



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**



## **Роль термодинамического моделирования авиационных газотурбинных двигателей в решении задач повышения их эффективности**

Лещенко И.А.

ПАО «ОДК-Сатурн», г. Рыбинск Ярославской области

[igor.leshchenko@yandex.ru](mailto:igor.leshchenko@yandex.ru)



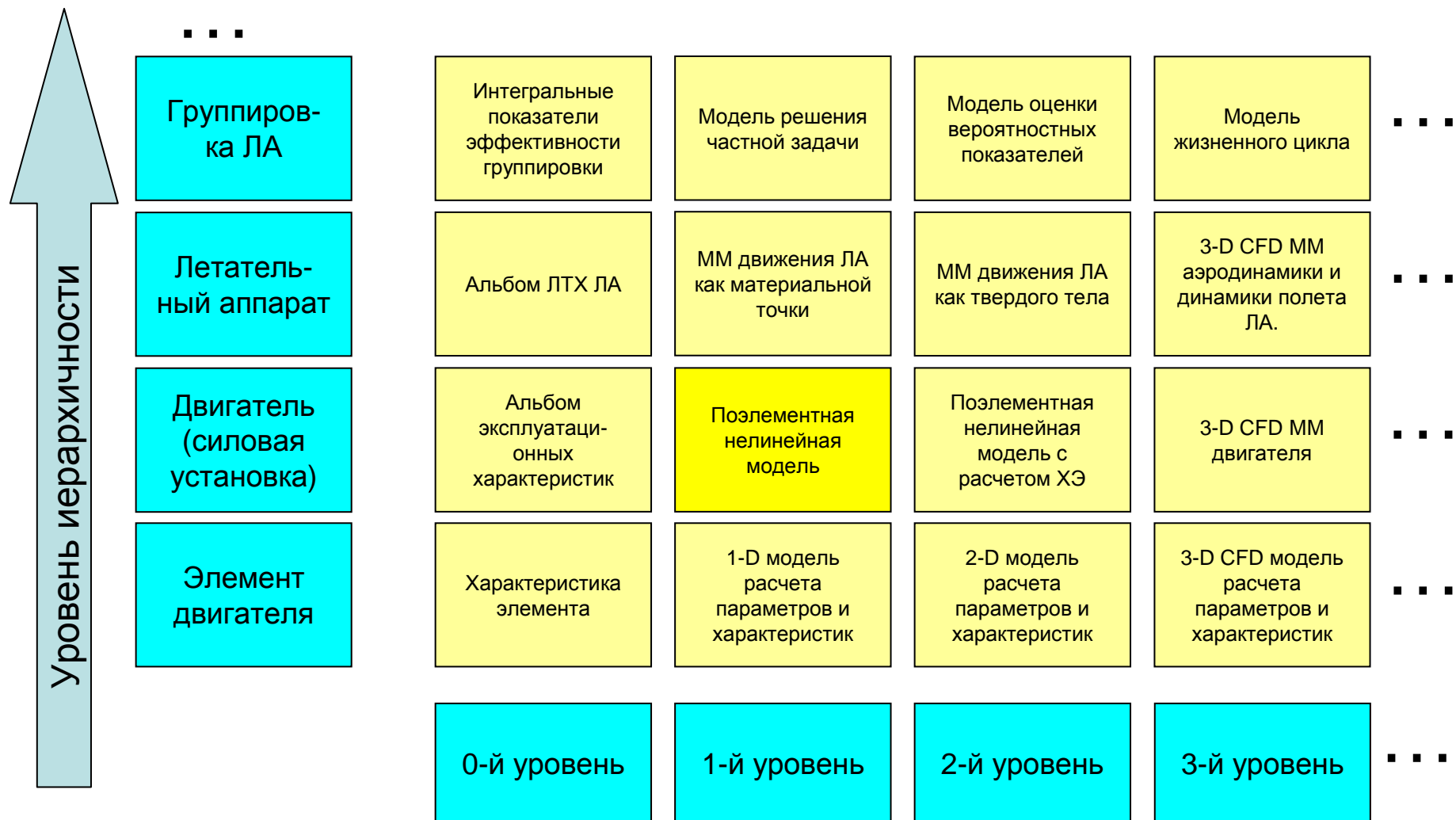
Май 2019

**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Классификация математических моделей авиационных двигателей и их элементов

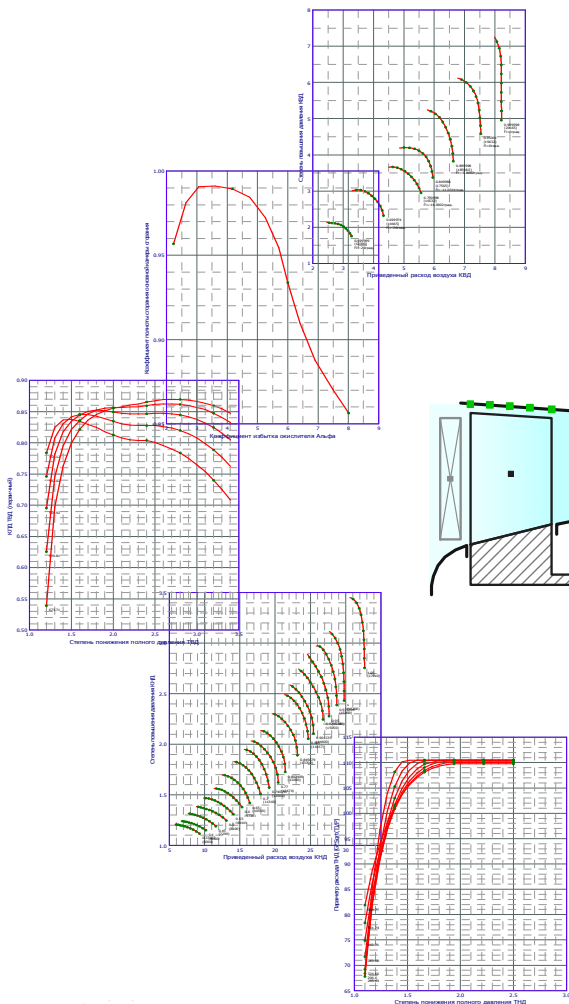




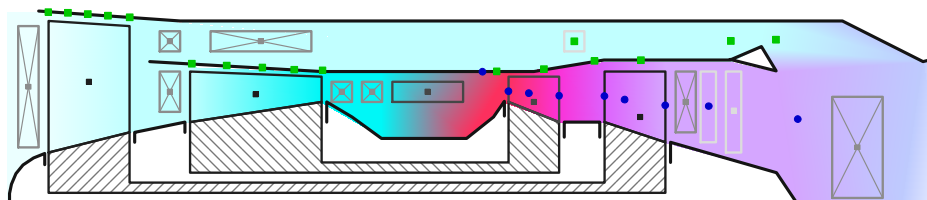
ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Термодинамическая ММ ТРДДФсм Установившиеся режимы работы

## Характеристики элементов



**ММ**



## Система нелинейных алгебраических уравнений

$$\Phi(\vec{a}, \vec{u}) = 0$$

$$\vec{a} = (\Pi_{КНД}, \Pi_{КВД}, \pi_{ТВД}^*, \pi_{ТНД}^*, m, G_T, F_{кр})$$

$$\vec{u} = (T_B^*, p_B^*, d, n_1, n_2)$$

$$\Phi_1 = \frac{G_{ОКС} - G_{САТВД}}{G_{САТВД}} = 0;$$

$$\Phi_2 = \frac{G_{ТВД} - G_{САТНД}}{G_{САТНД}} = 0;$$

$$\Phi_3 = \frac{P_{см II} - P_{см I}}{P_{см I}} = 0;$$

$$\Phi_4 = \frac{G_\phi - G_{кр}}{G_\phi} = 0.$$

$$\Phi_5 = \frac{G_{\phi I} - G_{\phi КВД}}{G_{\phi КВД}} = 0.$$

$$\Phi_6 = \frac{N_{ТВД} \cdot \eta_{мехВД} - N_{КВД}}{N_{ТВД}} = 0.$$

$$\Phi_7 = \frac{N_{ТНД} \cdot \eta_{мехНД} - N_{КНД}}{N_{ТНД}} = 0.$$





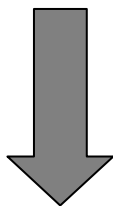
ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Термодинамическая ММ ТРДДФсм Неустановившиеся режимы работы

## Уравнения балансов мощности

$$n_{HD} \longleftrightarrow \Phi_6 = \frac{N_{ТВД} \cdot \eta_{мех\ ВД} - N_{КВД}}{N_{ТВД}} = 0.$$

$$n_{ВД} \longleftrightarrow \Phi_7 = \frac{N_{ТНД} \cdot \eta_{мех\ НД} - N_{КНД}}{N_{ТНД}} = 0.$$



## Уравнения динамики роторов

$$\frac{d\omega_{HD}}{dt} = \frac{\Delta M_{кр\ НД}}{J_{РНД}}$$

$$\frac{d\omega_{ВД}}{dt} = \frac{\Delta M_{кр\ ВД}}{J_{РВД}}$$

## Уравнения тепловой нестационарности

$$dT_{Pom} = \frac{Q_{Pom}}{M_{Pom} \cdot c_{Pom}} dt$$

$$Q_{Pom} = (\alpha \cdot F)_{np} \cdot G^{0,8} \cdot (T_{Pom.См.} - T_{Pom})$$

$$T_{Pom.См.} = \eta_{ОХЛ} \cdot T_{ОХЛ}^* + (1 - \eta_{ОХЛ}) \cdot \frac{(T_{Вх}^* + T_{Вых\ 0}^*)}{2}$$





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

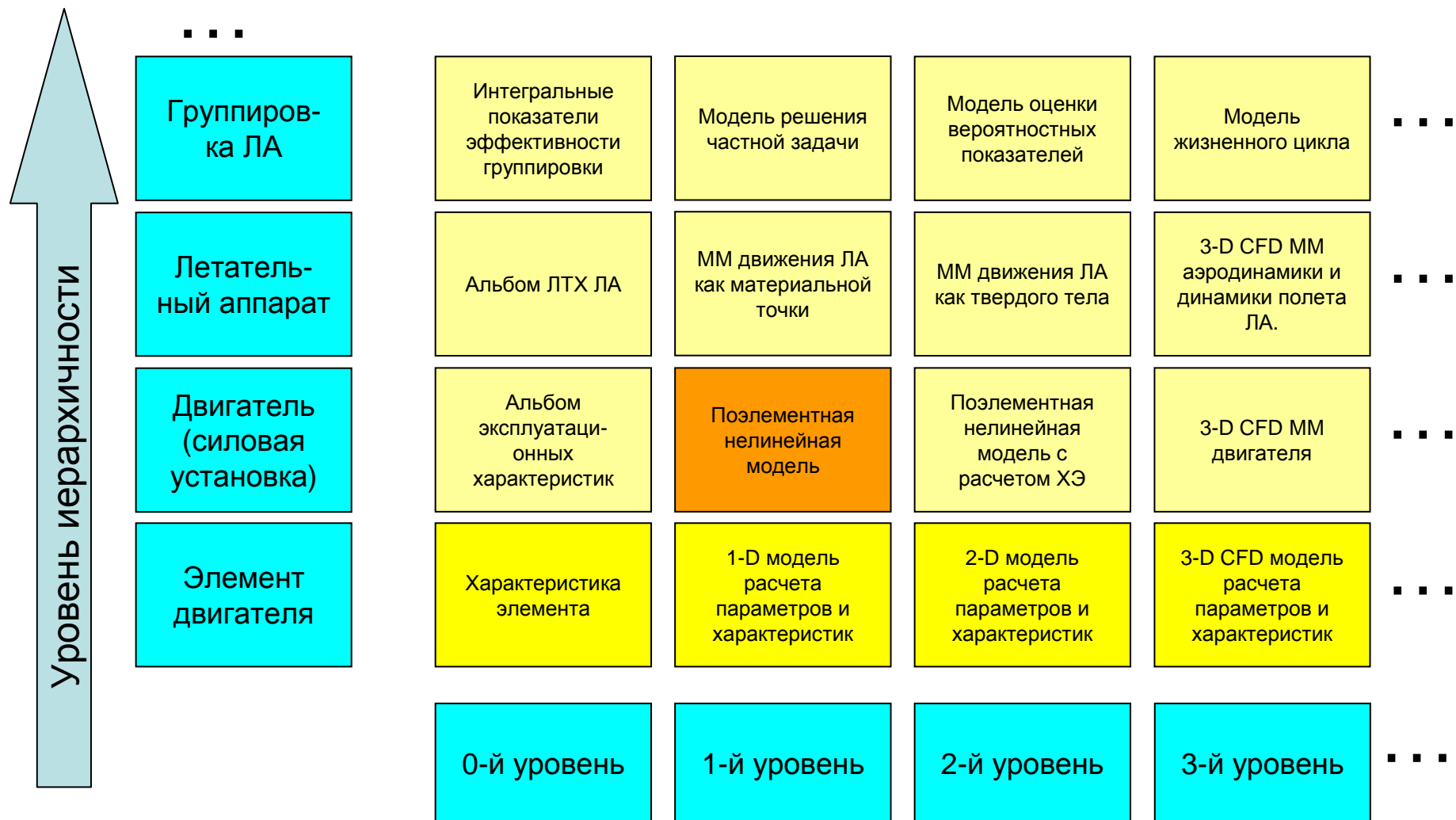
## Области применения программ расчета ГТД

<b>Разработка нового двигателя</b>	Разработка нового двигателя, формирование облика двигателя, параметрический анализ выбранной схемы, формирование программ управления
<b>Параметрическая доводка двигателя, включая летные испытания</b>	Идентификация ММ по результатам эксперимента, формирование ММ двигателя по результатам эксперимента, уточнение характеристик элементов в составе двигателя, уточнение программ управления
<b>Стендовые испытания двигателя</b>	Формирование формул пересчета, отладка двигателя на стенде, разработка программ испытаний
<b>Расчет ДВСХ</b>	Формирование программ управления по углу установки РУД, расчет ДВСХ по углу установки РУД и режиму работы двигателя
<b>Динамические характеристики двигателя</b>	Отработка систем автоматического управления двигателем и др.
<b>Расчет характеристик ЛА</b>	Передача статической модели двигателя заказчику, интеграция модели в программный комплекс расчета ЛА
<b>Использование в учебном процессе</b>	Установка программы в учебном классе, расчет дипломных работ



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

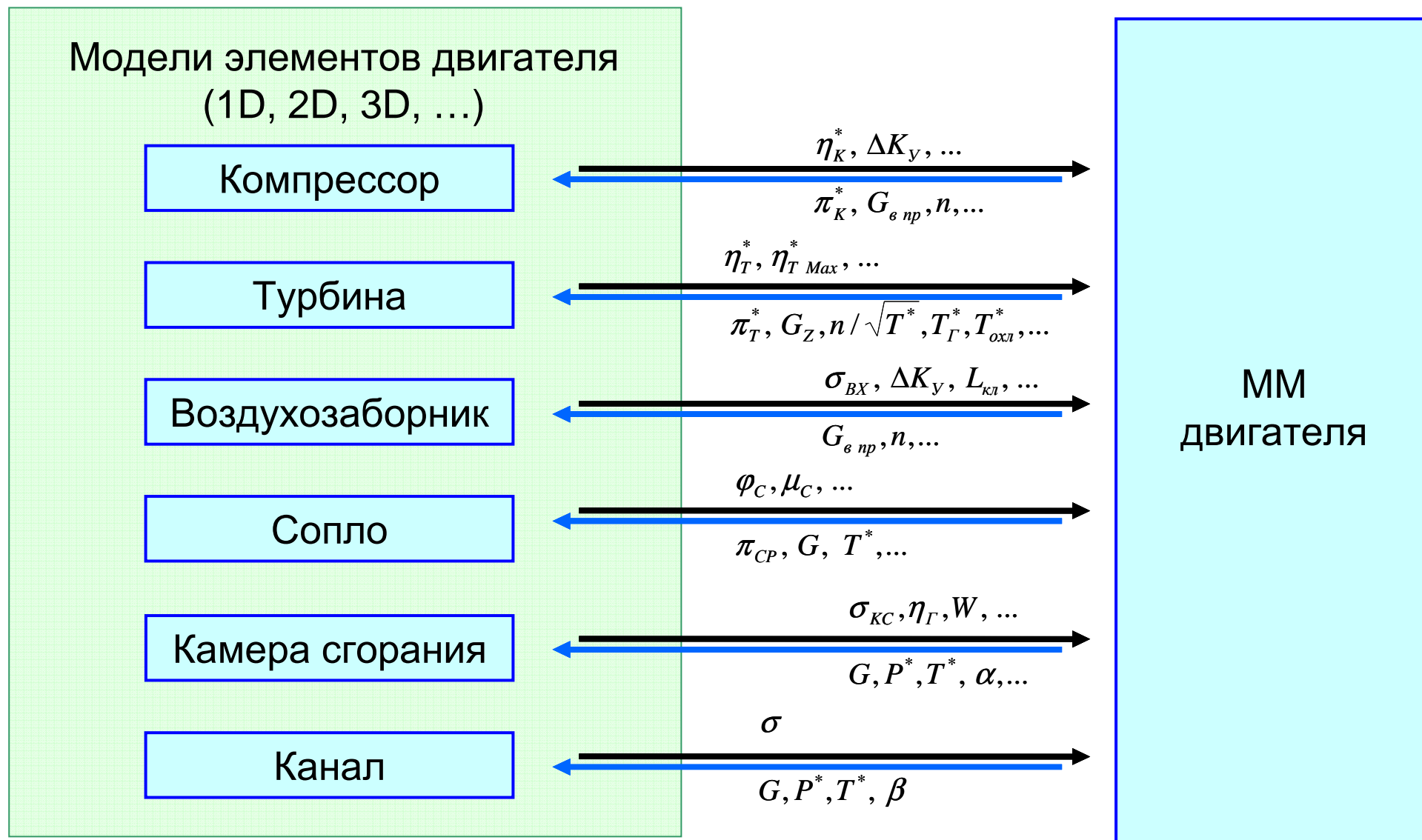
# Классификация математических моделей авиационных двигателей и их элементов





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Комплексная модель «Двигатель+элементы двигателя»

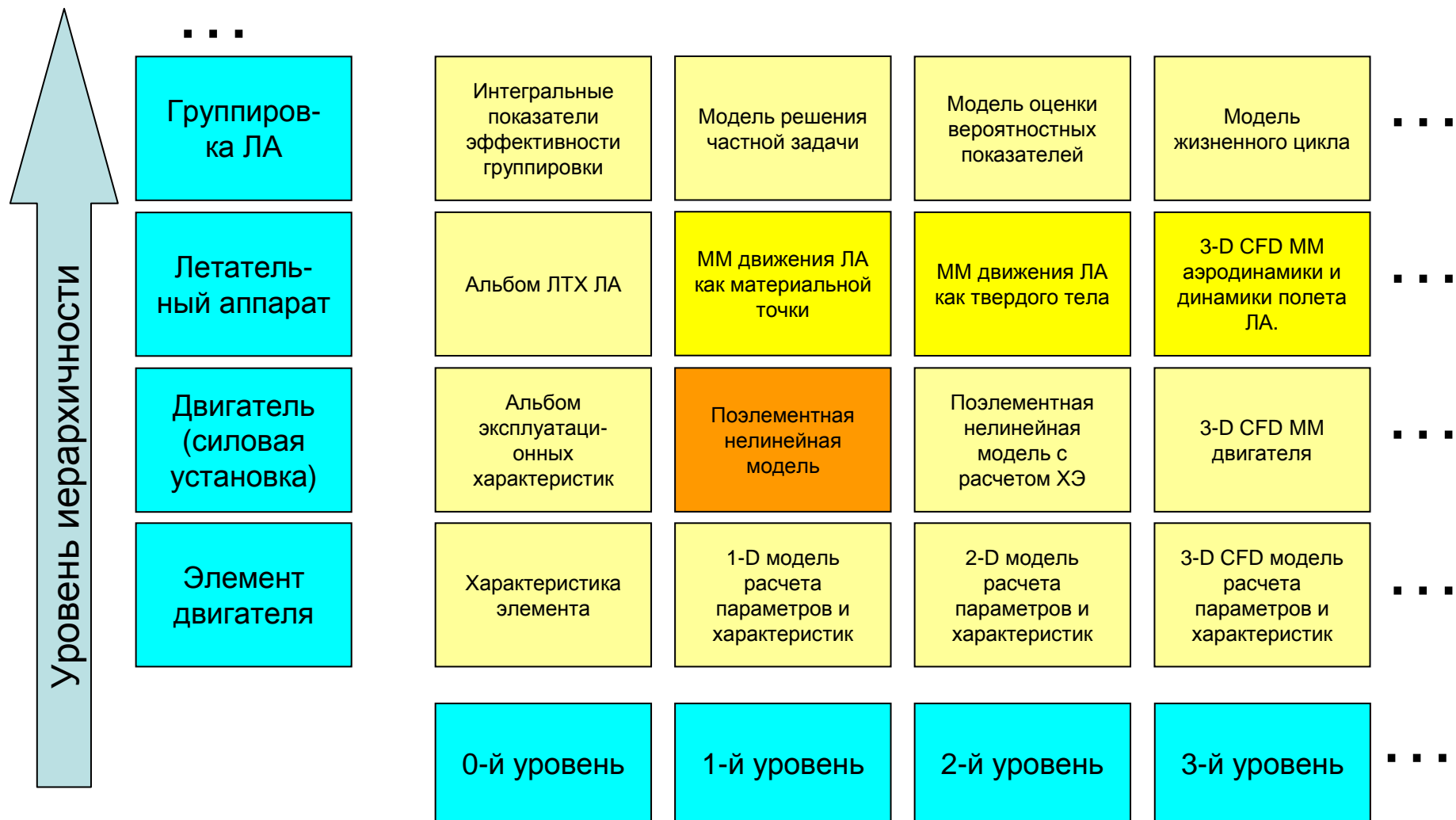






ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Классификация математических моделей авиационных двигателей и их элементов



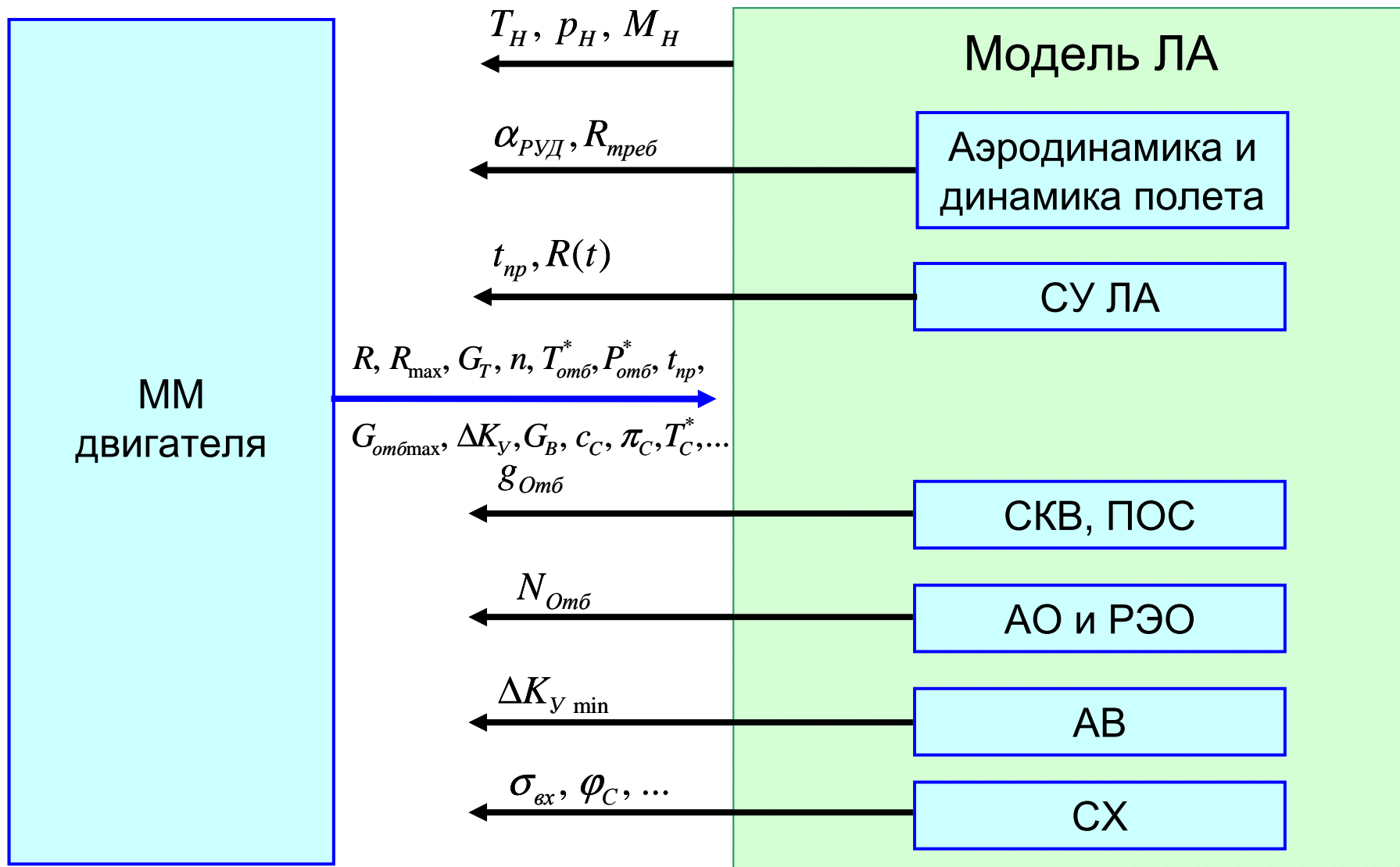
**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

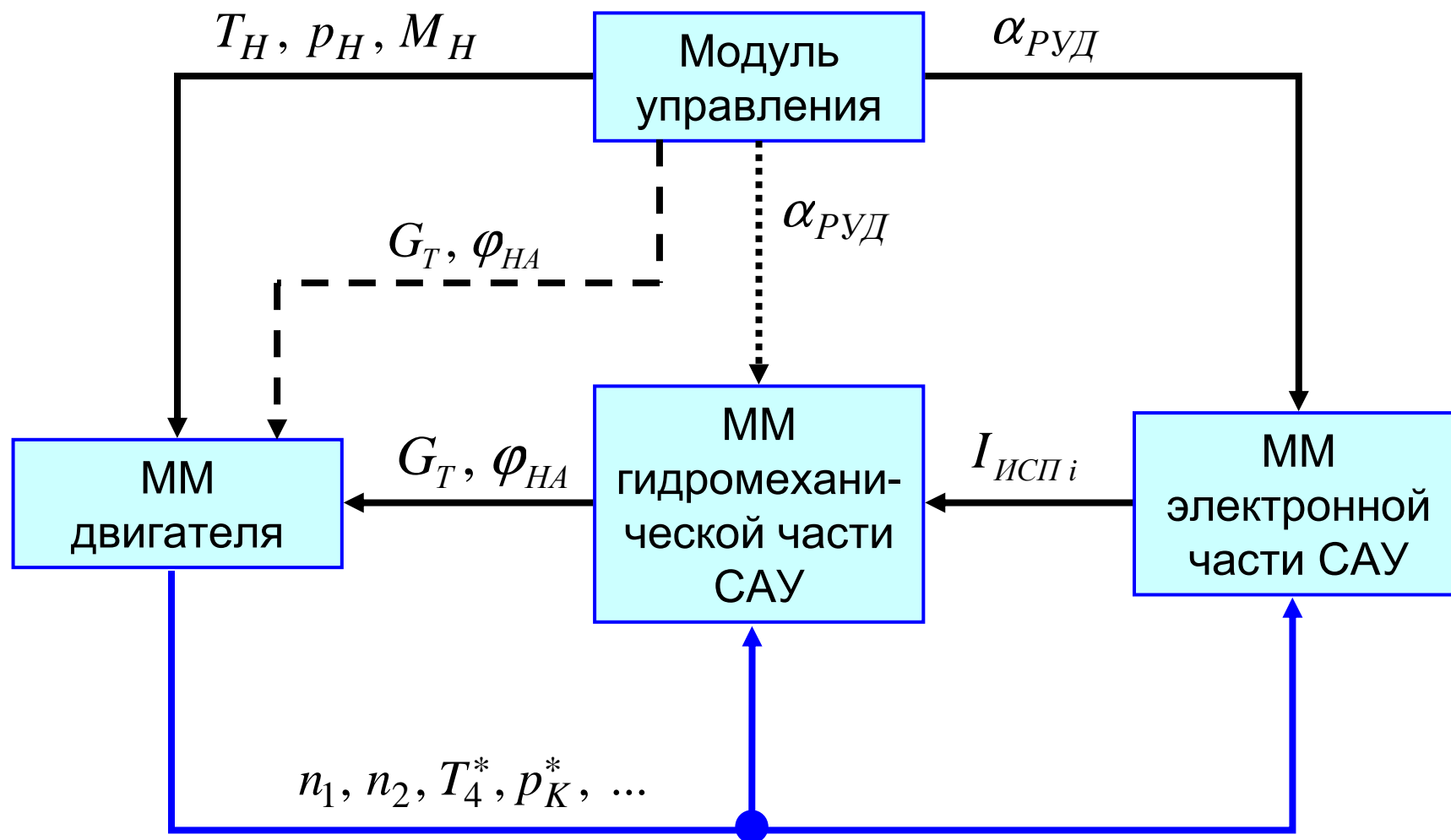
## Комплексная модель «Двигатель+ЛА»





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Комплексная модель «Двигатель+САУ»

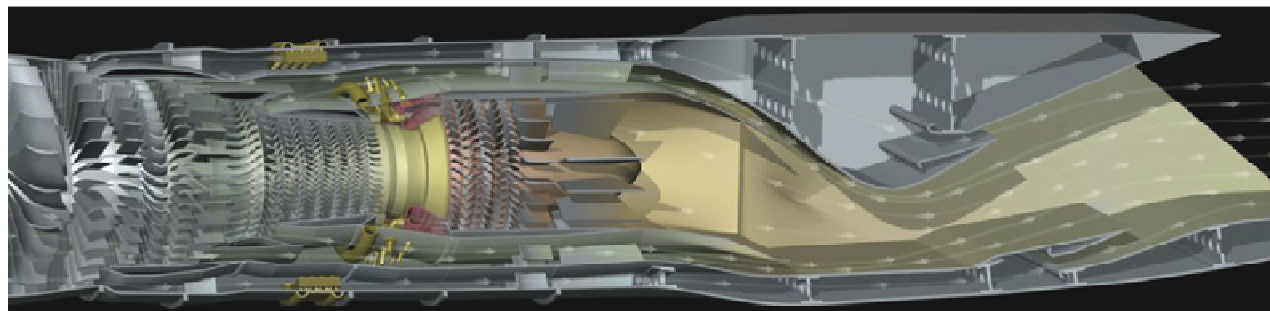
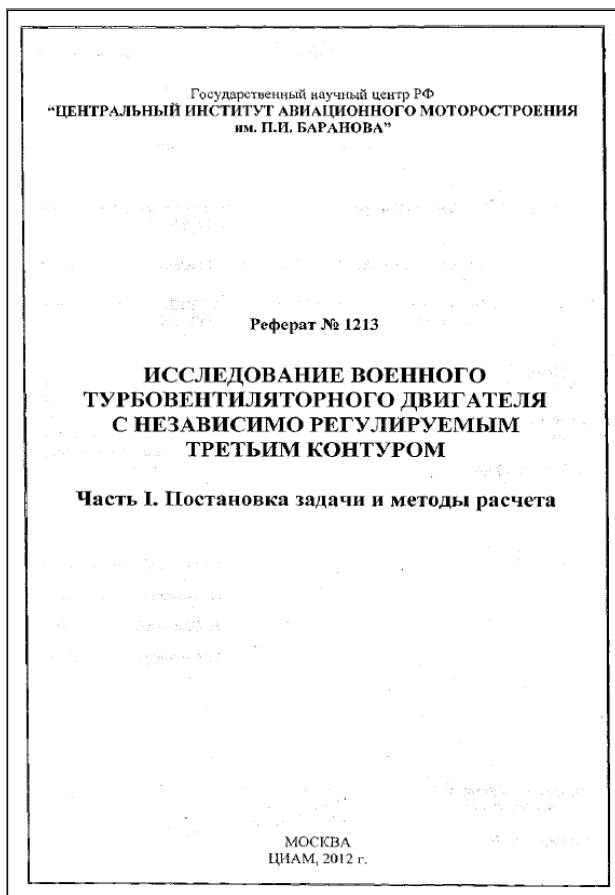




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Состояние вопроса



**Двигатель ADVENT (ADaptive Versatile ENgine Technology)**  
**компании GE**

**Ronald J. Simmons, M.S.,** The Ohio State University. **Design and Control of Variable Geometry Turbofan with an Independently Modulated Third Stream.** Dissertation. Preserved in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy in the Graduate School of the Ohio State University

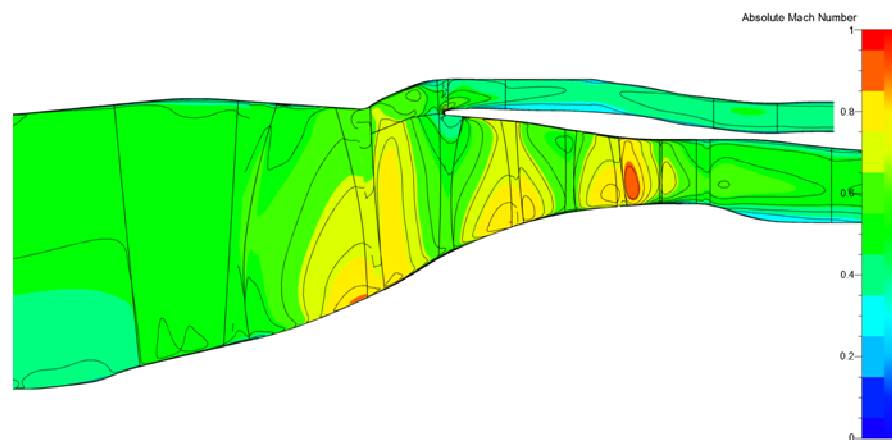
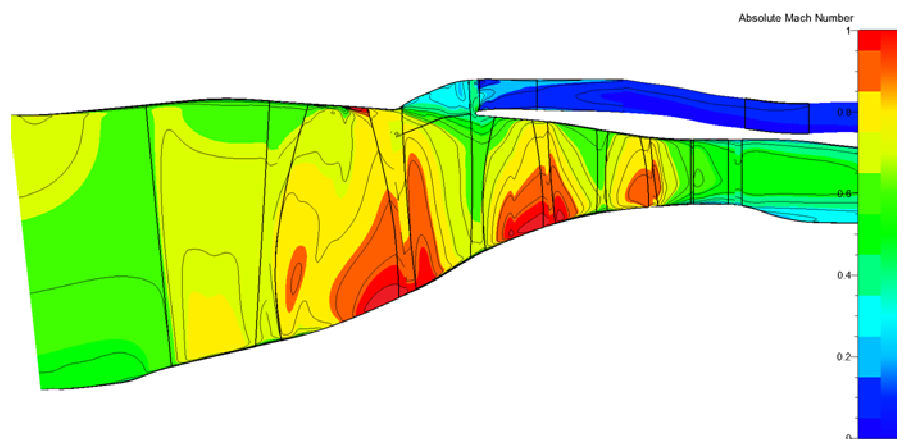


ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Исследование эффективности трехконтурного двигателя

## Объект исследования

ТРДДФсм с трехступенчатым КНД, с каналом 3-го контура, начинающимся после 1-й ступени вентилятора и заканчивающимся независимо регулируемым соплом.

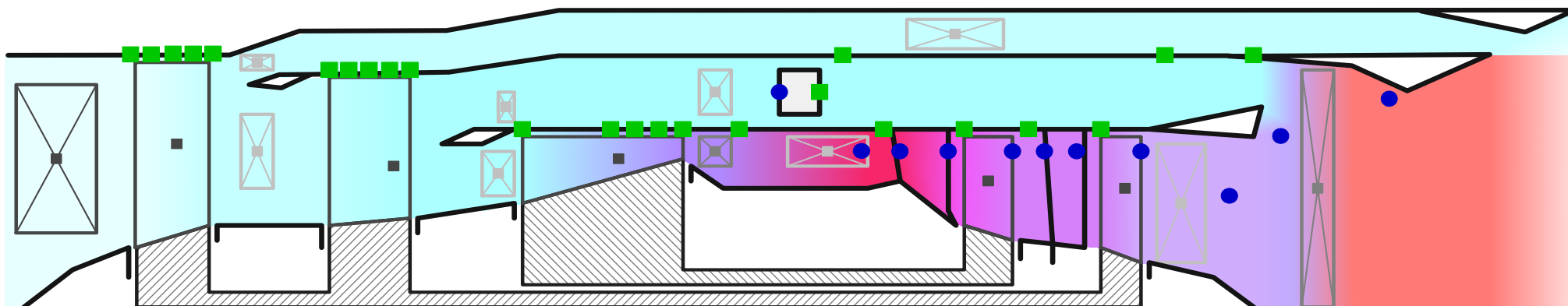




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Расчетная схема объекта исследования



Вход в 3-й контур открывается за 1-й ступенью вентилятора

Выход из третьего контура осуществляется через отдельное регулируемое сопло.

Регулируемые элементы двигателя:

- ВНА вентилятора;
- НА КВД;
- смеситель;
- общее сопло для 1 и 2 контуров;
- сопло 3-го контура.

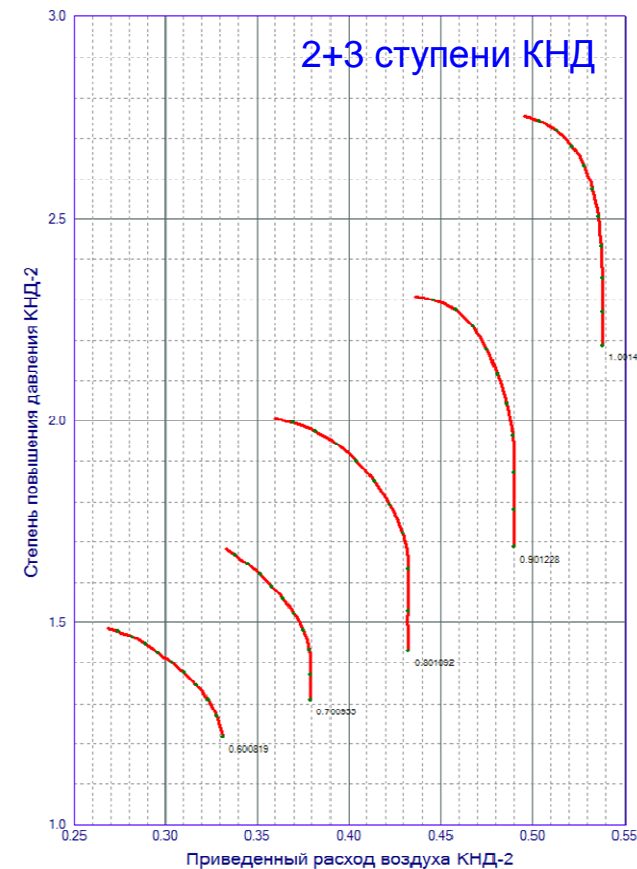
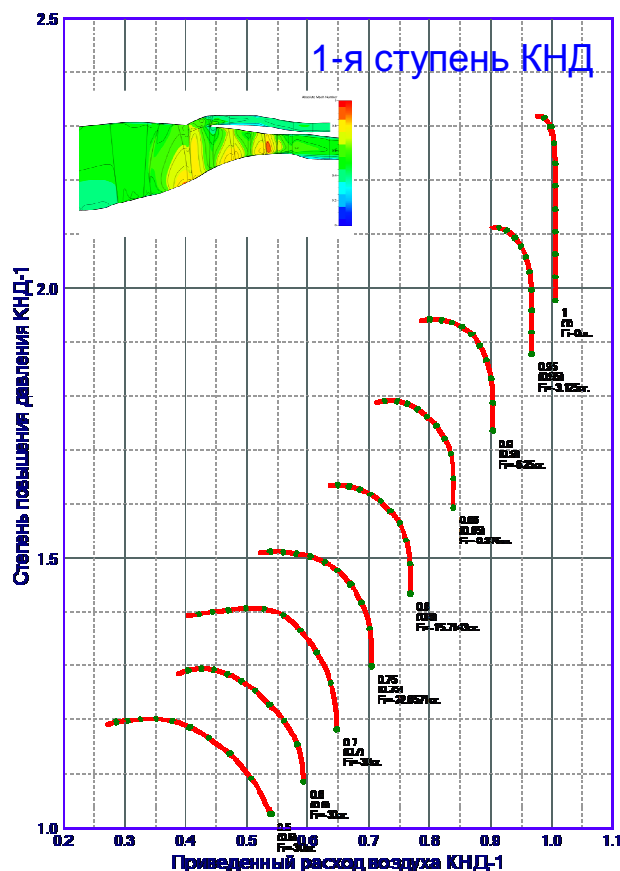
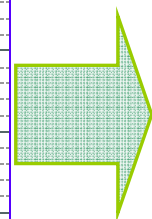
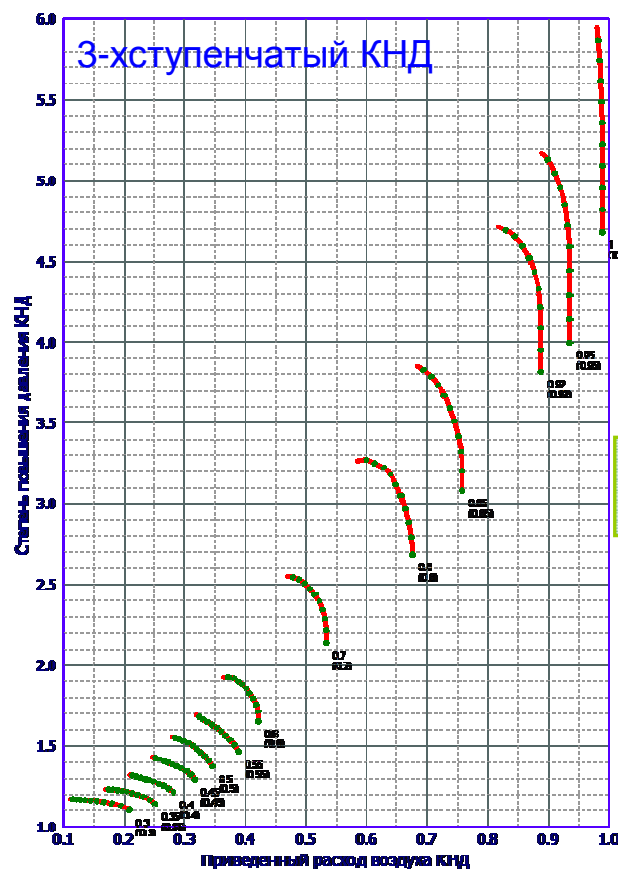


ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Исследование эффективности трехконтурного двигателя

## Характеристики компрессора низкого давления

Использовались расчетные характеристики КНД и его ступеней, полученные по 3-D модели (*NUMECA Fine*)







ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

Исследование эффективности  
трехконтурного двигателя



## Внешнее сопротивление силовой установки

$$R = G_c \cdot c_c - G_B \cdot V_{пол}$$

Тяга двигателя

$$R_{эф} = R - (X_{Вх} + X_{МГ} + X_{Вых})$$

Тяга силовой установки

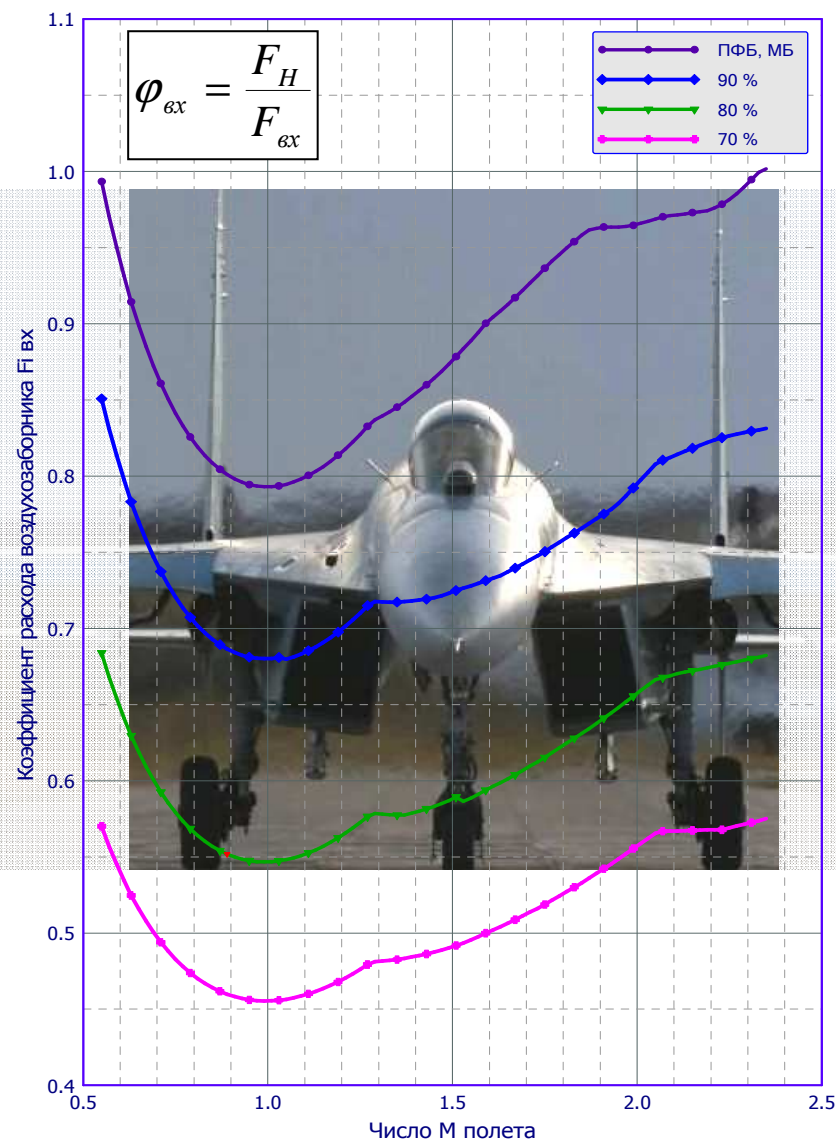
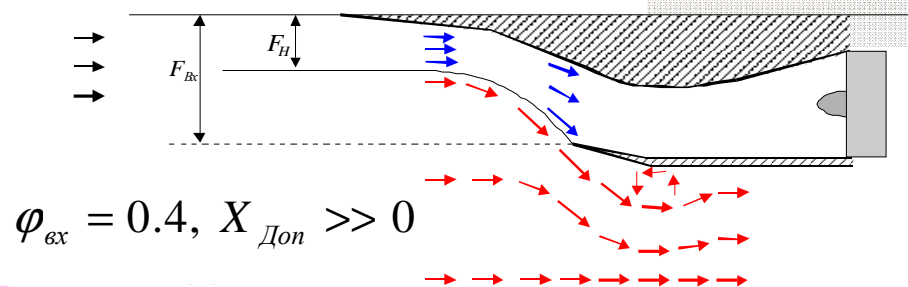
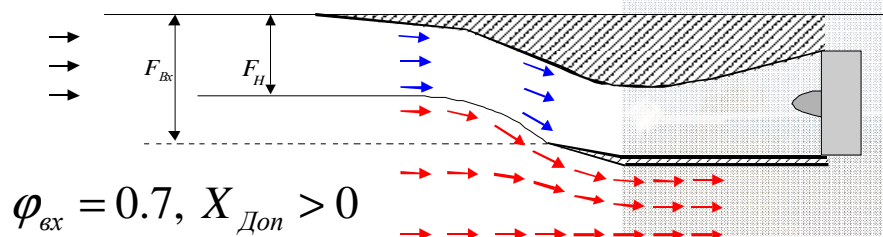
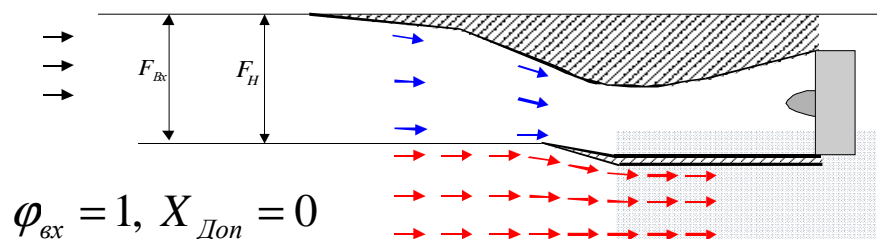




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Исследование эффективности трехконтурного двигателя

## Входное устройство

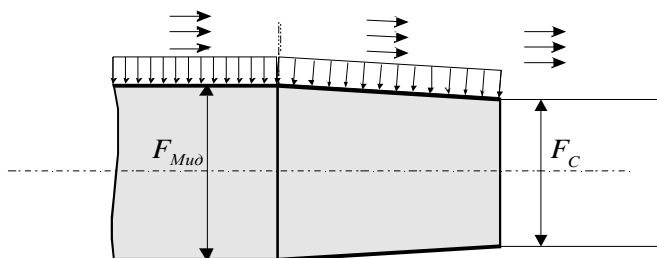




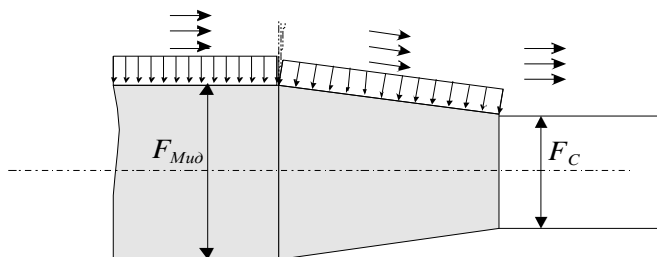
ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Исследование эффективности трехконтурного двигателя

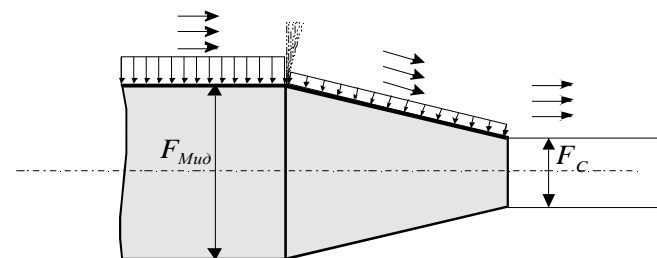
## Выходное устройство



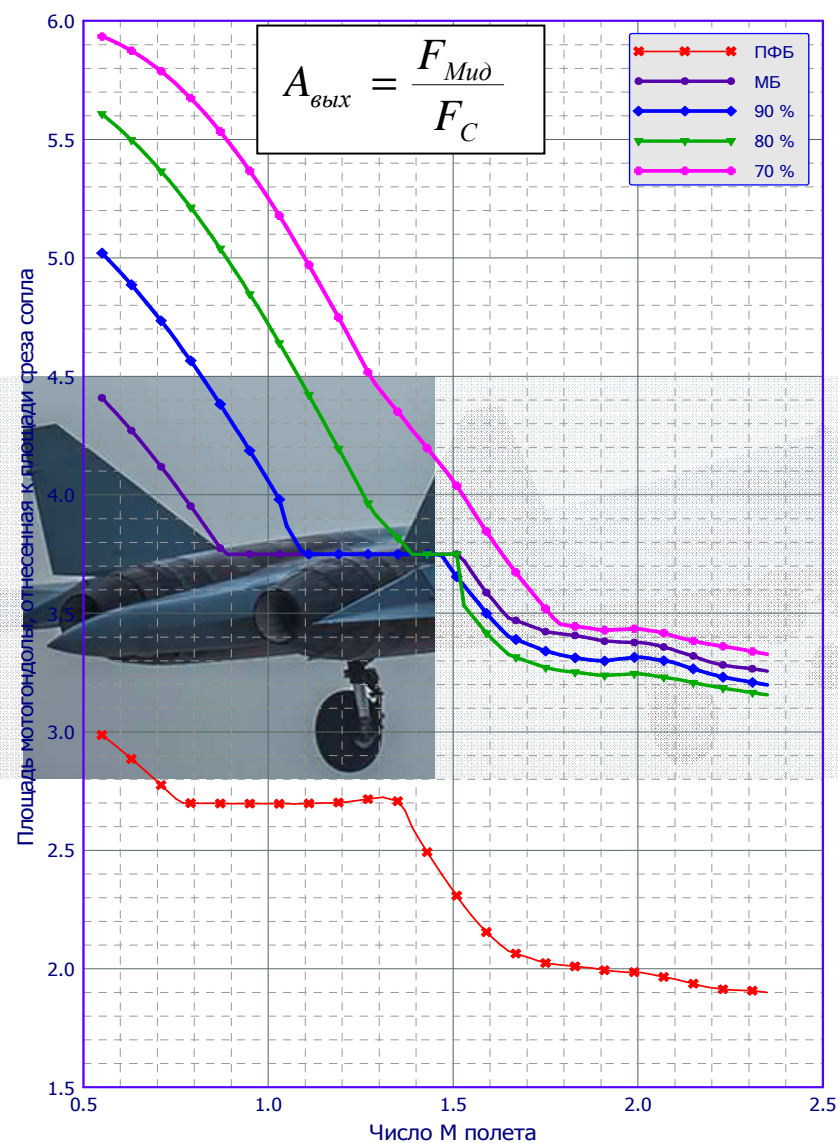
$$\frac{F_{Mu0}}{F_C} \rightarrow 1, X_{Kорм} \rightarrow 0$$



$$\frac{F_{Mu0}}{F_C} \approx 2, X_{Kорм} > 0$$



$$\frac{F_{Mu0}}{F_C} \approx 4, X_{Kорм} \gg 0$$



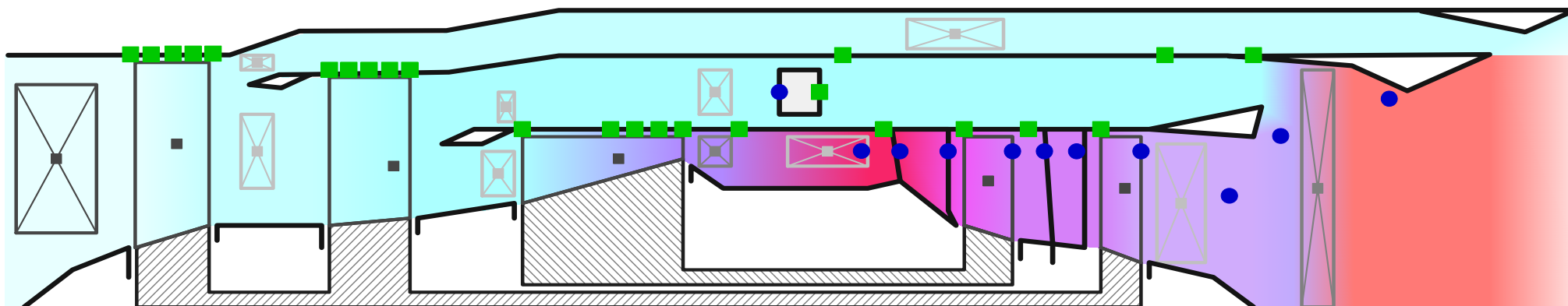
**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Расчетная схема объекта исследования



Вход в 3-й контур открывается за 1-й ступенью вентилятора

Выход из третьего контура осуществляется через отдельное регулируемое сопло.

Регулируемые элементы двигателя:

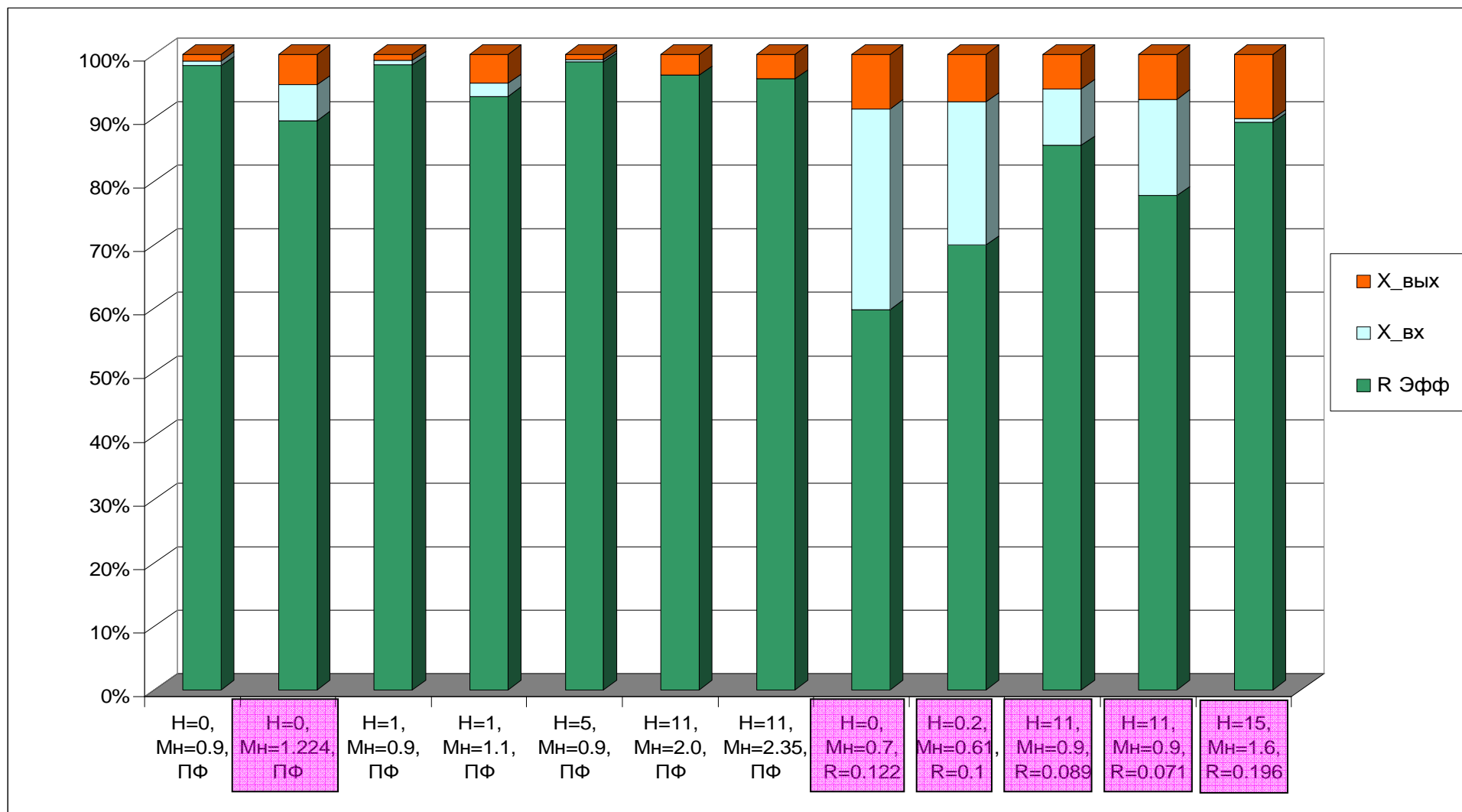
- ВНА вентилятора;
- НА КВД;
- смеситель;
- общее сопло для 1 и 2 контуров;
- сопло 3-го контура.



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Составляющие силы тяги силовой установки





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ

ОБОРОНПРОМ

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Постановка задачи оптимизации режима работы двигателя

#### Варьируемые переменные:

- площадь критического сечения сопла 3-го контура;
- угол установки ВНА КНД-1;
- угол установки НА КВД;
- площадь смесителя по наружному контуру;
- площадь критического сечения сопла 1-го и 2-го контуров.

**Эффективная тяга** задается как **параметр режима работы**, по которому ограничивается подача топлива в основную камеру сгорания.

**Целевая функция** - эффективный удельный расход топлива.

#### Ограничения:

- минимальный запас ГДУ КНД-1;
- максимальный приведенный расход воздуха КНД-1;
- максимальная физическая частота вращения ротора низкого давления;
- максимальное давление за компрессором (актуально для режима полета с максимальным скоростным напором);
- максимальная температура газа (актуальна для сверхзвукового бесфорсажного режима полета).



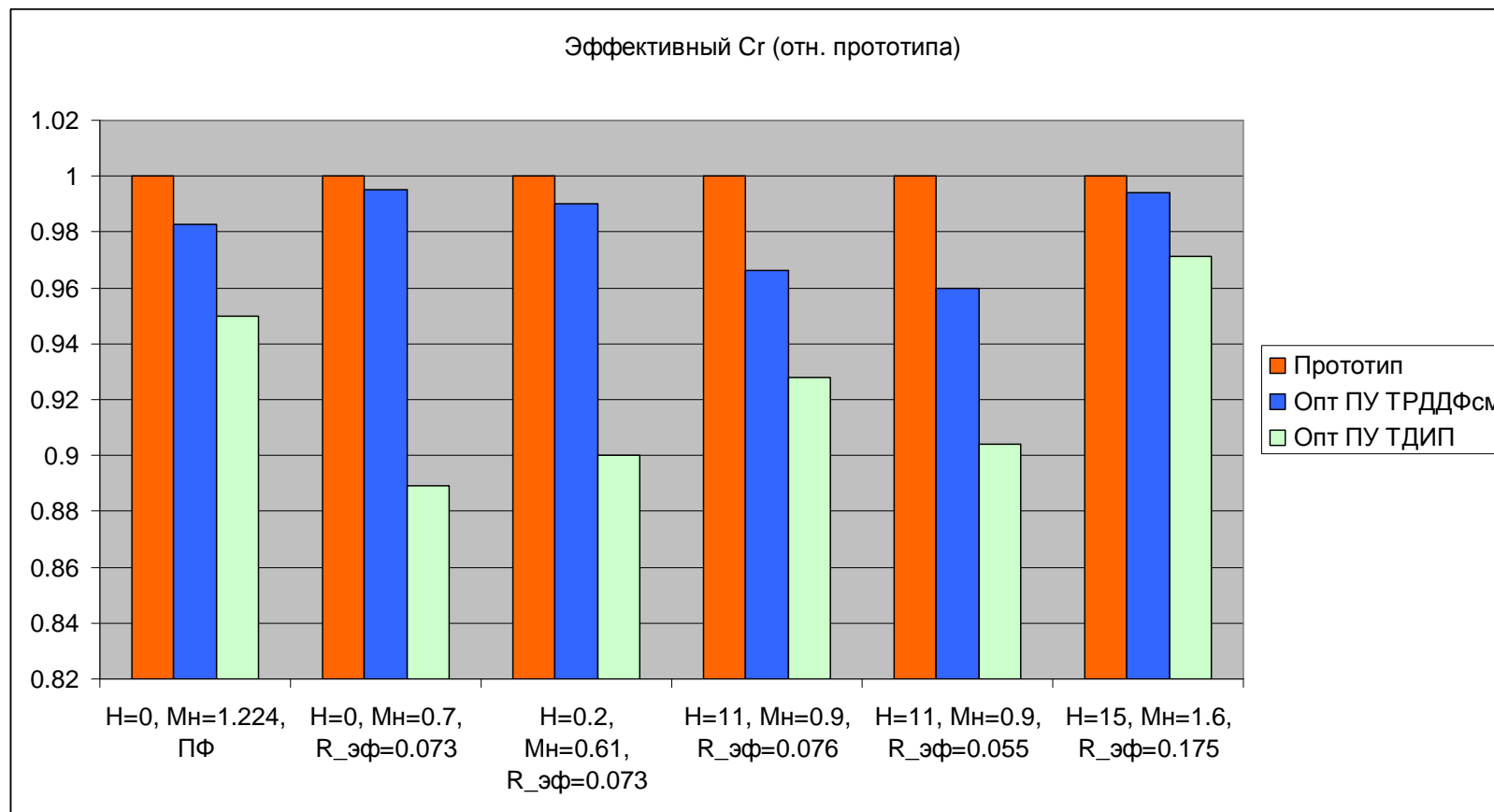




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Результат оптимизации режимов работы двигателя

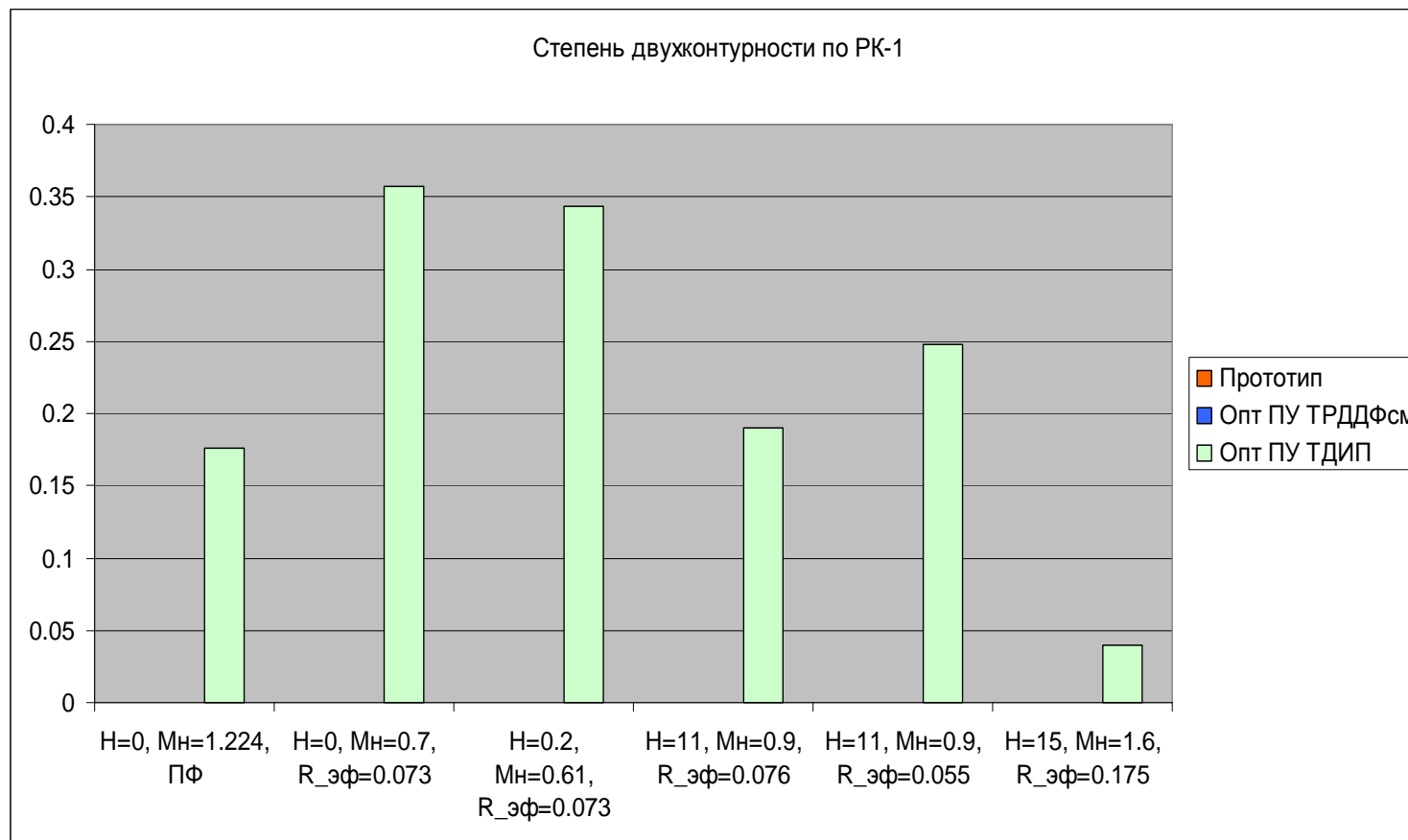




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Результат оптимизации режимов работы двигателя



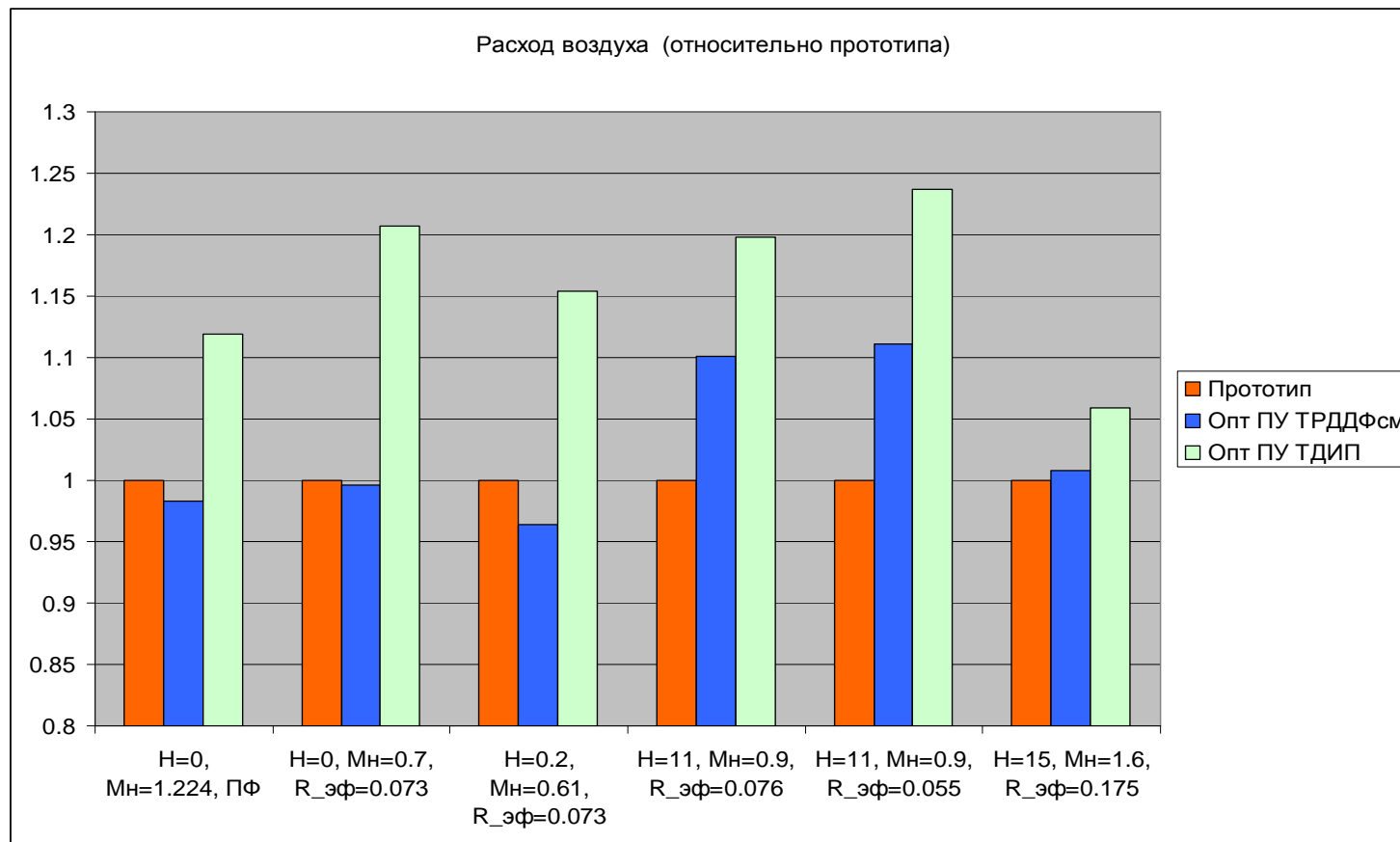




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

### Результат оптимизации режимов работы двигателя

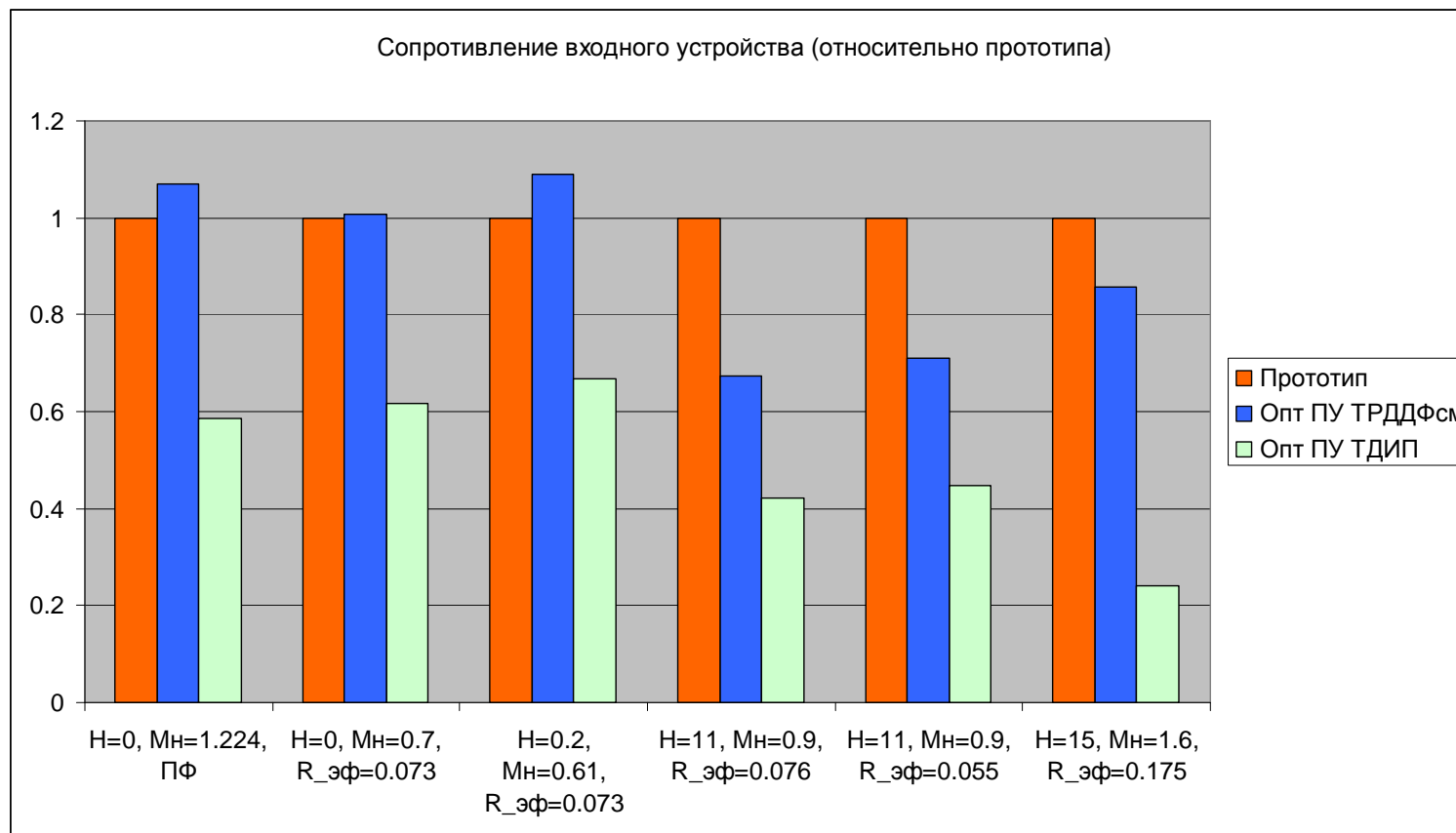




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование эффективности трехконтурного двигателя

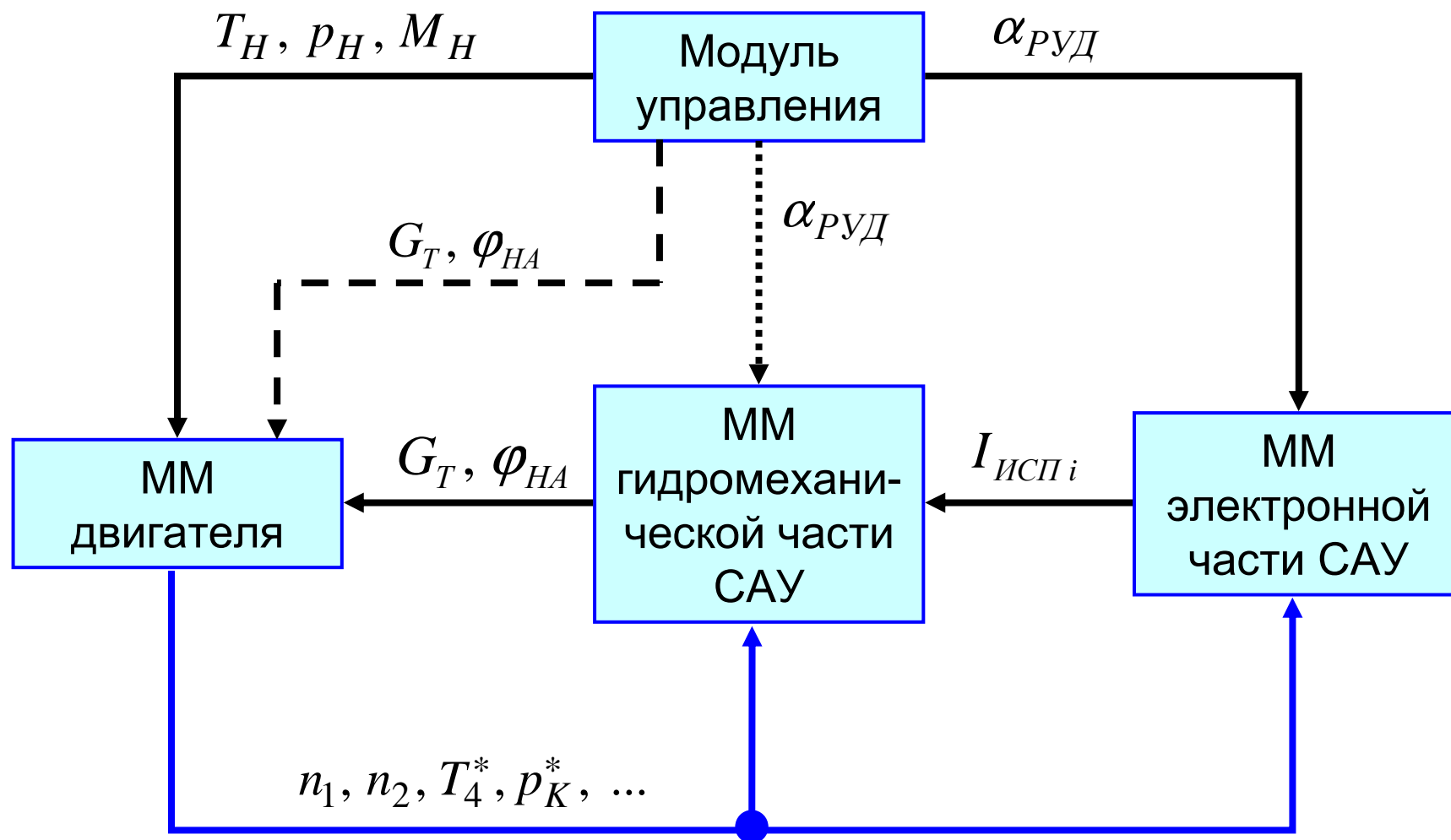
### Результат оптимизации режимов работы двигателя





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

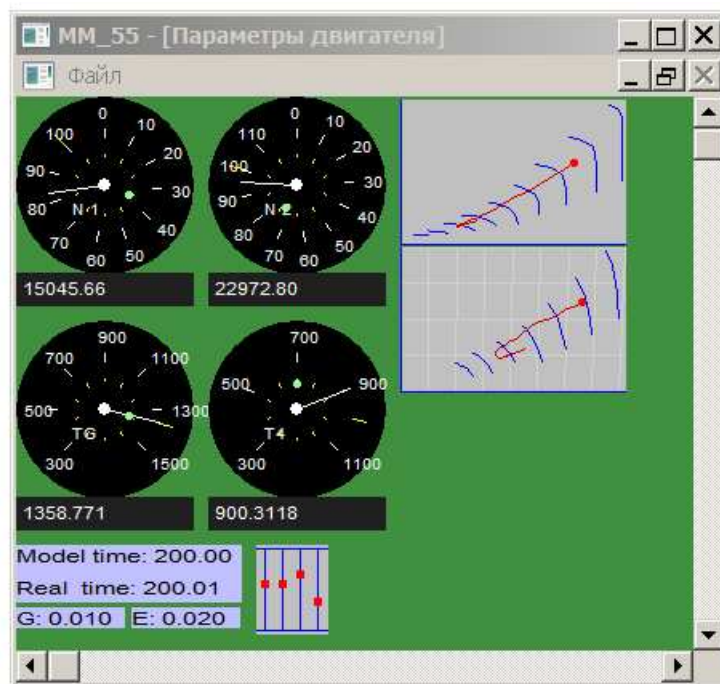
## Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД



**Управление**

Атмосфера: ☒ САУ

Высота, км:

Температура нар.возд., K:

Давл. нар. возд., Па:

Close

Аруд:

G топл:

Fi HA:

Mh:

Управление:

Запомн Привод

Э-Старт Э-Стоп

ПП-старт ПП-стоп

Чит. ПЧ Пр. к нач.

ЭРД-1

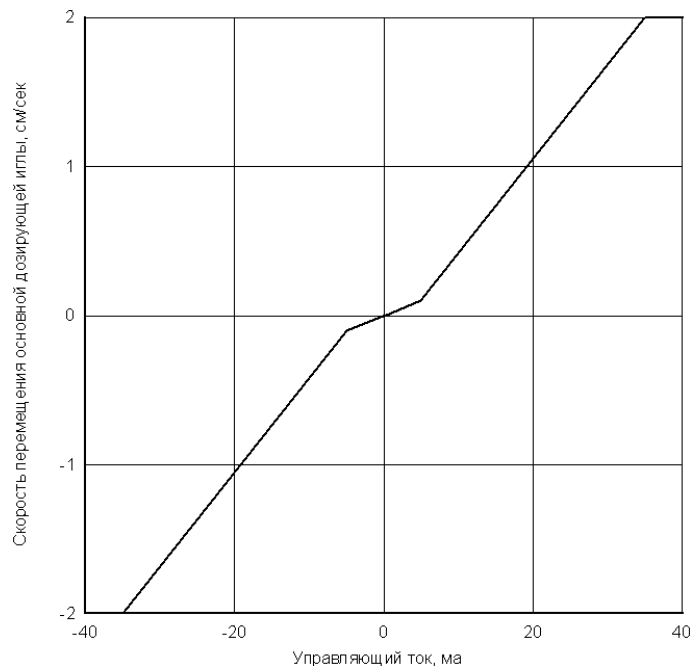
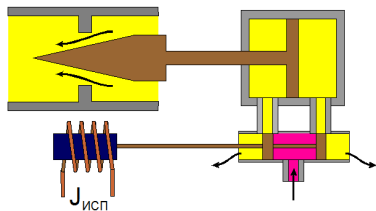
Обн. САУ



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД

## Алгоритм работы электронного цифрового регулятора на переходных режимах



$$J_{\text{исп. эл}} = J_{\text{исп. эл П}} + J_{\text{исп. эл И}} + J_{\text{исп. эл Д}}$$

$$J_{\text{исп. эл П}} = K_1 \cdot X_{\text{ОДИ}} \cdot \Delta \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)$$

$$\frac{dJ_{\text{исп. эл И}}}{dt} = K_2 \cdot K_{\text{И}}^{\text{Снис}} \cdot X_{\text{ОДИ}} \cdot \Delta \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)$$

$$J_{\text{исп. эл Д}} = K_3 \cdot \frac{d\Delta \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)}{dt}$$

$$W(P) = \frac{1}{T_{\text{сгл}} P + 1}$$

$$\Delta n_{\text{ВД}} = n_{\text{ВД}}^{\text{уст}} - n_{\text{ВД СГЛ}}, \text{ об/мин}$$

$$\left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)^{\text{уст}} = \Delta n_{\text{ВД}} \cdot (B \cdot c_{n_{\text{ВД}2}}^{T_B^*} \cdot c_{n_{\text{ВД}2}}^{\alpha_{\text{РУД}}} \cdot a_6), \frac{\text{об/мин}}{\text{с} \cdot \text{кгс/см}^2}$$

$$\Delta \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right) = \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)^{\text{уст}} - \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K} \right)^{\text{факт}}$$



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД

## Независимые варьируемые переменные

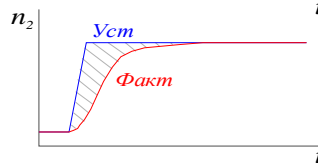
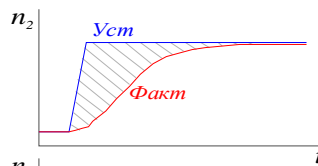
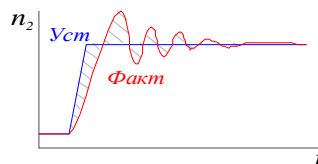
№ п/п	Название параметра
1	Коэффициент усиления пропорциональный $K_1$
2	Коэффициент усиления дифференциальный $K_3$
3	Коэффициент усиления интегральный $K_2$
4	Предел интегральной составляющей тока $ J_{\text{исп. эл И}} _{\text{max}}$
5	Предел пропорциональной составляющей тока $ J_{\text{исп. эл П}} _{\text{max}}$
6	Предел дифференциальной составляющей тока $ J_{\text{исп. эл Д}} _{\text{max}}$
7	Коэффициент списания интегральной составляющей $K_{\text{И}}^{\text{Спис}}$
8	Постоянная времени модуля сглаживания параметра $T_{\text{сгл}}$

## Целевая функция (минимизация)

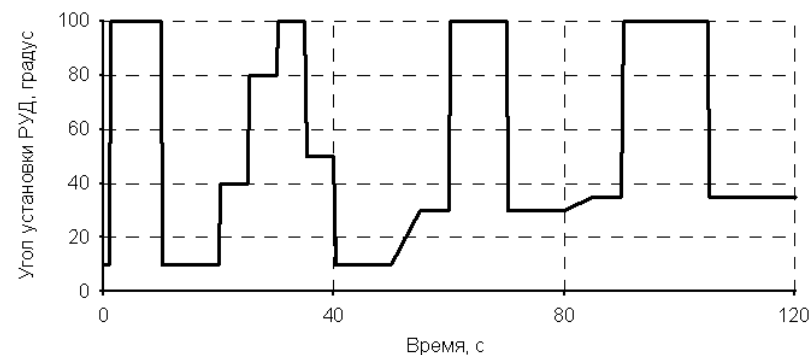
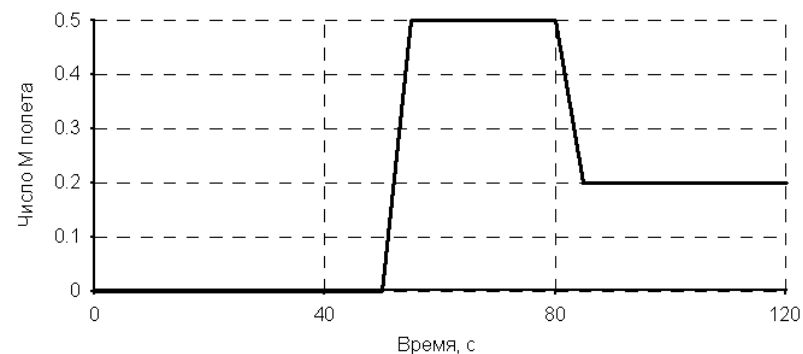
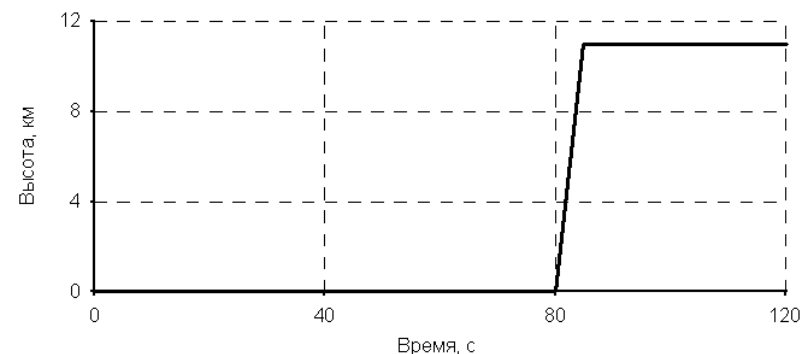
$$L_{\text{Перех}} = \int_{t=0}^{t_{\text{кон}}} \sqrt{1 + \left[ \frac{\left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K^*} \right)^2}{dt} \right]} dt$$

## Функциональное ограничение

$$\frac{1}{t_{\text{кон}}} \cdot \int_{t=0}^{t_{\text{кон}}} \left| \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K^*} \right)^{\text{уст}} - \left( \frac{\dot{n}_{\text{ВД}}}{P_K^*} \right)^{\text{факт}} \right| dt < \Delta_{\text{зад}}^{\Sigma}$$



## Циклограмма управления

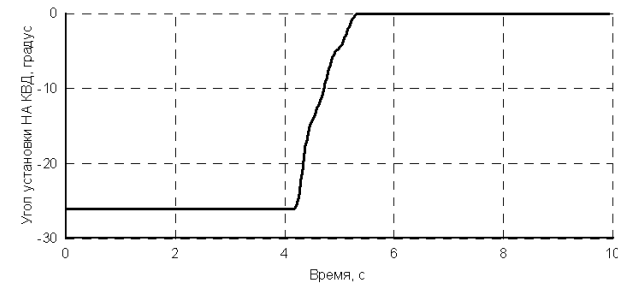
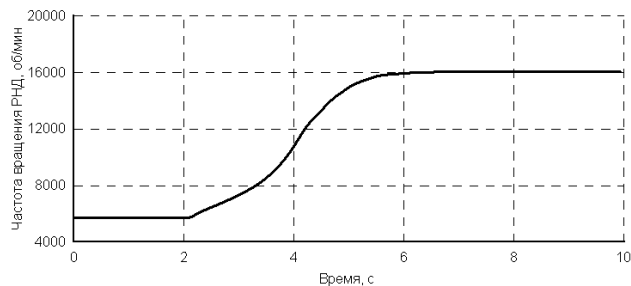
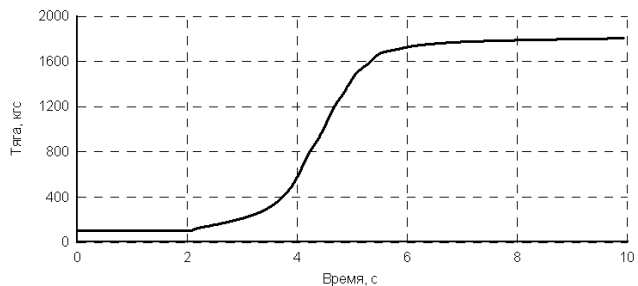
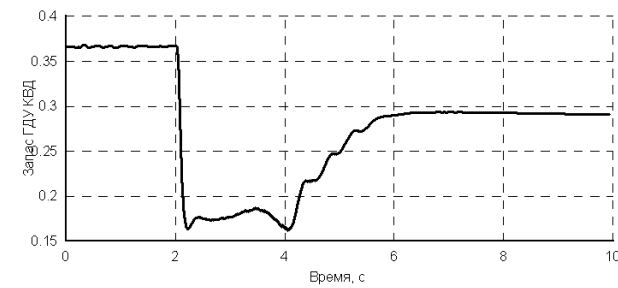
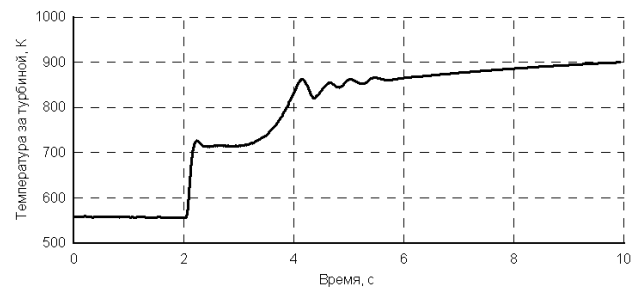
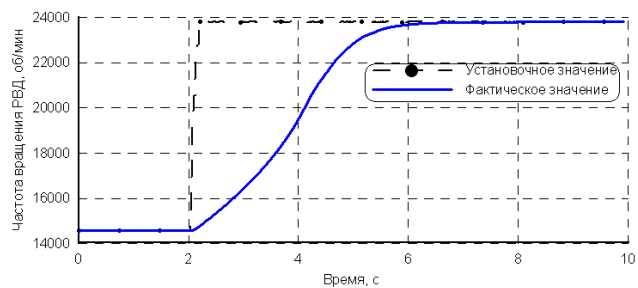
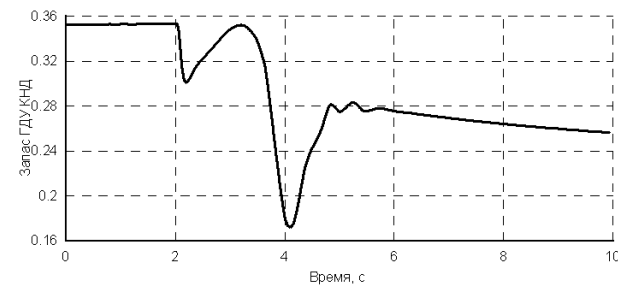
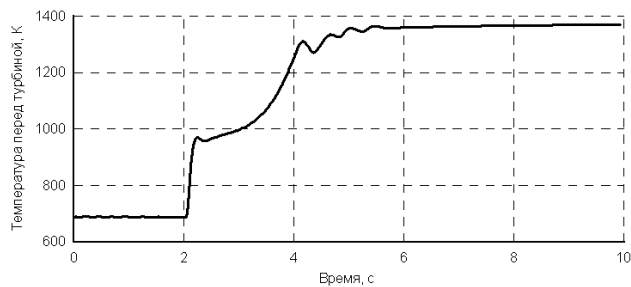
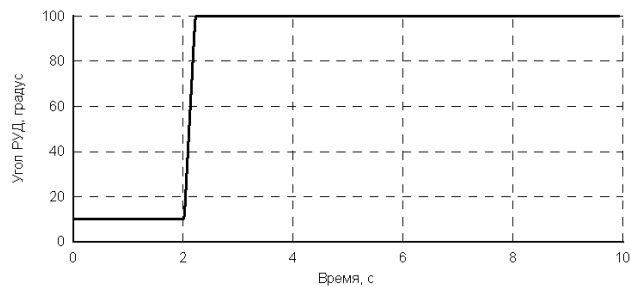




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД

Приемистость при штатном уровне «зашумленности» управляемого параметра



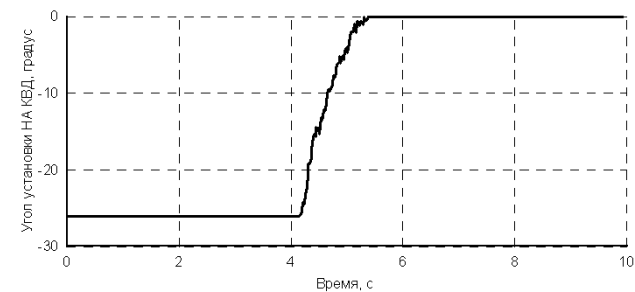
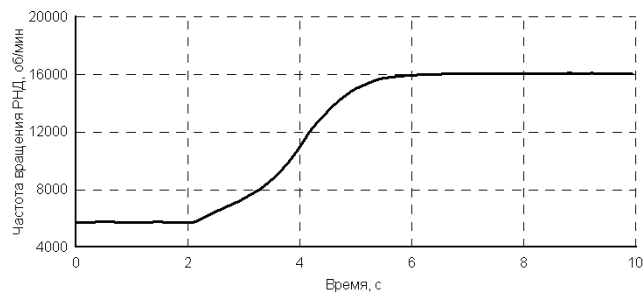
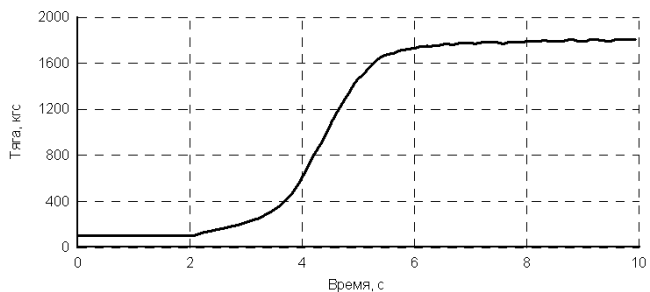
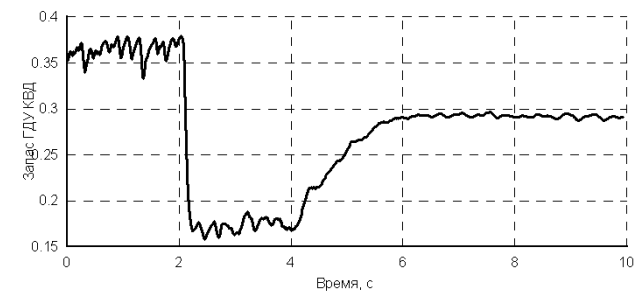
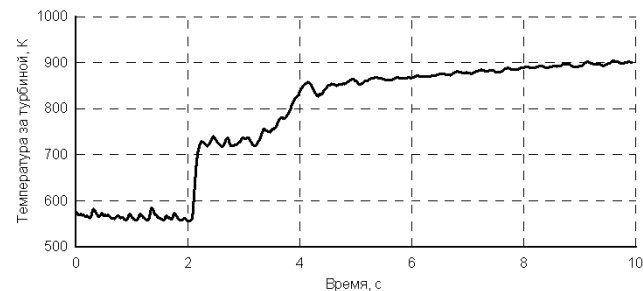
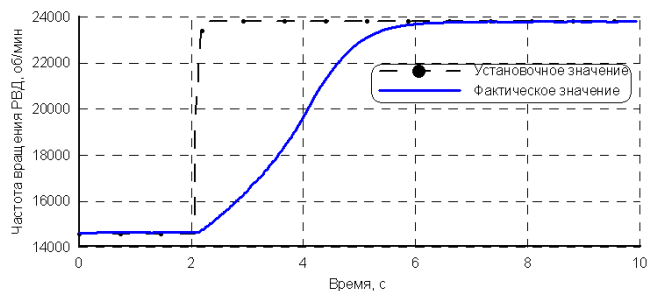
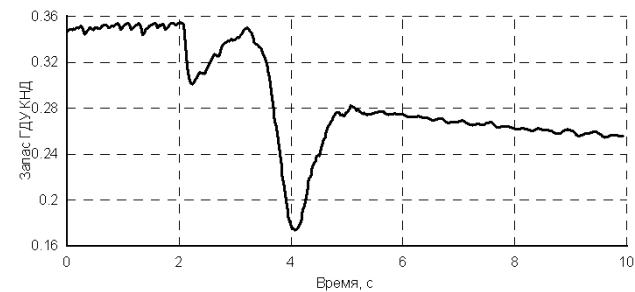
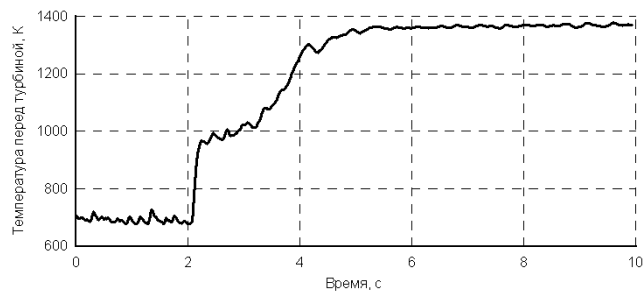
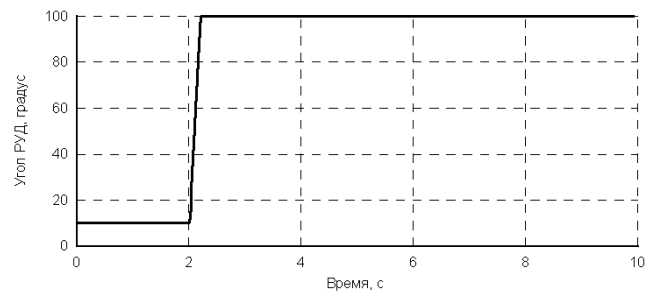




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД

Приемистость при 10-кратном уровне «зашумленности» управляемого параметра

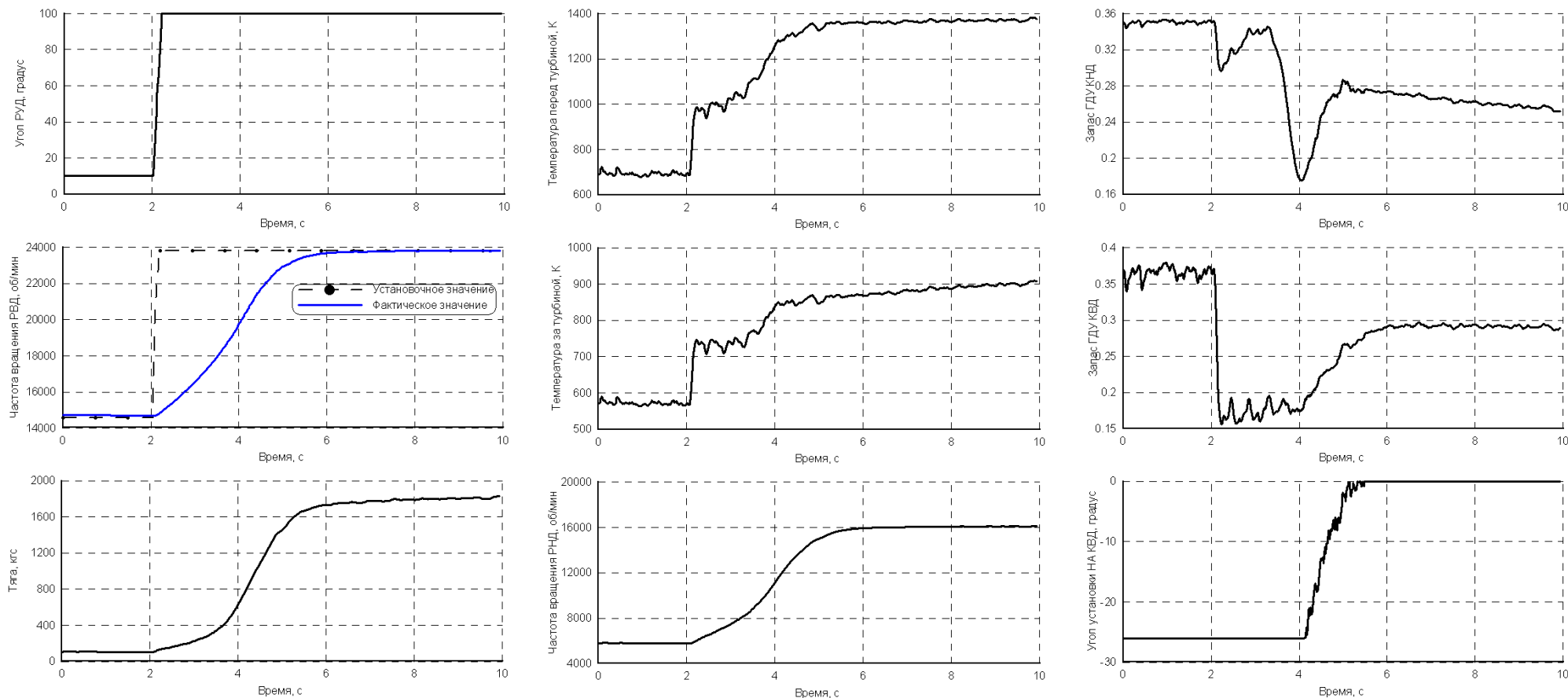




ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Определение оптимальных параметров цифровой САУ ТРДД

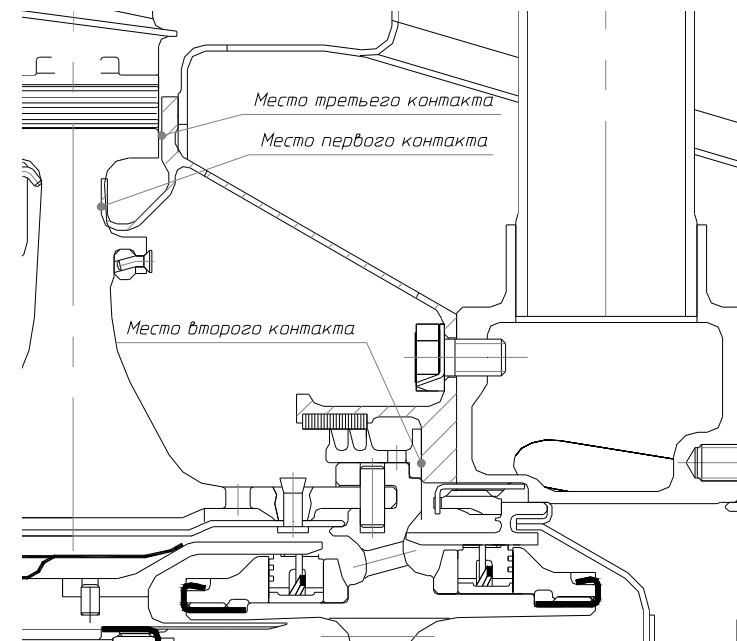
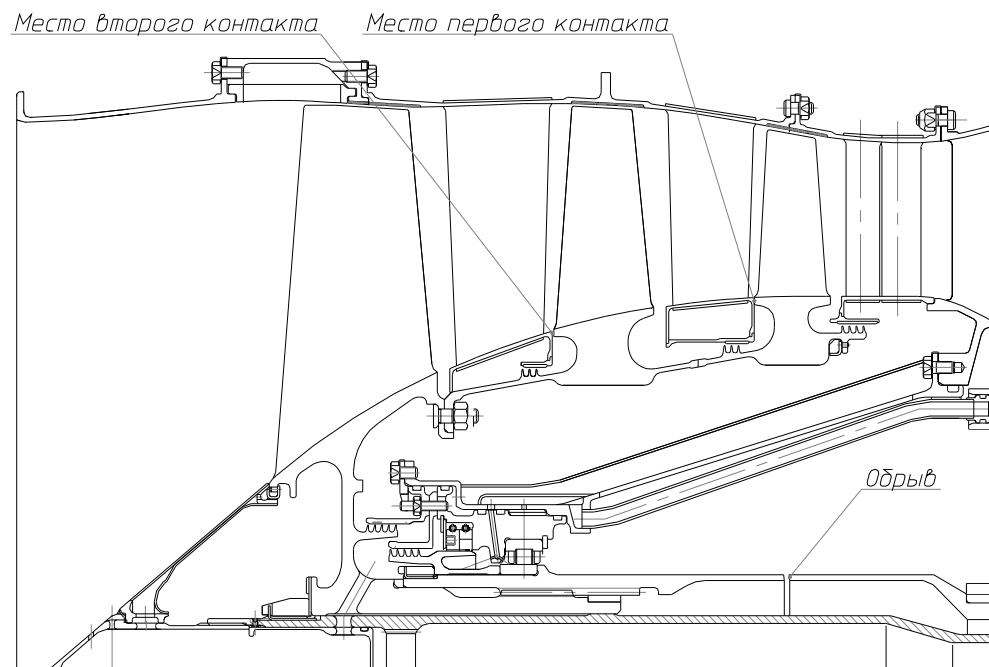
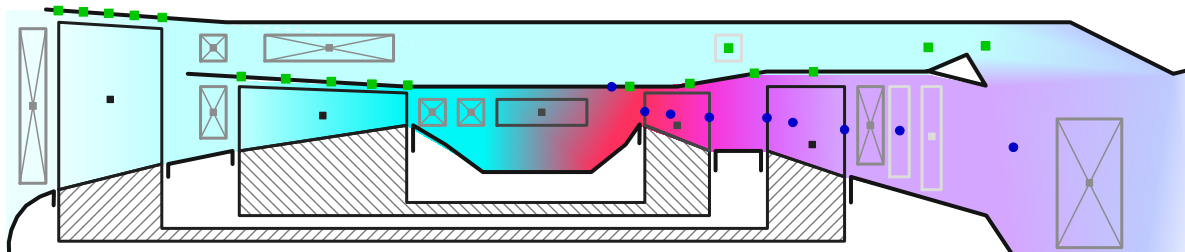
Приемистость при 20-кратном уровне «зашумленности» управляемого параметра





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

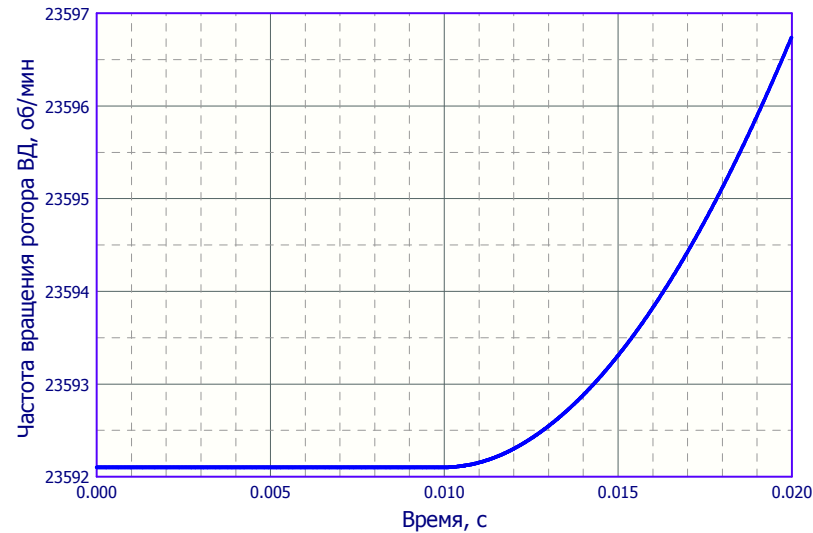
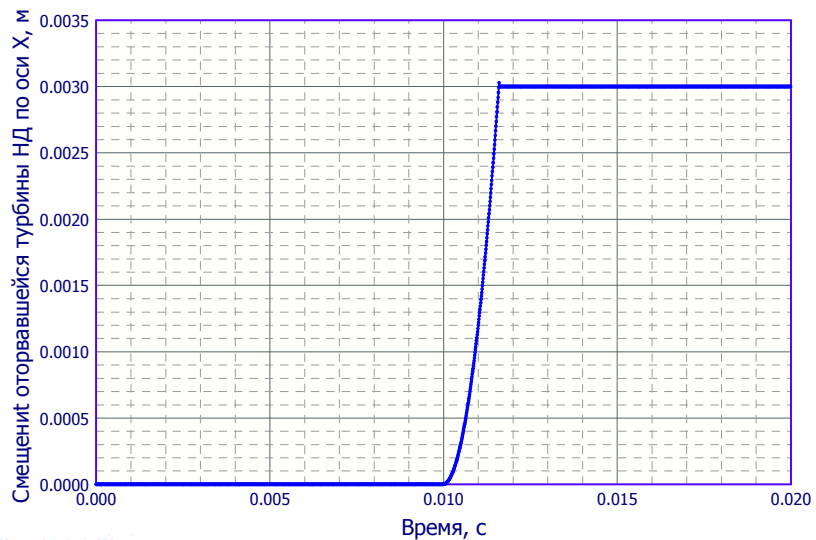
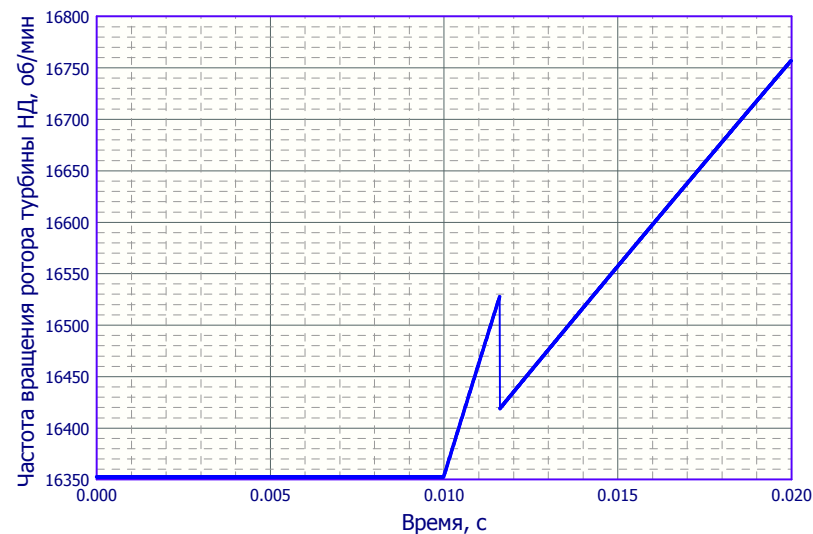
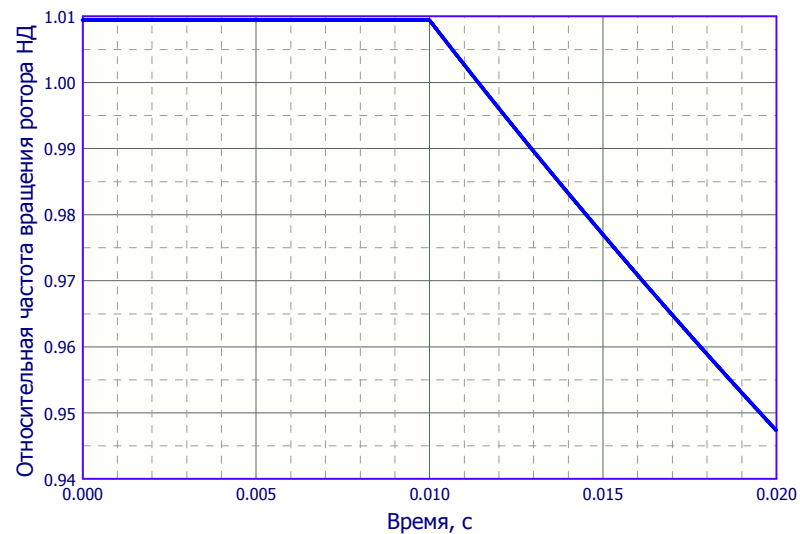
## Исследование динамики двигателя при разрушении вала турбины





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование динамики двигателя при разрушении вала турбины

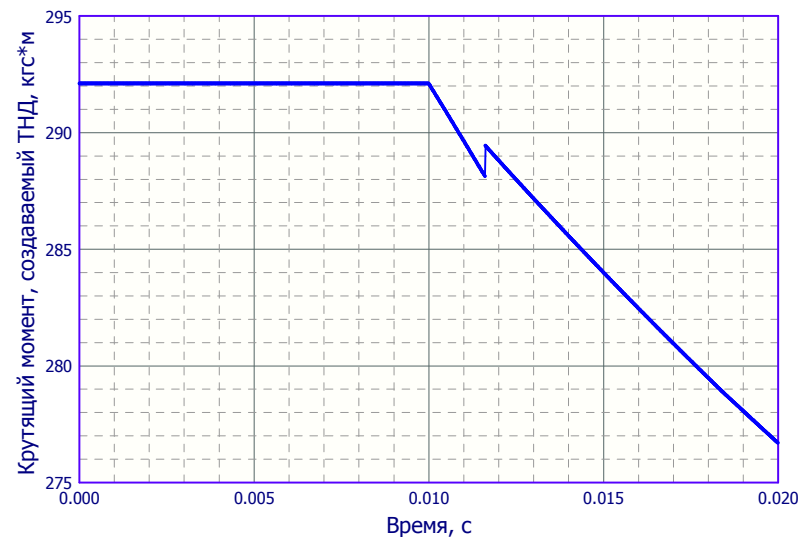
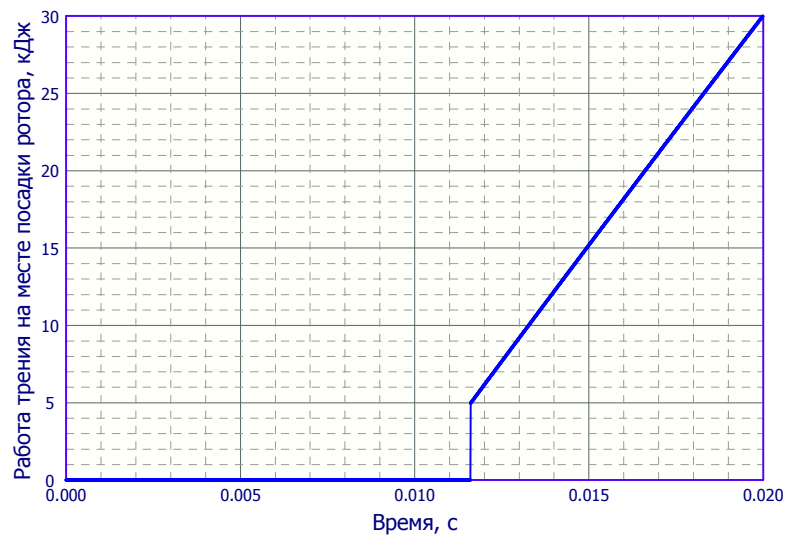
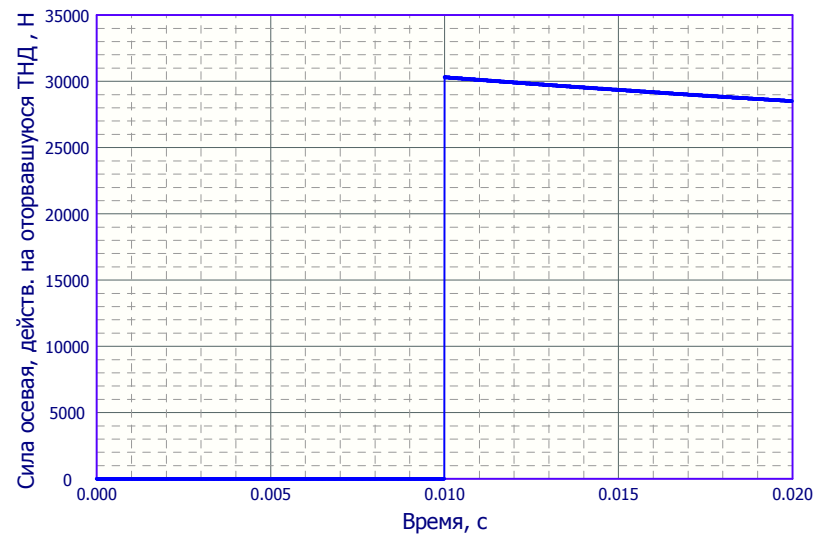
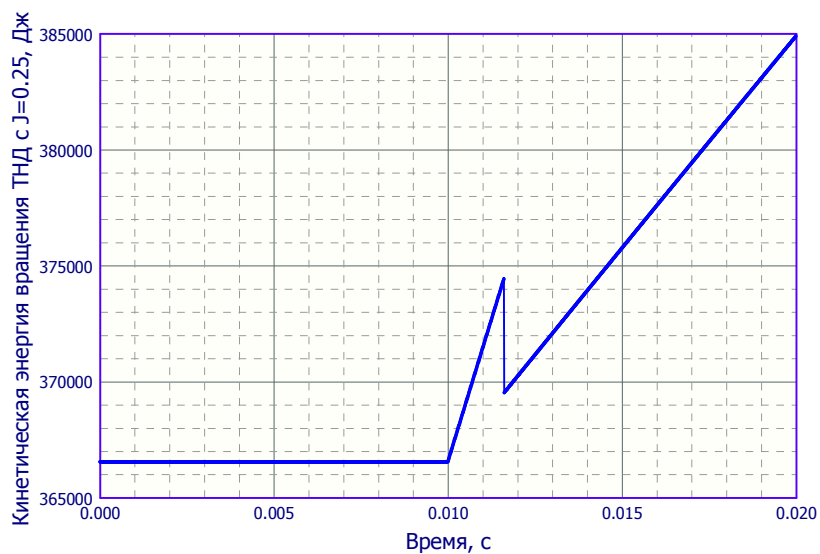


**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

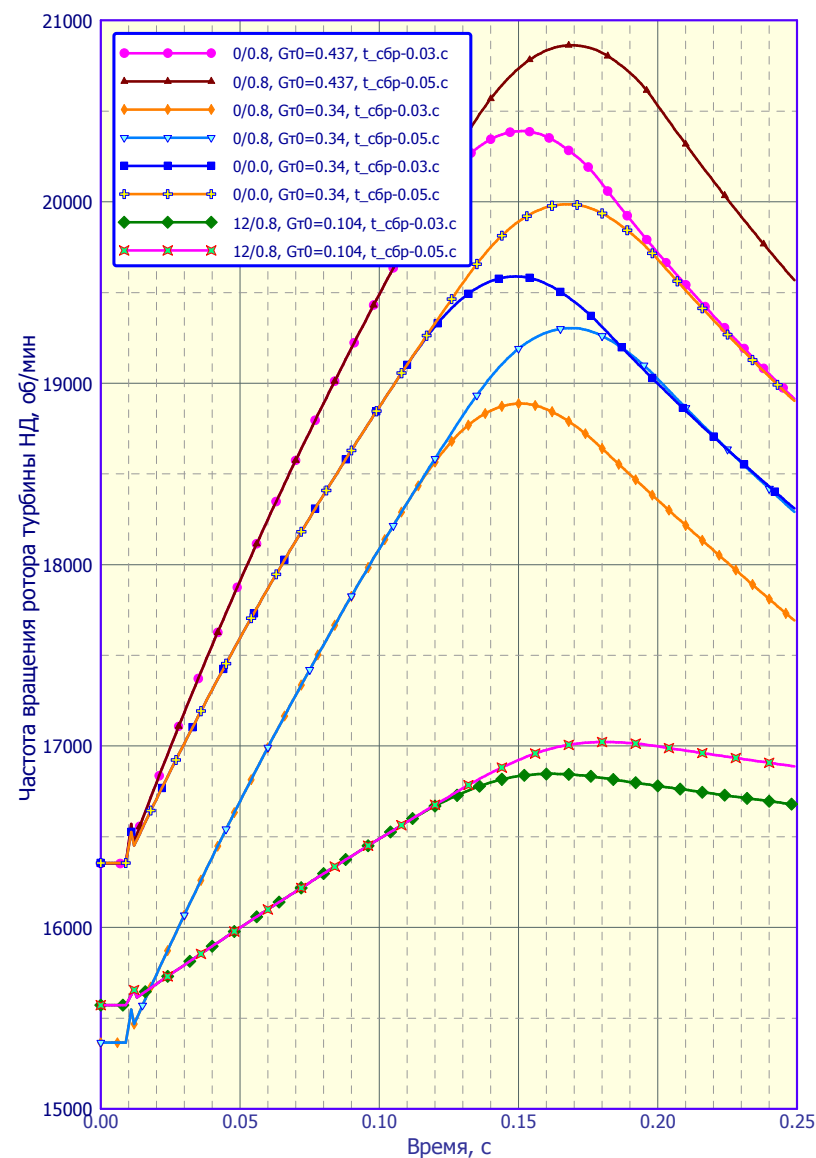
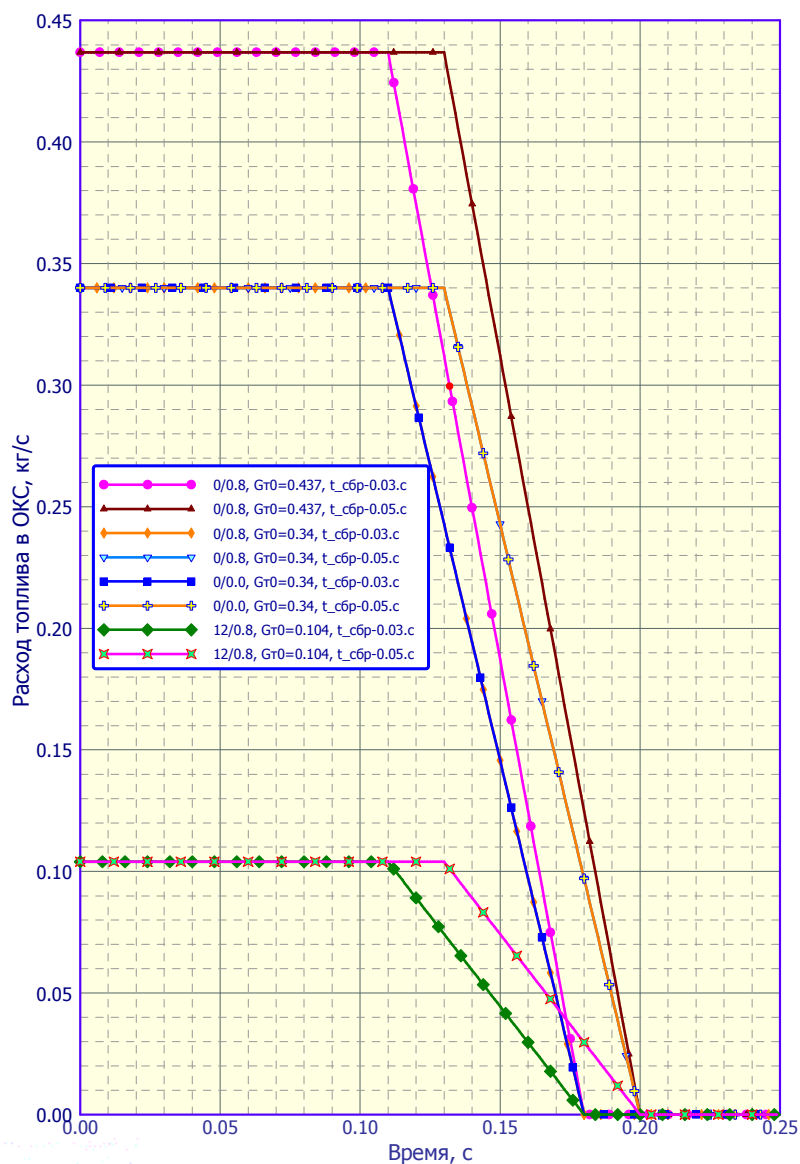
## Исследование динамики двигателя при разрушении вала турбины





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

# Исследование динамики двигателя при разрушении вала турбины

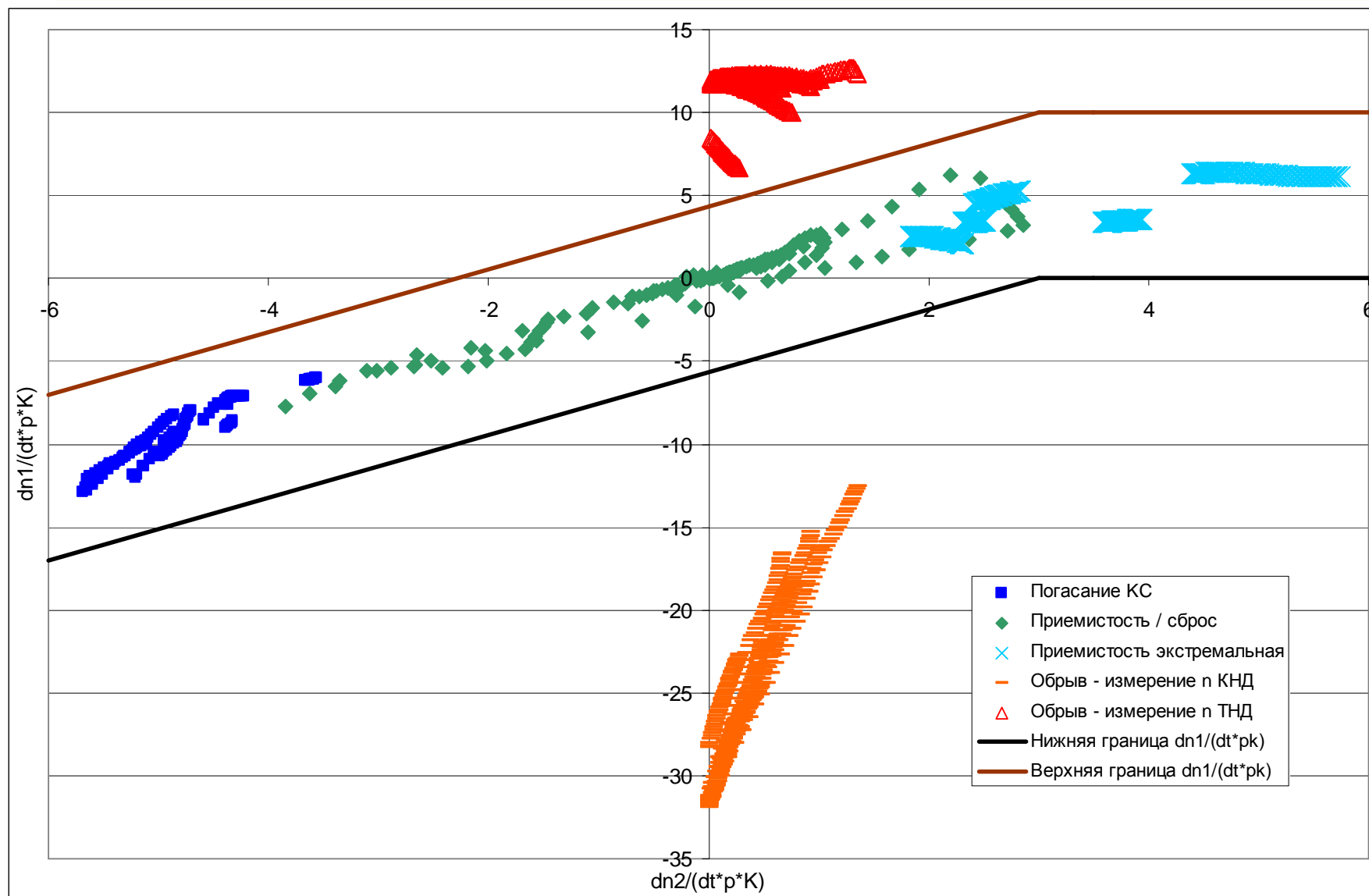


**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ



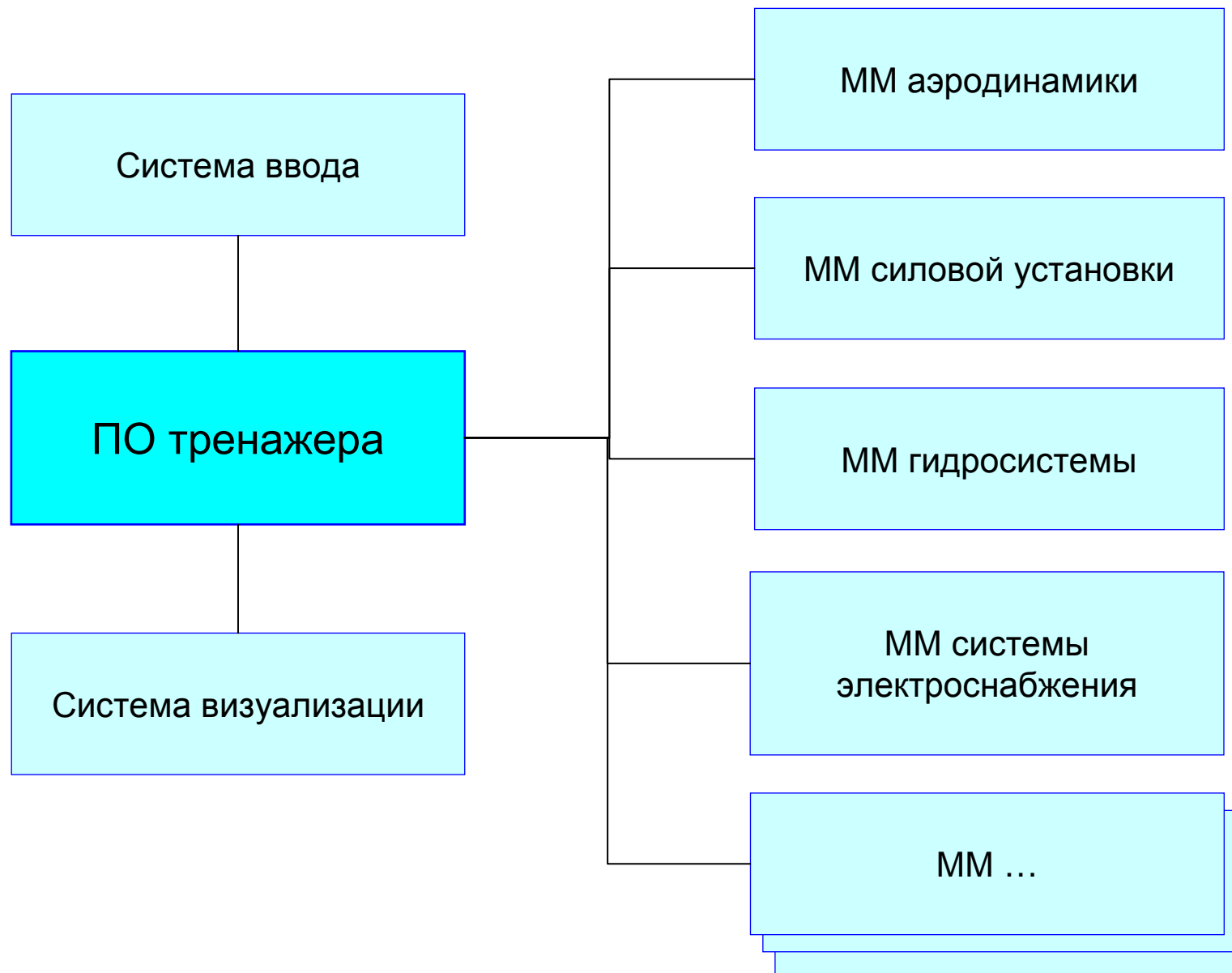
ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**

## Исследование динамики двигателя при разрушении вала турбины

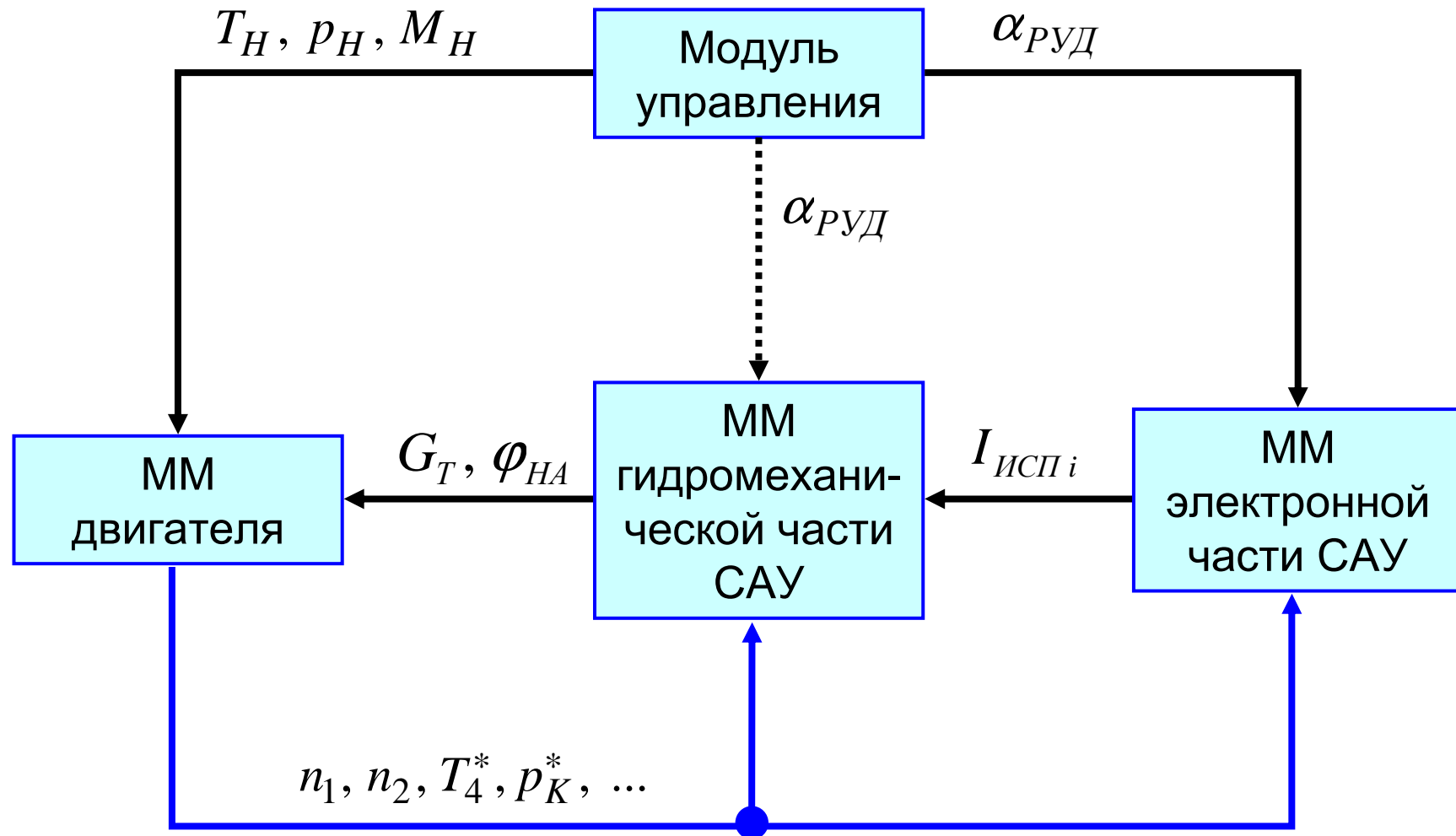




# Математическое моделирование ГТД для комплексных тренажеров ЛА



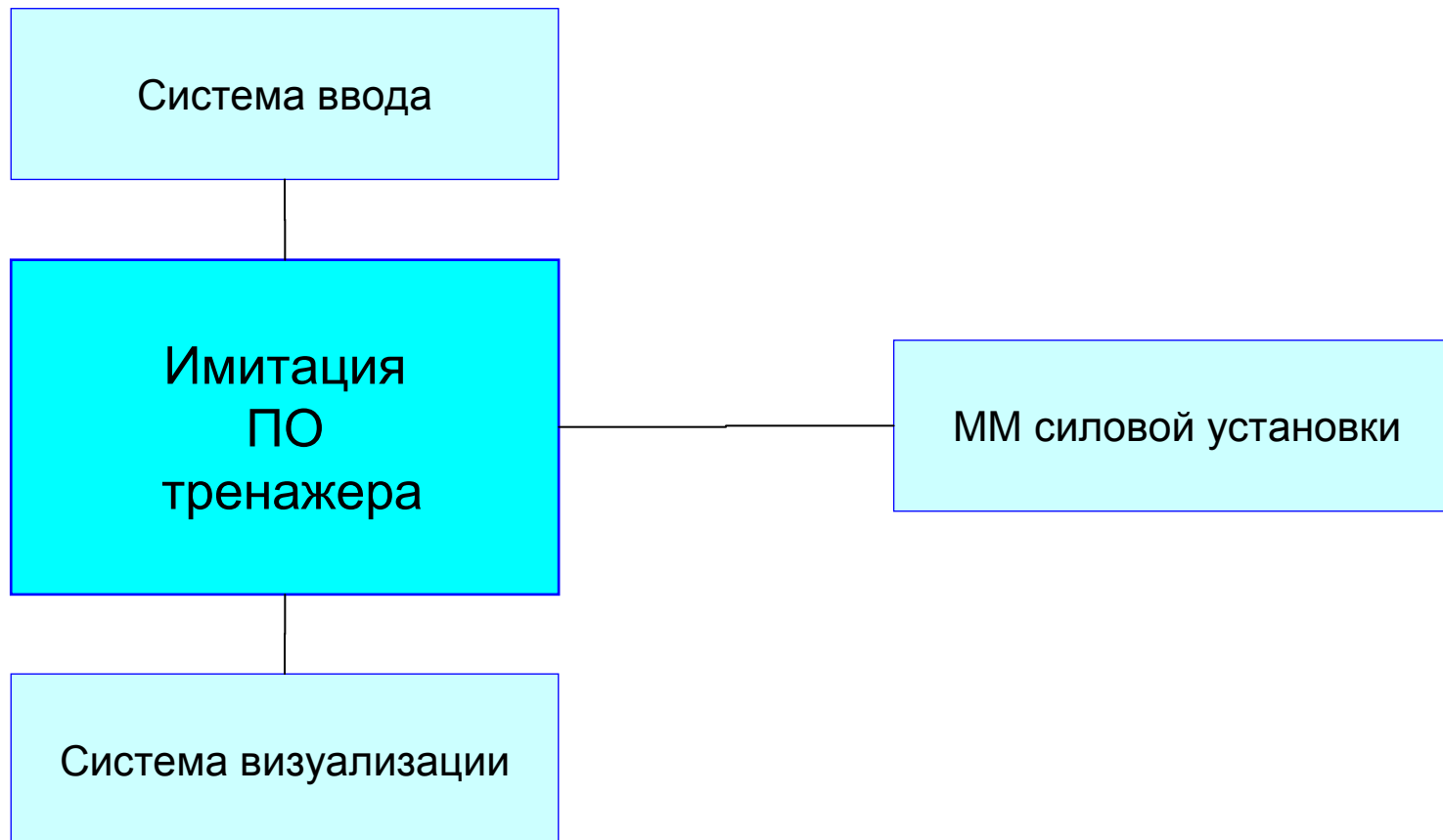
# Математическое моделирование ГТД для комплексных тренажеров ЛА



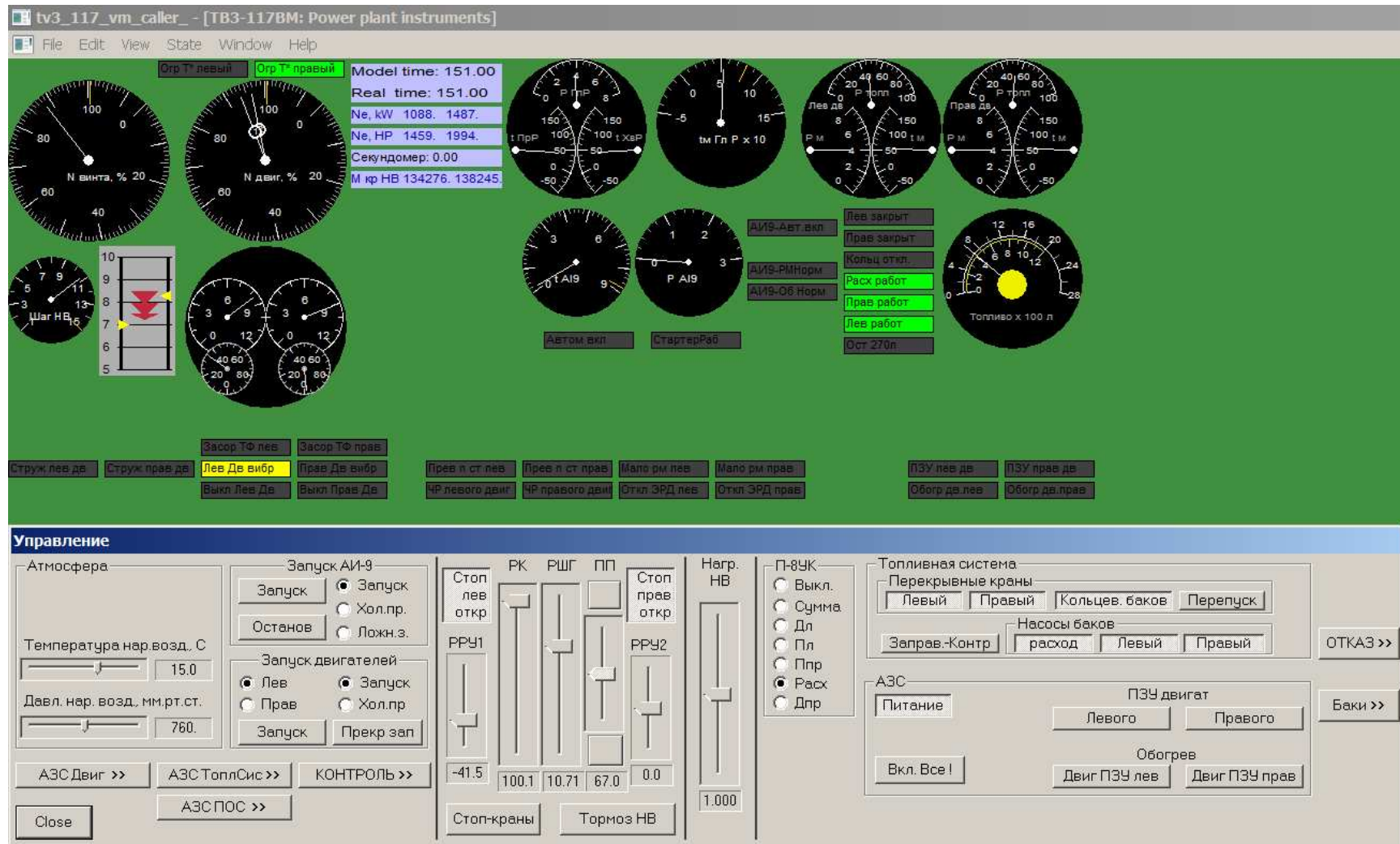
# Математическое моделирование ГТД для комплексных тренажеров ЛА



# Математическое моделирование ГТД для комплексных тренажеров ЛА



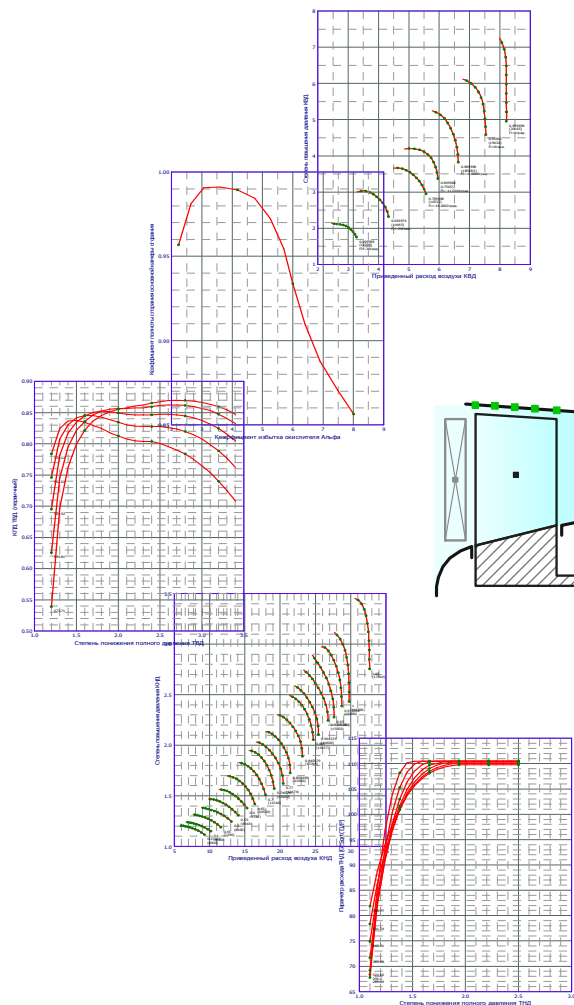
## Интерфейс программы – имитатора ПО тренажера



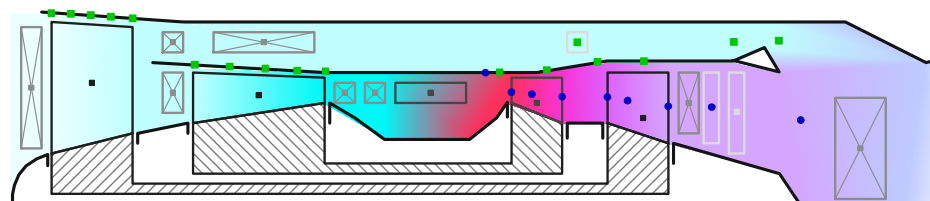


# Термодинамическая ММ ГТД

## Характеристики элементов



ММ



## Система нелинейных алгебраических уравнений

$$\Phi(\vec{a}, \vec{u}) = 0$$

$$\vec{a} = (\Pi_{КНД}, \Pi_{КВД}, \pi_{ТВД}^*, \pi_{ТНД}^*, m, G_T, F_{кр})$$

$$\vec{u} = (T_B^*, p_B^*, d, n_1, n_2)$$

$$\Phi_1 = \frac{G_{ОКС} - G_{САТВД}}{G_{САТВД}} = 0;$$

$$\Phi_2 = \frac{G_{ТВД} - G_{САТНД}}{G_{САТНД}} = 0;$$

$$\Phi_3 = \frac{P_{см II} - P_{см I}}{P_{см I}} = 0;$$

$$\Phi_4 = \frac{G_\phi - G_{кр}}{G_\phi} = 0.$$

$$\Phi_5 = \frac{G_{\phi I} - G_{\phi КВД}}{G_{\phi КВД}} = 0.$$

$$\Phi_6 = \frac{N_{ТВД} \cdot \eta_{мехВД} - N_{КВД}}{N_{ТВД}} = 0.$$

$$\Phi_7 = \frac{N_{ТНД} \cdot \eta_{мехНД} - N_{КНД}}{N_{ТНД}} = 0.$$

## Особенности ввода исходных данных и вывода результатов

### Ввод

- Поддержка большого числа форм представления характеристик, принятых в отрасли;
- Графическое отображение характеристик и результатов обращения к ним;
- Интерактивная коррекция табличных зависимостей;
- Встроенный первичный контроль корректности исходных данных;
- Возможность импорта настроек задач в текстовом формате.

### Вывод

- Графические зависимости на модели страницы:
  - рабочие точки (линии) на характеристиках элементов;
  - зависимости одного параметра от другого;
- Табличные зависимости в текстовые файлы;
- Всплывающие подсказки по значениям параметров;
- Списки параметров в диалоговом режиме;
- Графические и табличные зависимости через буфер обмена.

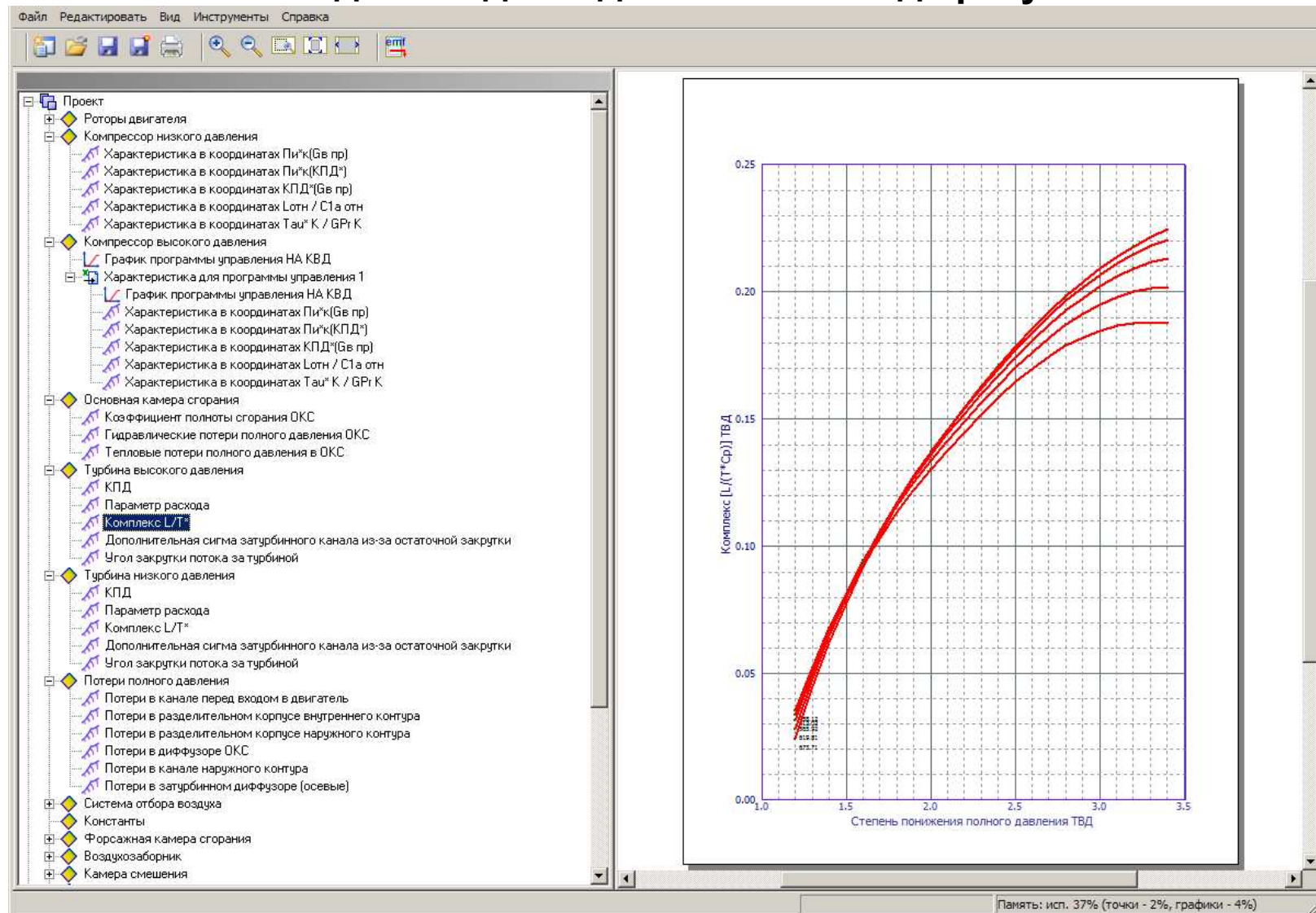


## Программный комплекс ThermoGTE

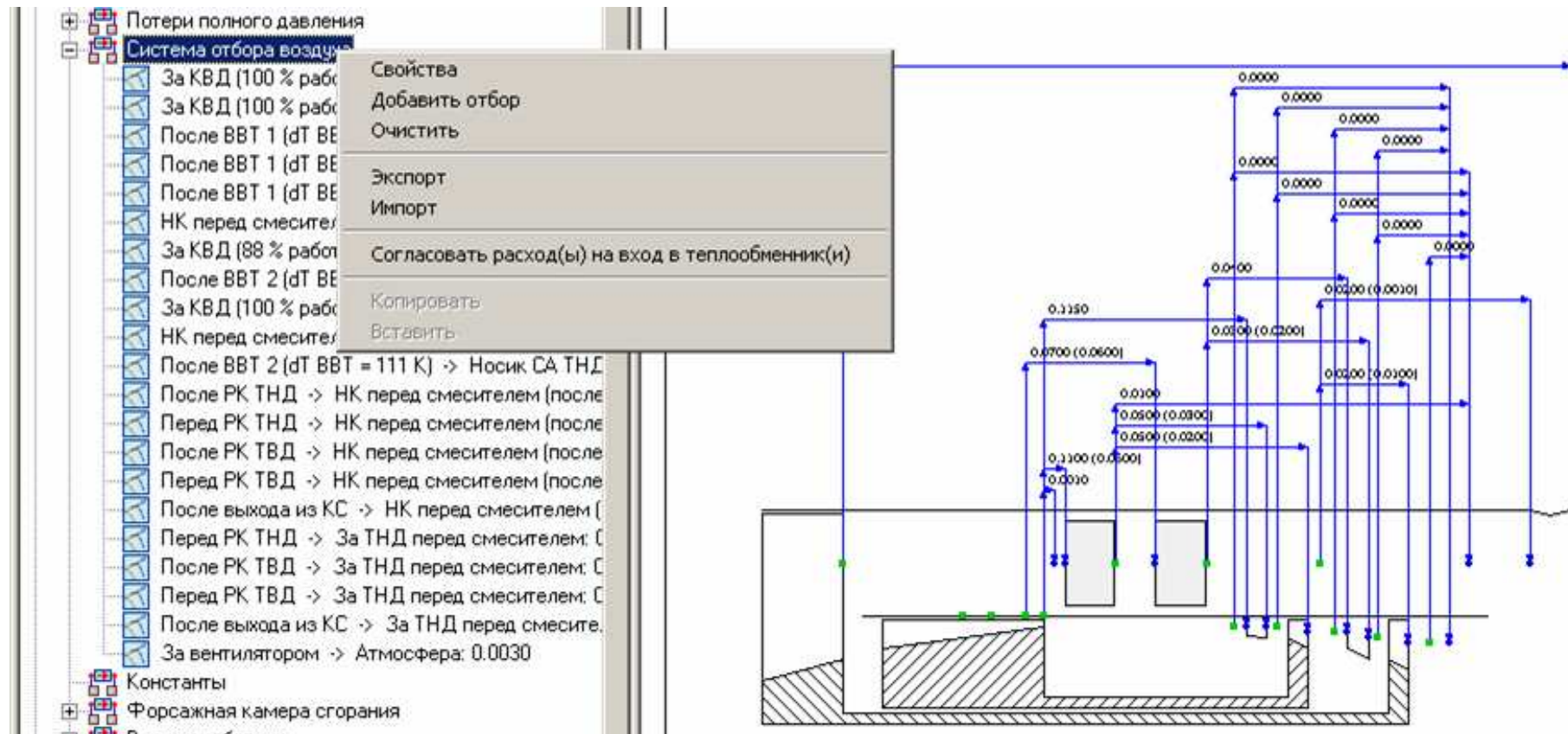
## Особенности ввода исходных данных и вывода результатов

# Программный комплекс ThermoGTE

## Особенности ввода исходных данных и вывода результатов



## Особенности ввода исходных данных и вывода результатов



# Программный комплекс ThermoGTE

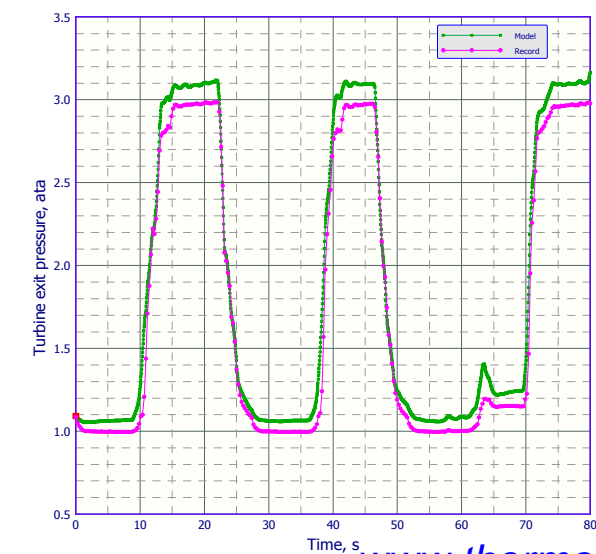
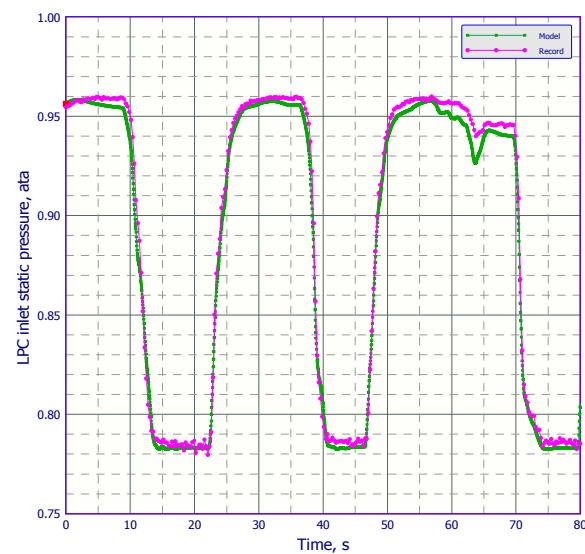
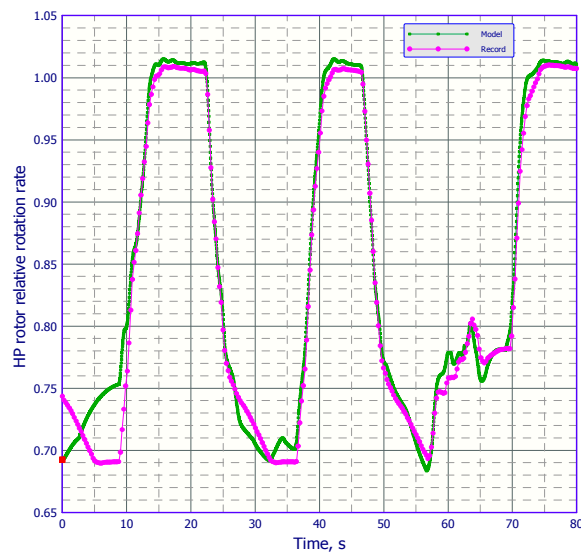
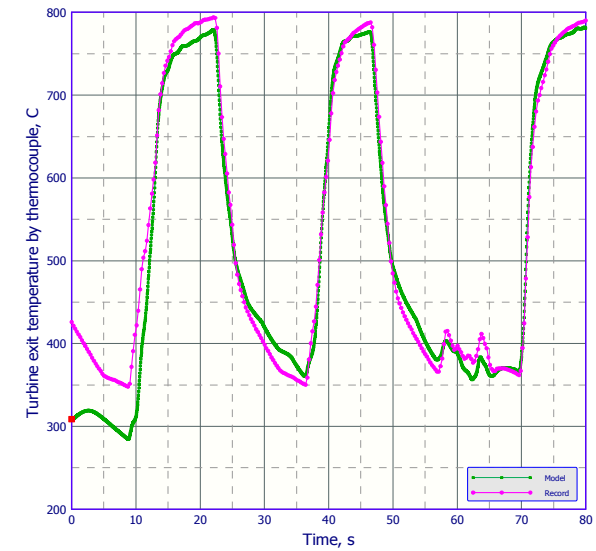
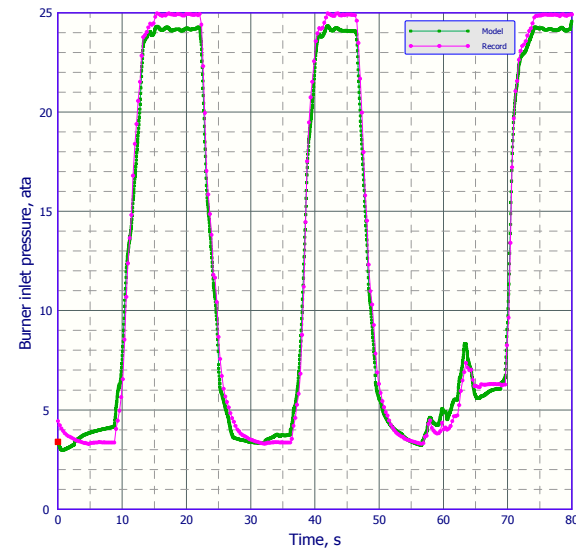
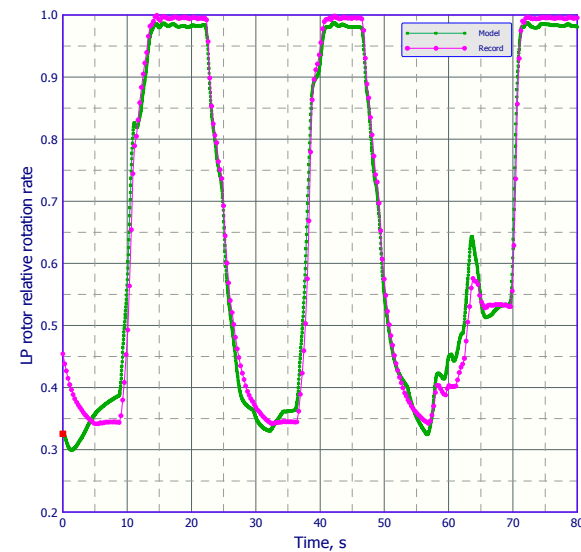
Единый формат представления характеристик элементов двигателя  
для решения широкого круга исследовательских задач





# Программный комплекс ThermoGTE

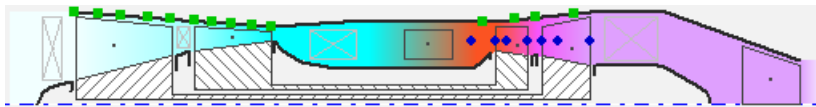
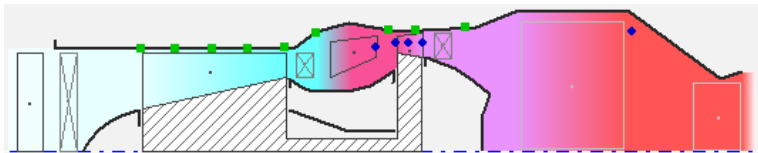
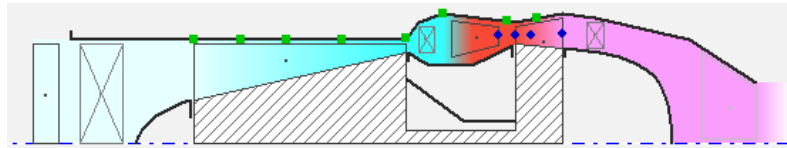
## Комплексная модель «Двигатель+САУ» - оценка точности расчета



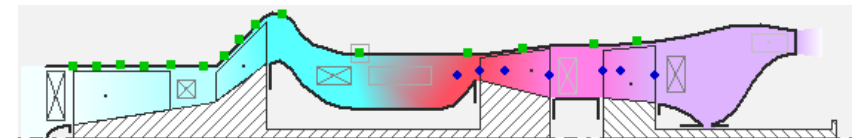
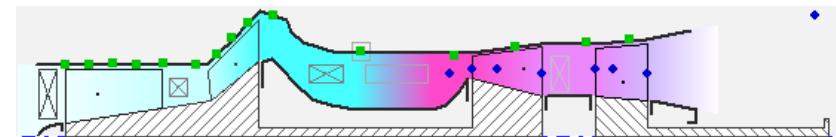
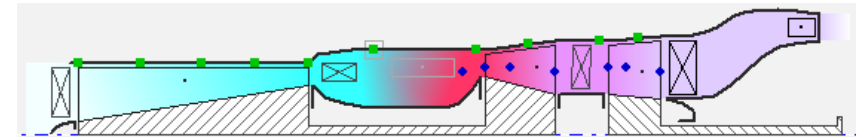
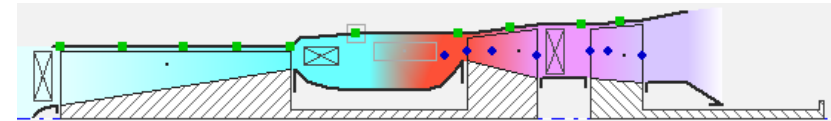
# Программный комплекс ThermoGTE

## Интерактивное редактирование схемы двигателя: библиотека готовых схем

### Турбореактивные двигатели



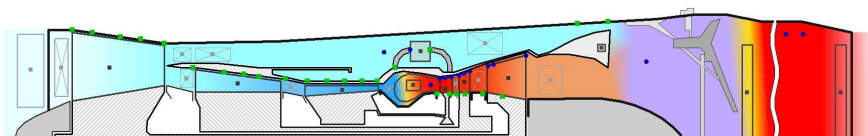
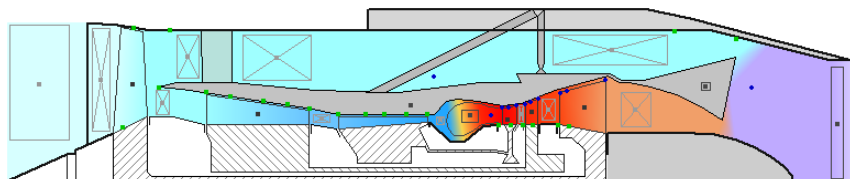
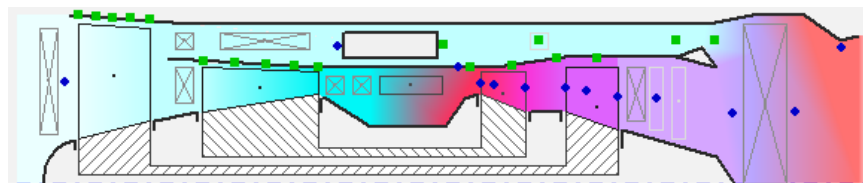
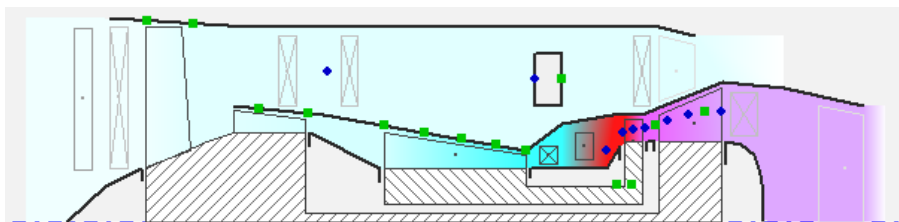
### Турбовальные двигатели со свободной турбиной



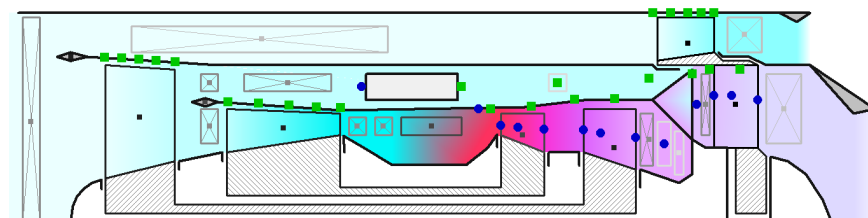
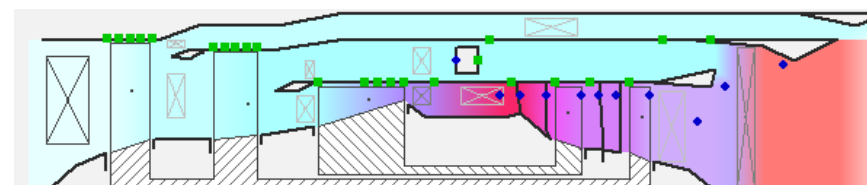
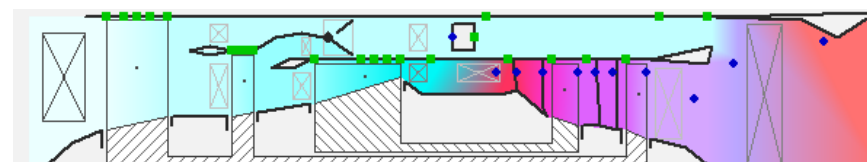
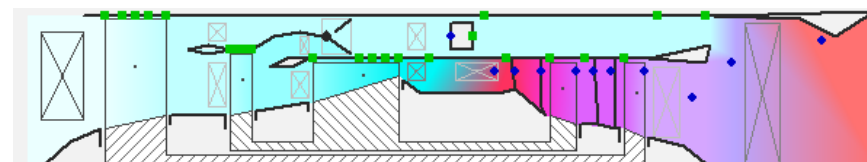
# Программный комплекс ThermoGTE

## Интерактивное редактирование схемы двигателя: библиотека готовых схем

### Турбореактивные двухконтурные двигатели



### Турбореактивные двигатели сложных схем

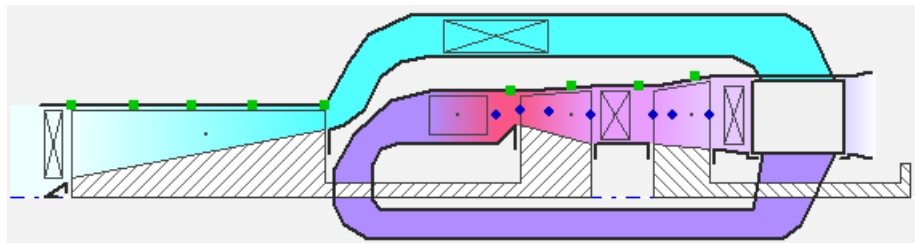
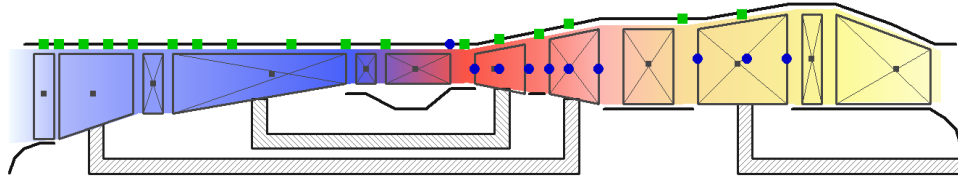


[www.thermogte.ru](http://www.thermogte.ru)

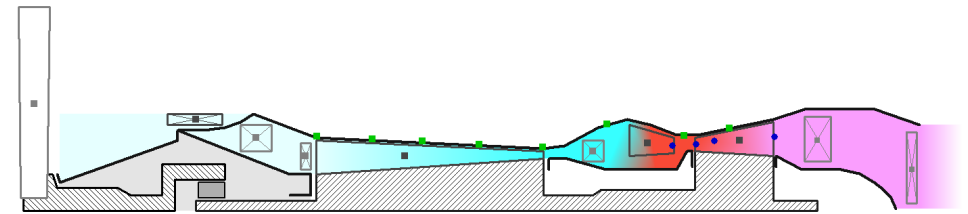


## Интерактивное редактирование схемы двигателя: библиотека готовых схем

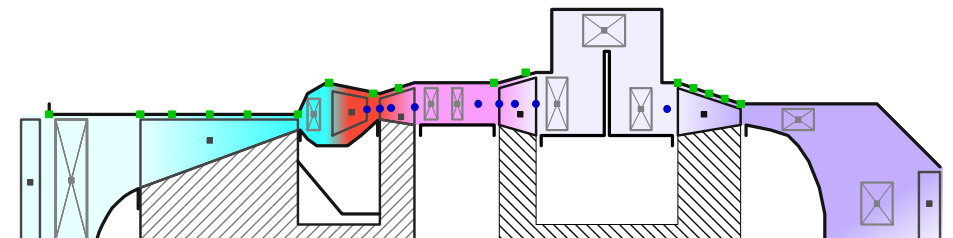
Турбовальные двигатели со  
свободной турбиной



Турбовинтовые двигатели



ГТУ с ОГГ





ОБЪЕДИНЕННАЯ ПРОМЫШЛЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
**ОБОРОНПРОМ**



**Спасибо за внимание!**



**САТУРН**  
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ