезия в Cs <sub>2</sub> O (г), %	WCs2	0,5
Выход цезия в Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (тв), %	WCs3	9,5
Выход рубидия в Rb <sub>2</sub> O (г), %	WRb1	0,3
Выход рубидия в Rb <sub>2</sub> O (тв), %	WRb2	9,5
Выход рубидия в Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (тв), %	WRb3	90
Выход РБ, %	WRBG	100
Выход рутения в RuO <sub>4</sub> (г), %	WRu1	5
Выход рутения в RuO <sub>4</sub> (тв), %	WRu2	45

В правой части экрана виден интерфейс моделирования с кнопками «Создать новый», «Сохранить изменения» и «Сохранить шаблон класса». Кнопка «Паспорт узла» выделена красным прямоугольником, и на нее указывает красная стрелка из выделенной области.

**Паспорт узла** – содержит информацию о моделируемом процессе и математическую модель этого процесса

# Моделирование технологических систем

**Конструктор технологических схем** – гибкий инструмент для подготовки моделей технологических линий

**Модели технологических систем** – имитируют работу различных технологических участков производств

**Библиотека операций**

- Водоподготовка
- Волокисидация фрагментированной ОТВС (принимает пыль ОЯТ с фильтров)
- Волокисидация фрагментированных ОТВС
- Волокисидация фрагментированных твзлов
- Восстановительная рекстракция
- Восстановительно-комплексующая рекстракция
- Восстановление оксалата урана
- Выгрузка сорбента
- Выпаривание

**Параметры операции**

Параметры

- Собрать статистику по продуктам
- Продолжительность операции: 0 д 8 ч 0 м 0 с
- Продолжительность работы до начала ППР: 0 д 0 ч 0 м 0 с
- Концентрация пыли ОЯТ в отходящих газах при рубке ТВС, %: 0.001
- Время на замену оборудования: 0 д 0 ч 0 м 0 с
- Режим тиражируемых узлов
- Продолжительность планово-профилактических работ: 0 д 0 ч 0 м 0 с
- Срок эксплуатации оборудования: 0 д 0 ч 0 м 0 с
- Следить за простоями
- Выход БФ, %: 10
- Выход йода, %: 10
- Выход трития, %: 10

Прочее

- Входные порты: Редактировать...
- Хранилище входных продуктов операции "Разборка и фрагментация ОТВС": Просмотреть...
- Название: Разборка и фрагмента...

**Рабочее пространство для построения технологических схем**

Сохранить схему

Сохранение

Имя варианта: Вариант № 1

Описание: Балансовый расчет в стационарном режиме. Состав исходного топлива 12% после 1.5 года выдержки.

Сохранить вариант

# Управляющая счетом для стационарного и динамического режимов расчета

Универсальные алгоритмы, не зависящие от топологии технологических схем



Дискретно-событийная модель с комбинированным механизмом управления модельным временем

- Автоматическое определение модельного времени запуска технологической операции в зависимости от состояния во времени и характеристик материальных потоков
- Синхронизация работы компонент рассчитываемой модели
- Моделирование квазипараллельной реализации событий в модели

# Расчет ХТС в стационарном режиме

## Результаты в интерфейсе

**Входные потоки**

Название	Масса, тонны	Плотность кг/л	Тип дисперсной системы	Фаза	Тип компонента
Электролит	1,09	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Катодный кадмий	4,6	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Анодный кадмий	0,02	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Таблетка ОРТ	0,508	20784,313	Неопределен	Твердое вещество	Тип продукта
LN	0,405	0		Твердое вещество	Хим. соединение
PuN	0,076	0		Твердое вещество	Хим. соединение
AmN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение
CmN	8,25E-005	0		Твердое вещество	Хим. соединение
NpN	6,367E-005	0		Твердое вещество	Хим. соединение
LaN	0,001	6730		Твердое вещество	Хим. соединение
CaN	0,002	0		Твердое вещество	Хим. соединение
NiN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение
MnN	0,003	0		Твердое вещество	Хим. соединение
PmN	1,258E-004	0		Твердое вещество	Хим. соединение
SrN	0,001	0		Твердое вещество	Хим. соединение

**Выходные потоки**

Название	Масса, тонны	Плотность кг/л	Тип дисперсной системы	Фаза	Тип компонента
Катод	5,053	бесконечность	Суспензия	Жидкое вещество	Тип продукта
Катодный кадмий	4,6	0	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Катодный осадок	0,453	0	Неопределен	Твердое вещество	Тип продукта
Анод	0,03	бесконечность	Суспензия	Жидкое вещество	Тип продукта
Электролит1	1,102	бесконечность	Неопределен	Жидкое вещество	Тип продукта
Газ, смесь газов	0,031	1,367	Неопределен	Газообразное вещество	Тип продукта
H2	0,028	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
H+	1,432E-004	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
He	1,192E-005	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
Ne	0,003	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
H2	4,212E-008	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
Li	2,098E-004	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
Fe	3,925E-004	0		Газообразное вещество	Хим. соединение
Se	2,249E-005	0		Газообразное вещество	Хим. соединение

## Результаты в виде таблиц

Код	Название	Поток 1-й ОРТ		Концентрация HNO3, моль/л	Плотность, кг/л	Активность дефицита материалов, Бг/кг		Активность продуктов деления, Бг/кг		Активность гамма-обез		Тепловая единица	Класс РАО
		м³/с	кг			α	β+γ	Бг/кг	Бг/кг ОРТ	Бг/кг	Бг/кг		
Разборка и фрагментация ОТВС													
40171	ОТВС	0,20	1,93E+003	0	9,74	0,92E+011	7,42E+012	2,24E+002	2,04E+013	3,20E+013	5,67E+003		
40111	Продуктовый газ (азот)	8,73	10,00	0	1,15E-003	0	0	0	0	0	0	0	0
40177	Фрагментатор	0,11	1,23E+003	0	11,25	1,39E+012	1,16E+013	3,53E+002	3,18E+013	4,99E+013	5,67E+003		
40123	Отходящие газы	8,95	10,95	0	1,22E-003	1,57E+009	1,31E+010	3,98E+001	3,19E+012	3,21E+012	1,38E+000		
40172	Композитная легавя	0,09	692,00	0	7,87	0	0	0	0	0	0	0	0
Загрузка колонн													
41170	Сорбент	0	686,37	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
41112.1	Дистиллят	0,14	137,27	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
41170a	Сорбент с H2O	0,71	709,03	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
41147	Фильтрат	0,11	114,62	0	1,00	0	0	0	0	0	0	0	0
Волокнистая фрагментированная ОТВС													
40114	Газо-осветитель	1,21E+003	1,44E+003	0	1,19E-003	0	0	0	0	0	0	0	0

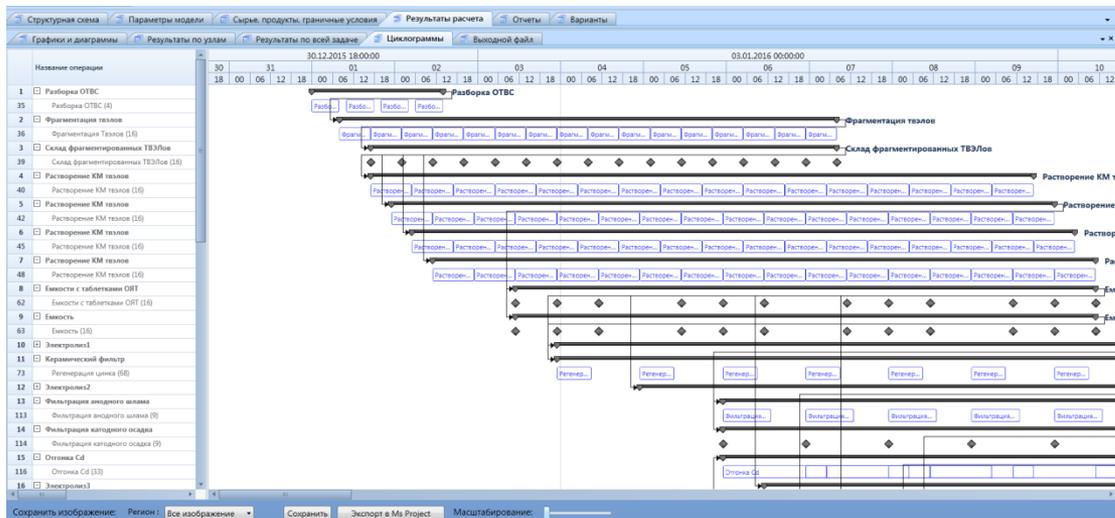
В результате - составы всех потоков технологической системы:

- Химический, элементный и изотопный состав
- Абсолютные и удельные активности ( $\alpha$  и  $\beta+\gamma$ )
- Тепловыделение
- Требуемые объемы реагентов
- Состав и количество радиоактивных отходов всех типов и категорий

Результаты выдаются на формы пользовательского интерфейса и сохраняются в офисные программы Word и Excel

# Расчет ХТС в динамическом режиме

## В графическом виде



## В табличном виде

Описание операции	Дата начала	Дата окончания	Время
Разборка и фрагментация ОТВС (2)	01.01.2016 0:00:00	02.01.2016 16:00:00	1.16:00:00
Волокисация фрагментированных ОТВС (2)	01.01.2016 20:00:00	15.01.2016 4:00:00	13.08:00:00
Отмывка и грохочение оболочек (18)	08.01.2016 12:00:00	16.01.2016 16:00:00	8.04:00:00
Стандартное хранилище оксидов ОЯТ (2)	08.01.2016 12:00:00	15.01.2016 4:00:00	6.16:00:00
Растворение оксидов ОЯТ и брака МФР 1 (19)	08.01.2016 12:00:00	17.01.2016 19:00:00	9.07:00:00
Растворение оксидов ОЯТ и брака МФР 2 (19)	08.01.2016 15:00:00	18.01.2016 2:00:00	9.11:00:00
Стандартное хранилище неосветленного раствора (44)	08.01.2016 16:00:00	18.01.2016 2:00:00	9.10:00:00
Осветление основного раствора (мембранное) (10)	09.01.2016 5:00:00	18.01.2016 1:00:00	8.20:00:00
Э/х растворение нерастворимого осадка (5)	10.01.2016 1:00:00	19.01.2016 4:00:00	9.03:00:00
осветление (16)	11.01.2016 1:00:00	21.01.2016 9:00:00	10.08:00:00
Стандартное хранилище осветленного раствора (23)	09.01.2016 11:00:00	21.01.2016 9:00:00	11.22:00:00
Э/х восстановление (300)	09.01.2016 11:00:00	22.01.2016 12:00:00	13.01:00:00
Стандартное хранилище Раствор ОЯТ (300)	09.01.2016 12:00:00	22.01.2016 12:00:00	13.00:00:00
корректировка кислотности (2)	13.01.2016 14:00:00	18.01.2016 11:00:00	4.21:00:00
Экстракция головной блок (198)	13.01.2016 15:00:00	22.01.2016 8:00:00	8.17:00:00

- Продолжительность процесса и наиболее загруженные участки и линии
- Необходимое количество оборудования и количество накопительных емкостей для промежуточных продуктов
- Накопление ядерных материалов и продуктов деления в емкостях и аппаратах на технологических линиях
- Моделирование эксплуатационных характеристик производства: учёт занятости персонала, учёт планово-профилактических работ, срок эксплуатации оборудования, времени на замену оборудования, отказов оборудования

# Дополнительные возможности расчетов технологий ЗЯТЦ

# Оптимизационный модуль

Подсистема оптимизации ПК ВИЗАРТ включает в себя:

Модуль поиска экстремума функции комбинированным методом (генетический алгоритм + метод Нелдера-Мида)

Оконные формы пользовательского интерфейса для задания параметров оптимизации

Вычисление значения целевой функции на основе рассчитанных характеристик технологической схемы

Функционал, обеспечивающий многократный вызов в пакетном режиме расчета технологической схемы с автоматическим изменением выбранных параметров

Пользовательская интерфейс для задания оптимизационного расчета технологической схемы

The screenshot shows a software window with four tabs: "Параметры модели", "Структурная схема", "Сырье, продукты, граничные условия", and "Варианты". The "Параметры модели" tab is active. It contains two main sections: "Глобальные параметры динамической задачи моделирования" and "Настройки оптимизации".

**Глобальные параметры динамической задачи моделирования:**

- Начальное модельное время: 01.02.2015
- Конечное модельное время: 01.02.2016
- Использовать относительное время:
- Собирать статистику по продуктам:
- Рассчитывать эволюцию изотопных составов:
- Режим экономии памяти:
- Оптимизационный расчет:
- Временной шаг: 0 д 0 ч 30 м 0 с

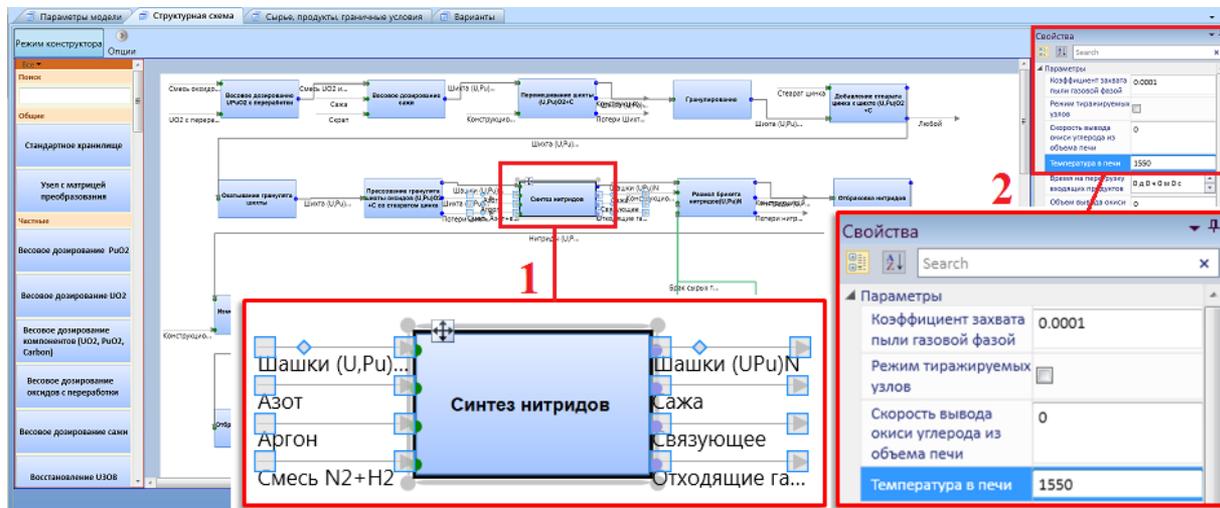
**Настройки оптимизации:**

- Целевая функция: общая длительность процесса
- Метод оптимизации: метод многогранника
- Число обращений к функции: 500
- Точность: 1E-5
- Кнопка: Применить

# Использование термодинамического моделирования

## ПК TeDy

- Расчет химического равновесия в многофазных многокомпонентных системах
- Разработан на платформе АТЭК



## ПК ВИЗАРТ

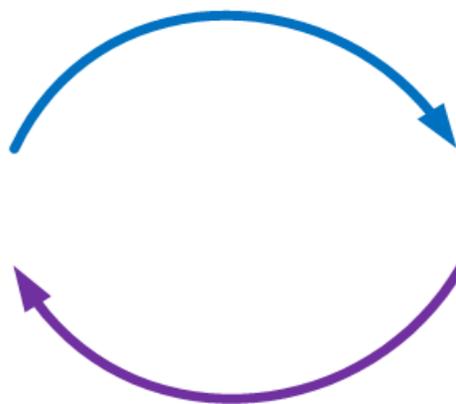
Балансовые расчеты:

- Вызов ПК TeDy
- Список химических реакций
- Формирование выходных потоков

Динамические расчеты

Автономные модели

Характеристики входных потоков  
Характеристики процесса



Полнота протекания реакций

## ПК TeDy

Расчет равновесных составов для заданных начальных условий

Формирование уравнений реакций и расчет изменения ТД функций по реакциям

Работа с базой данных термодинамических свойств индивидуальных веществ

# Выводы

**ПК ВИЗАРТ – инструмент моделирования технологий вне реакторной части ядерного топливного цикла:**

Используется для моделирования технологий внешнего ядерного топливного цикла – процессов фабрикации, переработки ОЯТ, обращения с РАО

Используется для подготовки исходной информации для проектируемых производств ЗЯТЦ

Консолидирует в себе все математические модели технологических процессов внешней части топливного цикла, разработанные в различных организациях

Применяется для расчета структуры затрат производства с целью оптимизации экономических характеристик производств

***Спасибо за внимание!***