

Применение технологии цифрового двойника при проектировании двигателя ПД-8.

Заместитель главного конструктора
Бадерников Артем Витальевич

Начальник бригады КО СИА
Добровольский Илья Сергеевич

21.04.2023

Цифровой двойник как объект

- Набор мультидисциплинарных математических моделей с высоким уровнем точности предсказания работы реального двигателя

Цифровой двойник как методология

- **Смена методологии:** «разработка и доводка двигателя с помощью *software*» → «разработка двигателя в цифре как *software*»

Цифровой двойник как технология

- Сквозное **безбарьерное** цифровое проектирование с широкой автоматизацией работ

Цифровой двойник как стратегическое направление

- **Технология-драйвер**, обеспечивающая смысл и синергетический эффект от цифровой трансформации

Необходимое условие появления цифрового двойника – привязка математической модели к **конкретному физическому объекту** через данные из производства

Объём и детализация математических моделей цифрового двойника **определяется исходя из целей** его создания.



Выпущен регламент по управлению матрицами требований/соответствия

В регламенте установлены:

- форма заполнения матриц
- порядок изменения матриц на основные модули и системы ГТД ПД-8
- порядок обмена матрицами между предприятиями

Уникальные идентификаторы требований привязаны к функциональным номерам ДСЕ – это позволяет удобно управлять требованиями без привязки к чертёжным номерам.

Узел или система	Наименование параметра	Чертежный номер	Значение по чертежу, единицы измерения	Допуск
Двигатель	Монтажные зазоры всех ЛУ			
	Экспериментальные расходные характеристики АПЗ, РЛ ТВД, трубопроводов			
Компрессор высокого давления	Радиальные зазоры над рабочими лопатками		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
	Углы установок лопаток НА		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
Камера сгорания	Углы конусов распыла топлива форсунок		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
	Приведенные расходы топлива		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
Турбина высокого давления	Величины радиальных зазоров в ЛУ		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
	Зазор над рабочей лопаткой ТВД		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
Система смазки и суфлирования	Расходы масла через форсунки		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
	Расходы масла через маслоагрегат		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$
Выходное устройство	Обмеры тела центрального		$P_1 \dots P_n$, мм	$D_1 \dots D_n$

1. Выпущен регламент по получению данных производства из сборочного цеха.

Регламент подразумевает создание **перечня контролируемых параметров в виде таблицы, которая наполняется паспортными параметрами сборочным цехом из дела изделия, а также дополнительными параметрами по запросу конструктора.**

2. В таблице содержатся паспортные параметры включающие в себя радиальные зазоры над лопатками, зазоры в ЛУ, расходы воздуха, масла и топлива, углы установок лопаток и углы конусов распыла топлива.

3. УПРАВЛЕНИЕ РАСЧЁТНЫМИ ДАННЫМИ В CML-BENCH

Навигация Только выбранные 0 Фильтры 0

- [-] пд-8
 - [+] 1. Аванпроект
 - [+] 2. Эскизный проект
 - [+] 3. Технический проект
 - [+] 4. Выпуск РКД
 - [+] 5. Изготовление и испытания ОО
 - [+] ГГ 105-01 сб.2
 - Данные испытаний
 - [+] Данные производства
 - Данные производства ГГ105-01 сб2
 - [+] Расчетные данные
 - [+] ГГ 105-01 сб.2
 - [+] Выходное устройство
 - [+] 0001-458-105-02-LCS-001_3D_газодинамический расчет ВУ_КТ419
 - [+] 0001-458-105-02-STP-001
 - Субмодель (4)
 - [+] 0002-458-105-02-DMU-001
 - 0001-458-105-02-PRT-001
 - [+] Интегральные модели
 - [+] 0001-499-105-12-LCS-001 2D расчет НДС ГГ
 - [+] 0004-422-105-07-LCS-001 2D нестационарный тепло-гидравлический расчет 105ГГ-01 сб. 2
 - [+] 0001-422-105-07-STP-001 2D нестационарный тепло-гидравлический расчет 105ГГ-01 сб. 2
 - [+] 0005-422-105-07-LCS-002
 - [+] 0006-422-105-07-LCS-003
 - [+] 0003-422-105-07-STP-003 Валидация 2D тепло-гидр. модели 105ГГ-01 сб. 2
 - Субмодель (1)
 - [+] 0007-413-105-01-LCS-004
 - [+] 0001-413-105-01-STP-001
 - [+] 0008-413-105-01-LCS-005
 - [+] 0001-413-105-01-STP-001
 - [+] Компрессор
 - [+] 0001-401-105-02-LCS-001 3D аэродинамический расчет КВД на к.т. 187
 - [+] 0002-499-105-02-LCS-002 Расширенная 3D аэродинамическая модель КВД
 - [+] КС
 - [+] 0001-405-105-02-LCS-001 Газодинамический 3D расчет КС с горением и сопряженным те
 - 0001-405-105-02-STP-001

- Выполняется размещение в системе CML-Bench расчетных моделей уже проведенных и будущих испытаний.
- Модели размещаются отдельно по каждому двигателю/газогенератору
- Разработана инструкция по размещению и согласованию моделей в системе
- На данный момент загружено в систему 746 субмоделей, 12 составных субмоделей и 32 геометрических модели

ДОЧЕРНИЕ ОБЪЕКТЫ		
12	32	0
0	0	746

4. РАСЧЁТЫ ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ НА ЭТАПЕ СЕРТИФИКАЦИИ ДВИГАТЕЛЯ ПД-8 КАК ДОПОЛНЕНИЯ К СЕРТИФИКАЦИОННЫМ ОТЧЁТАМ

№	Наименование математической модели	Пункт Certif. Базиса/ номер Certif. отчёта	Основные цели расчётов
1	Модель теплового состояния КНД, КВД, ТВД и ТНД	33.21/№015 «Охлаждение двигателя»	Определить температуры наружных поверхностей двигателя и его компонентов
2	Модель заброса крупной птицы в условиях установки	33.76/ №069 «Попадание отдельной крупной птицы»	Определить нагрузки на основные элементы, степень деформации лопаток вентилятора, способность удержания лопаток в пазах.
3	Заброс средней и мелкой птицы в условиях двигателя	33.76/ №070 «Попадание мелких и средних стайных птиц»	
4	Обрыв лопатки вентилятора в условиях установки	33.94I(a)/№011 «Удержание лопаток вентилятора»	Показать способность корпуса вентилятора к удержанию оторвавшейся лопатки.
5	Заброс крупного града в условиях двигателя	33.78/ № 073 «Попадание крупного града»	Продемонстрировать, что попадание больших градин не должно вызывать недопустимого механического повреждения.
6	Динамическая модель двигателя	33.94/ № 011 «Удержание лопаток вентилятора»	Определить величины дисбалансов при разрушении лопатки вентилятора Показать, что обеспечивается непробиваемость корпуса двигателя; Определить уровни нагрузок на стыки корпусов и узлы крепления двигателя.

Включение расчётов в сертификационные отчёты сегодня закладывает базу для «цифровой сертификации» в будущем

2. ЦИФРОВОЙ ДВОЙНИК ДВИГАТЕЛЯ ПД-8

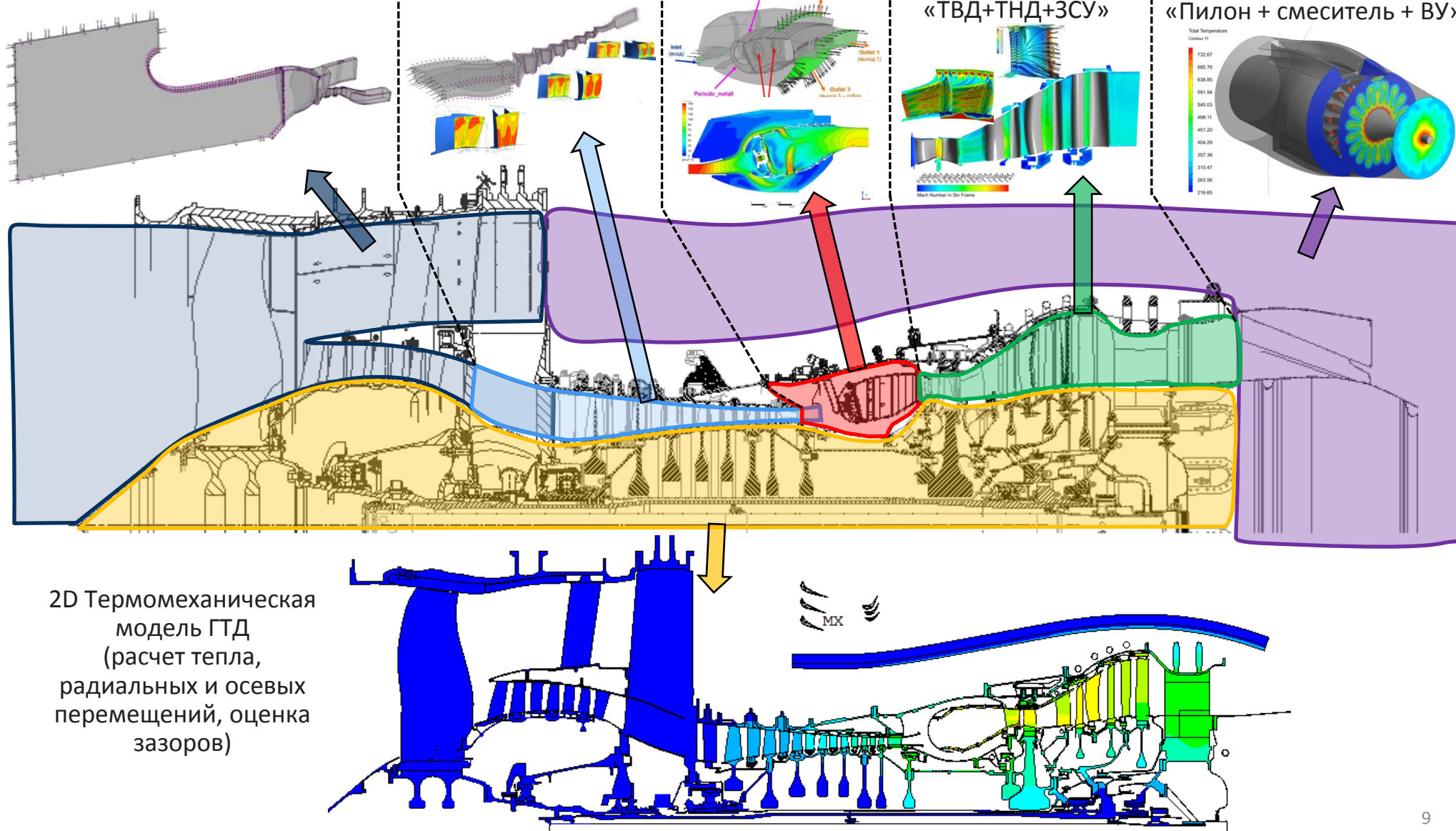
Математическая модель
«Входное устройство + КНД»

Математическая
модель «КВД»

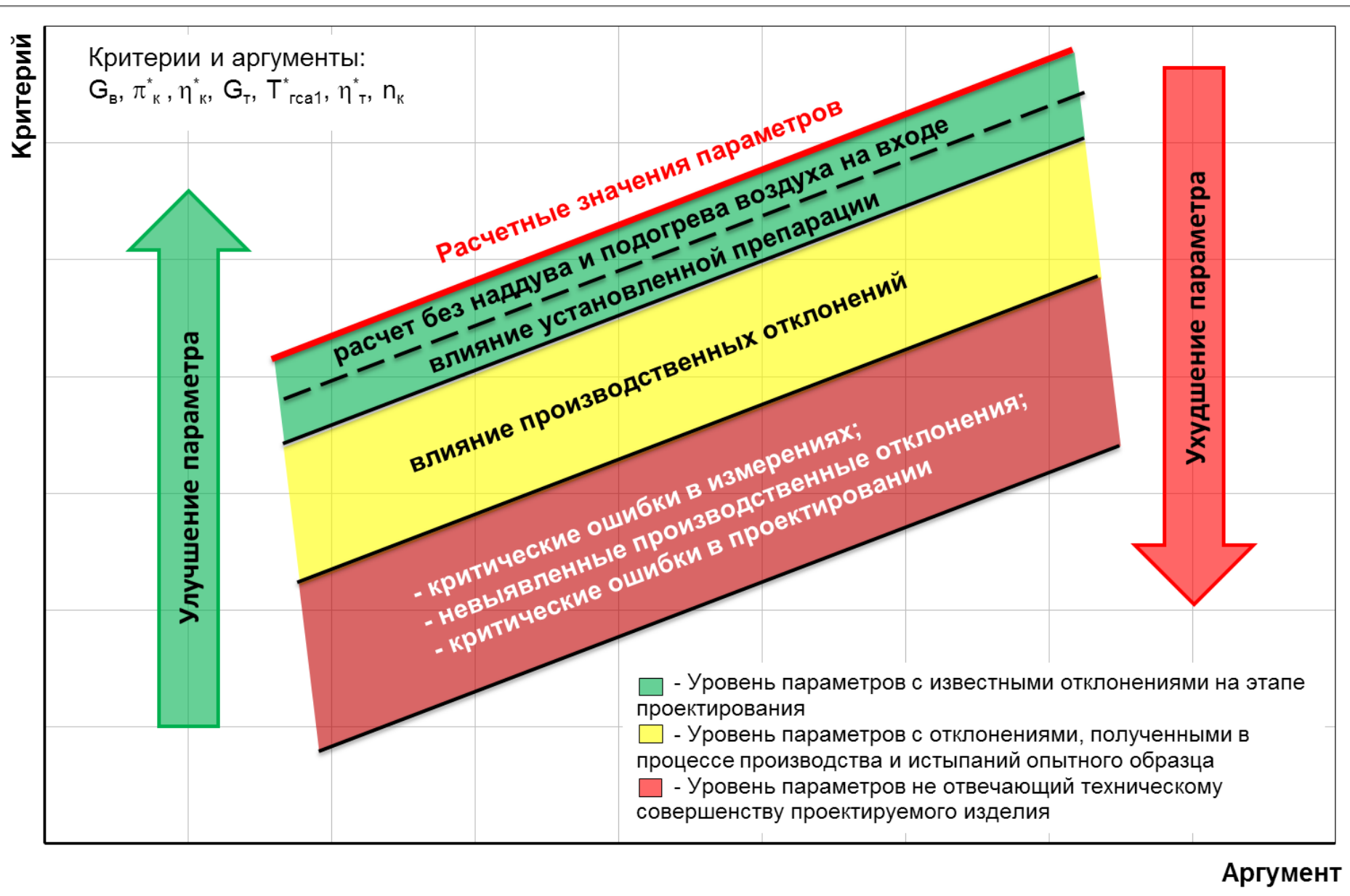
Математическая
модель «КС»

Математическая
модель
«ТВД+ТНД+ЗСУ»

Математическая
модель
«Пилон + смеситель + ВУ»



УПРАВЛЕНИЕ ПАРАМЕРАМИ ИЗДЕЛИЯ НА ЭТАПЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ



6. ПЕРЕЧЕНЬ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА 105ГГ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАСЧЁТНОЙ ЦЕПОЧКЕ (1/3)

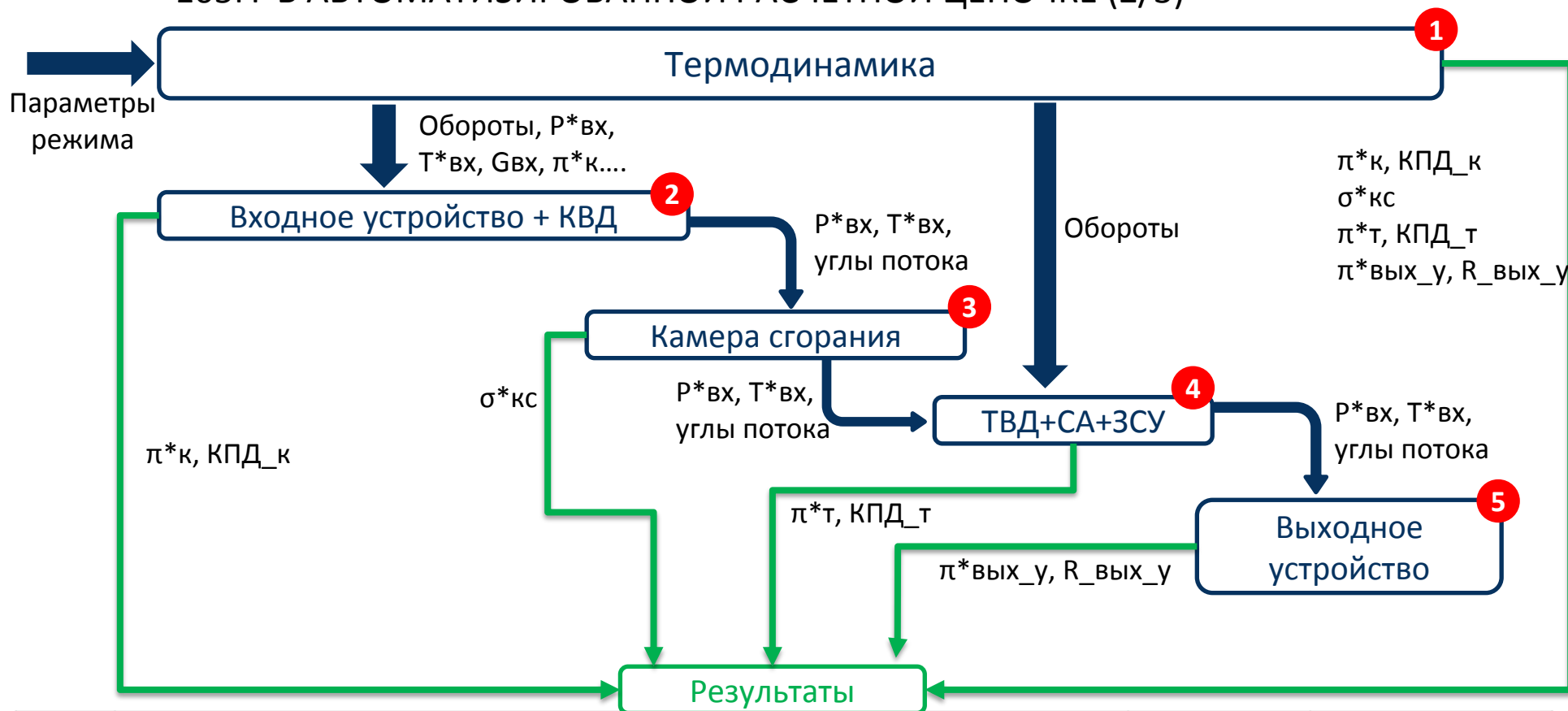
№ п.п.	Наименование	«Как спроектировано»	Программное обеспечение
Расчетные модели ГГ (интегральные)			
1	Термодинамическая модель 105ГГ в ThermoGTE	•	ThermoGTE
3	2D прочностная модель расчета перемещений	•	2D Ansys
4	2D-теплогидравлическая модель	•	2D Ansys
Расчетные модели узлов этапа ТП и РКД			
5	3D-аэродинамическая модель КВД	•	3D Ansys CFX
6	3D-аэродинамическая модель ТВД	•	3D Ansys CFX
7	3D-аэродинамическая модель КС с горением	•	3D Ansys CFX
8	3D аэродинамическая модель выходного устройства	•	3D Ansys CFX

Реализовано в
расчётной цепочке

В разработке

Математические модели реализованные в расчётной цепочке являются базовыми для дальнейших расчётов пневмосхемы, осевых усилий, теплогидравлики и перемещений на этапе «как спроектировано»

6. СХЕМА СВЯЗИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА 105ГГ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАСЧЁТНОЙ ЦЕПОЧКЕ (2/3)



№	Наименование модели	ПО	Среда
1	Термодинамическая модель	ThermoGTE	ПК
2	Аэродинамическая модель «Входное устройство+КВД»	ANSYS CFX	Кластер
3	Аэродинамическая модель «Камера сгорания»	ANSYS CFX	Кластер
4	Аэродинамическая модель «ТВД, спрямляющего аппарата и ЗСУ»	ANSYS CFX	Кластер
5	Аэродинамическая модель «Выходное устройство»	ANSYS CFX	Кластер

6. ОБЩИЙ ВИД АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ РАСЧЁТНОЙ ЦЕПОЧКИ 105ГГ В СРЕДЕ PSEVEN (3/3)

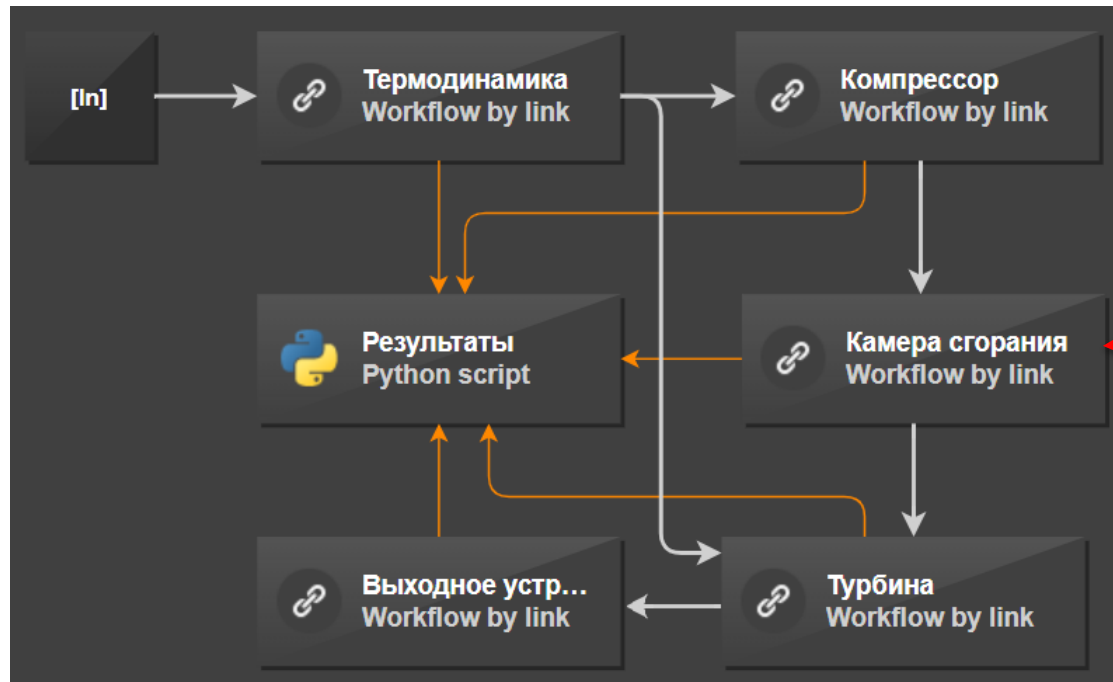
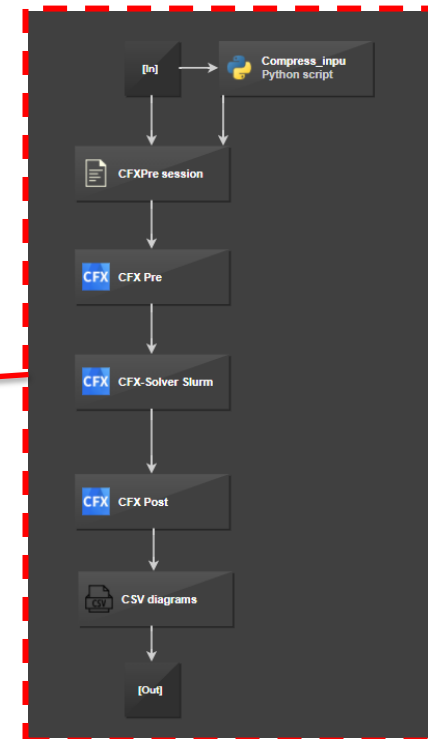


Схема блоков в pSeven Enterprise v2022.04.13



Структура блока

- АРЦ состоит из композитных блоков, которые содержат внутри себя расчетные цепочки отдельных узлов.
- Для соединения блоков используются связи, которые передают логическую и численную информацию без промежуточных файлов.
- АРЦ выполняется полностью в автоматизированном режиме.

Этап	Ключевое действие
Датафикация физического мира	Перевод функциональных возможностей и активов в сеть
Софтверизация бизнеса	Оцифровывание цепочек принятия решений
Создание потока данных	Создание интерфейсов API для получения данных
Полная регистрация данных	Регистрация живых данных во всей их полноте
Применение алгоритмов машинного обучения	Координирование и оптимизация

1. Целеполагание должно идти от потребностей конкретного проекта. Создание ЦД конкретного объекта – не самоцель, а инструмент решения конкретных проблем.
2. Не пытаться перепрыгивать через этапы. Они могут идти параллельно, один из этапов должен быть главным.

1. Организована система управления требованиями с помощью матриц соответствия на уровне разработки двигателя, систем и узлов, основных деталей ПД-8
2. Обеспечены в цифровом двойнике ПД-8 принципы «как спроектировано», «как изготовлено», «как испытано»
3. Организована структурированная система хранения математических моделей двигателя с привязкой к отчётной документации
4. Проведена валидация математических моделей цифрового двойника в обеспечение испытаний двигателя ПД-8
5. Создана автоматизированная расчётная цепочка взаимосвязанных математических моделей двигателя и его составных частей

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

