

Международный технологический форум "Инновации. Технологии. Производство".

Круглый стол «Технологии создания цифровых двойников ГТД
на основных этапах жизненного цикла»

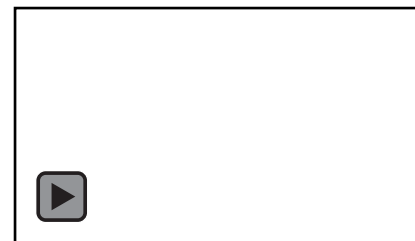
21 апреля 2023 года, г. Рыбинск

Опыт разработки и внедрения экспериментальной технологии цифрового двойника на примере морского ГТД

А.А. Себелев

О докладчике:

к.т.н., руководитель отдела перспективных разработок в двигателестроении



Разработка экспериментальной технологии создания цифрового двойника морского газотурбинного двигателя



Заказчик: ПАО «ОДК-Сатурн»

Отрасль: Двигателестроение

Год: 2021-2023 гг.

Проблематика проекта:

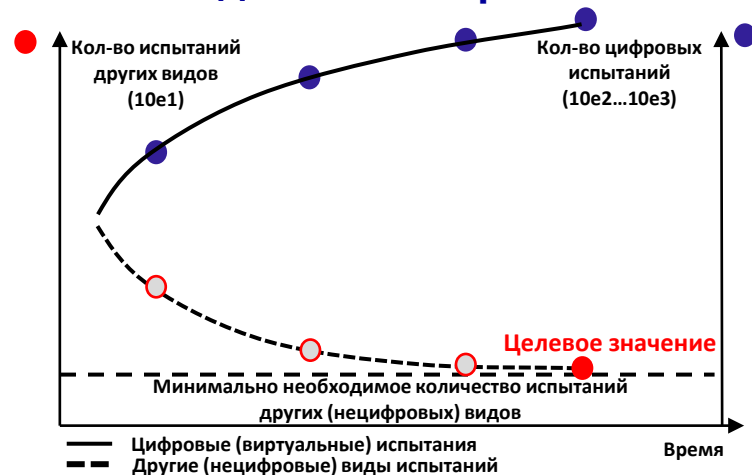
- Разработка **экспериментальной технологии** создания цифрового двойника (ЦД) морского газотурбинного двигателя;
- Развитие **подходов системного инжиниринга** на основе моделей в обеспечение устойчивого развития корабельных газотурбинных двигателей и агрегатов;
- Создание **Цифрового Двойника** на базе Цифровой платформы (ЦП) CML-Bench с целью анализа поведения изделия.

Ожидаемые результаты

- Созданная под нужды ПАО «ОДК-Сатурн» **единая среда**, обеспечивающая прозрачность процессов проектирования, а также автоматизацию расчетных процессов **на базе Цифровой платформы CML-Bench™**;
- Привлечение кадров различных подразделений ПАО «ОДК-Сатурн» с **целью автоматизации внутренних процессов** согласования и обмена данными смежными подразделениями;
- Разработанная **система управления требованиями**;
- Расчетные **модели технологических процессов** механической обработки, изготовления заготовок (литье и ОМД), термической обработки.
- **Разработанный цифровой двойник морского ГТД**;
- **Сокращение сроков проектирования** модернизированного изделия и его доводки до целевых показателей;
- **Повышение эффективности работы** инженерных кадров и развитие компетенции.

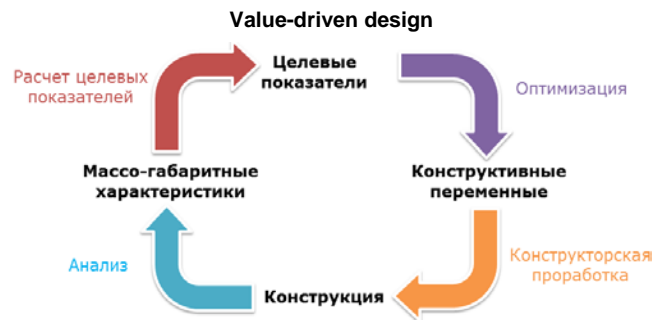
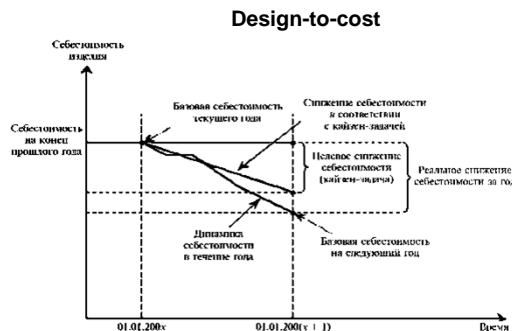


Мотивация создания цифровых двойников в двигателестроении



Как компании отвечают текущим вызовам?

- 42% укладываются в бюджет;
- 54% укладываются в срок;
- 17% достигают заданных характеристик



Структура СЧ НИР

Экспериментальная технология создания цифрового двойника морского газотурбинного двигателя

Доработка платформы

Проведение аудита бизнес-процессов

Разработка инструментов обработки и преобразования данных

Автоматизация процессов проводимых в ходе проектирования

Настройка взаимодействия платформы с системами ПАО «ОДК-Сатурн»

Разработка удобного интерфейса взаимодействия пользователей с системой

Наполнение ЦД

Газодинамические расчеты

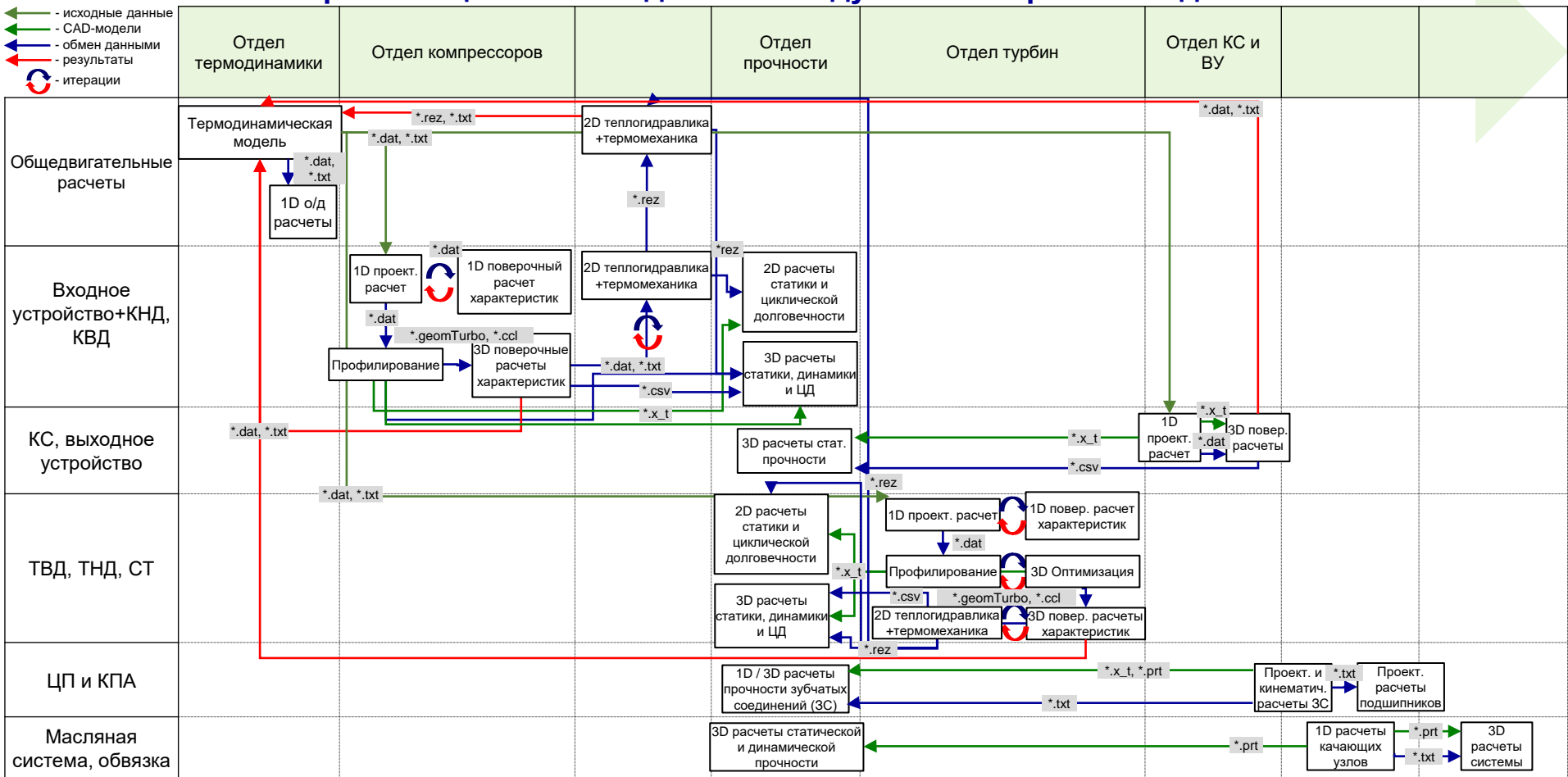
Виртуальные испытания механизмов

Газодинамическая оптимизация

Гидравлические расчеты

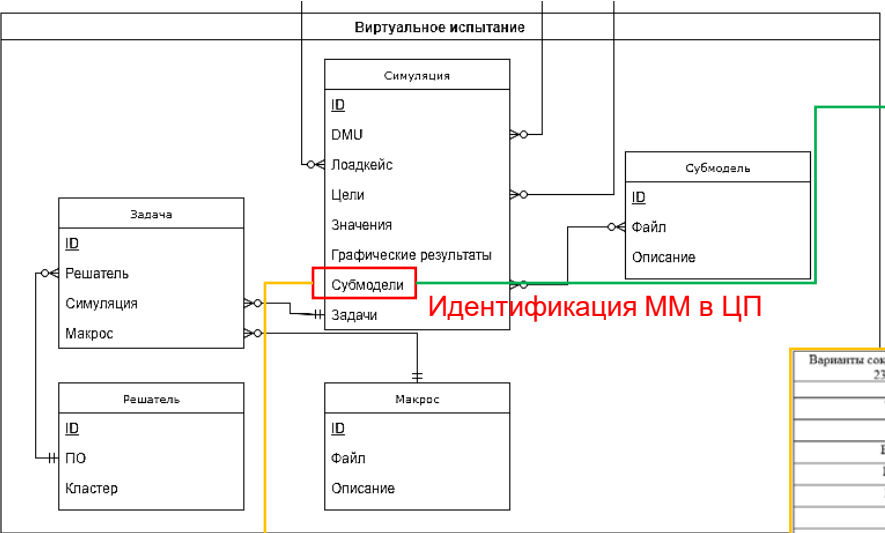
Моделирование технологических процессов производства

Формализация потоков данных между компьютерными моделями



Формализация потоков данных между компьютерными моделями

1. Фиксация правил именования геометрических примитивов в компьютерных моделях
2. Фиксация правил именования физических величин, передаваемых между компьютерными моделями
3. Фиксация форматов обмена данными между компьютерными моделями



Идентификация ММ в ЦП

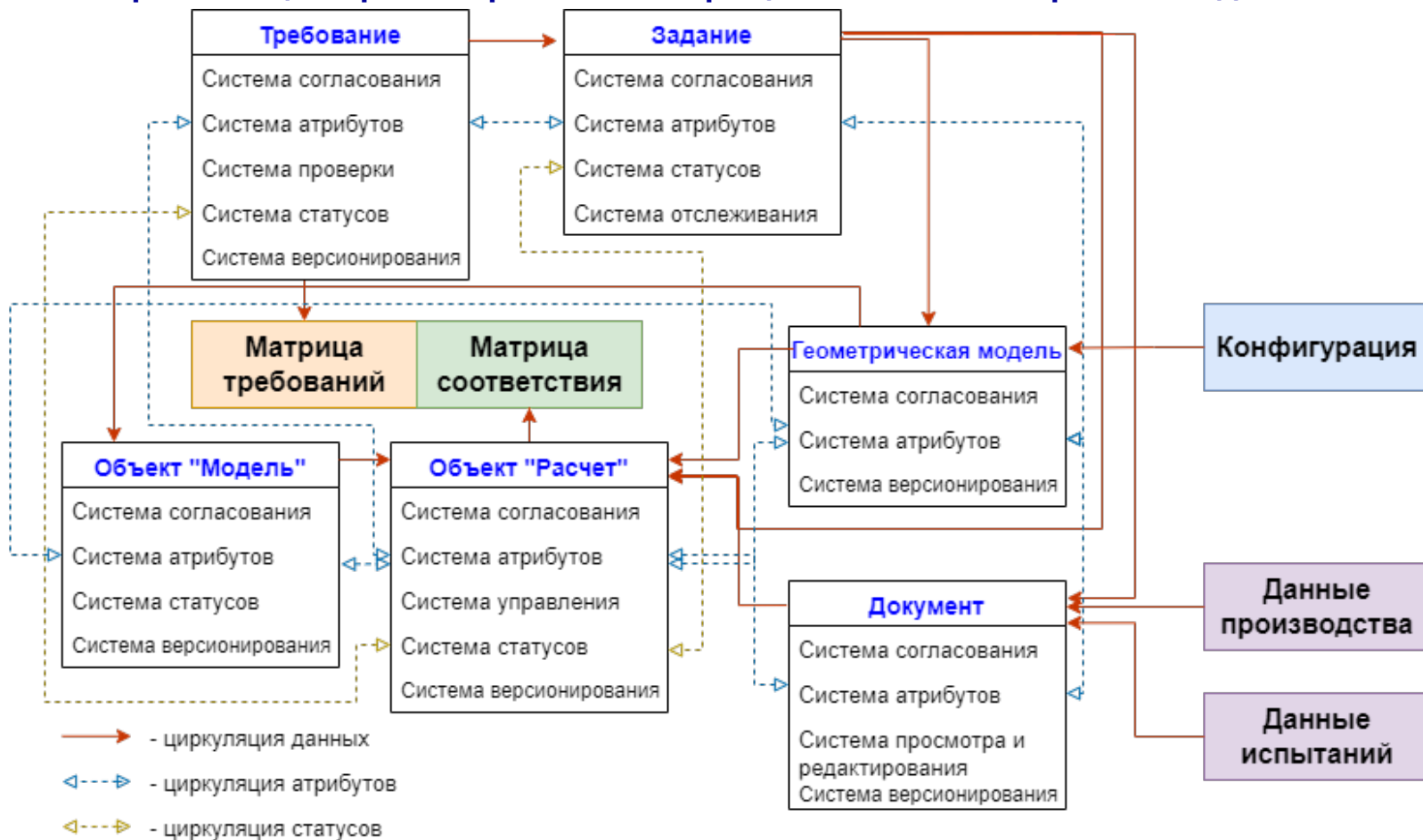
Минимальные требования к составу ММ

Программная компонента	Минимально необходимый набор Субмоделей	Опциональные Субмодели
ANSYS Workbench Meshing	.wbpz (архив проекта) .wbjn, .py (макрос)	.x_t, .prt или подобные (геометрические модели)
Numeca Autogrid	.trb (архив проекта), .py (макрос)	.geomTurbo (геометрия в нативном формате)
ANSYS CFX-Pre	.meshdat / .mshdb / .cfx5 / .cgns (сеточные модели) .ccl (ГУ и настройки модели) .pre (макрос)	-
ANSYS CFX-Solver	.def (файл проекта)	.res (исходные данные для интерполяции) .par (данные для распараллеливания) .ccl (настройки расчета)
ANSYS CFD-Post	.res (результаты расчета) .cse (макрос)	.cst (настройки состояния)

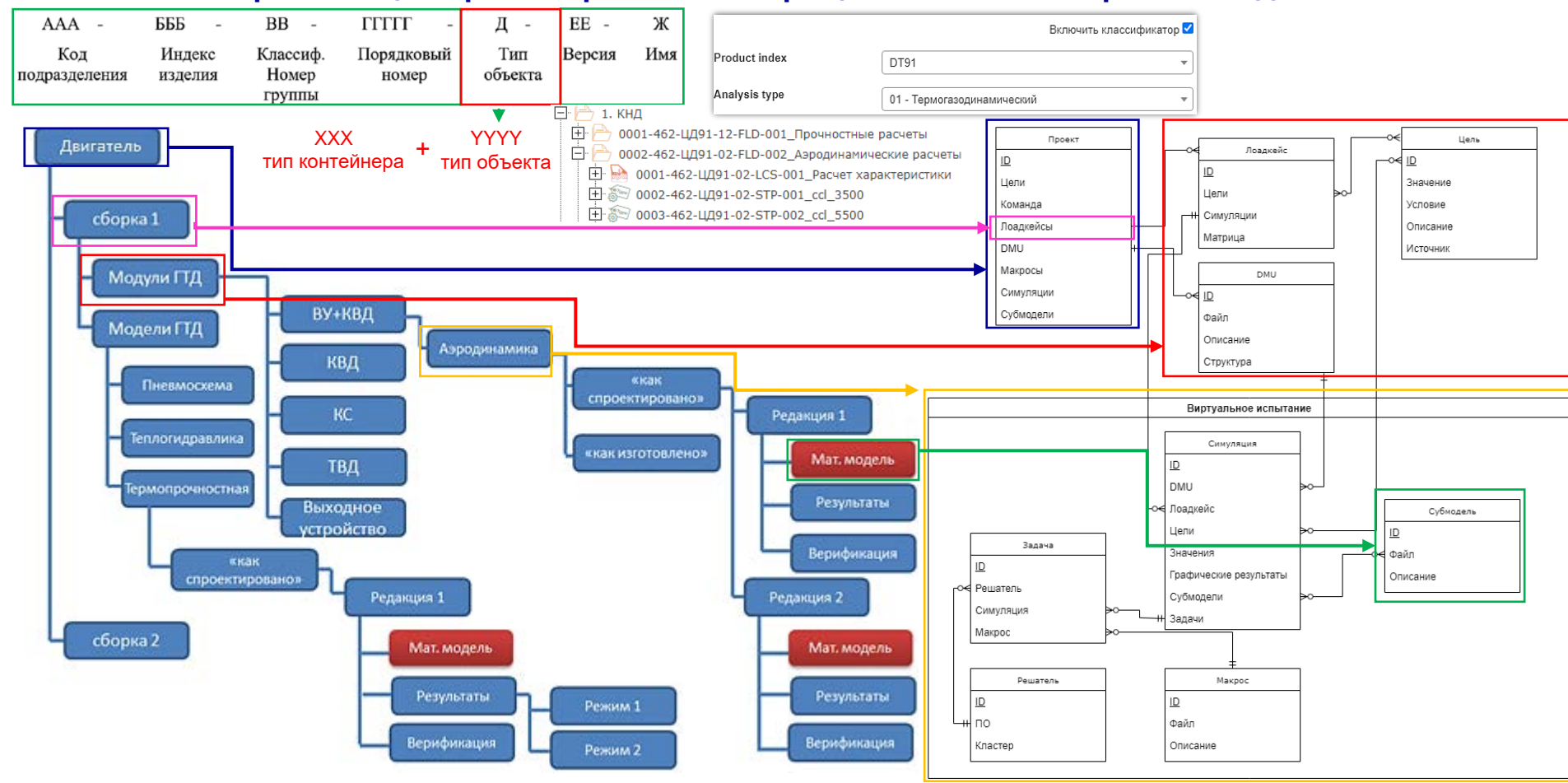
Требования к системе именования

Варианты сокращений по ГОСТ 23851-79	Расшифровка	Варианты сокращений по ГОСТ 23851-79	Расшифровка
1	2	INT	Входное устройство
TWS	Аппарат закрутки	AXC	Осевой компрессор
STR	Обтекатель переходного канала	CC	Центробежный компрессор
EXCN	Затрубный обтекатель	AXCC	Осесцентробежный компрессор
RFLP	Створки реверса	LPC	Компрессор низкого давления
ISTR	Входной сточный узел	IPC	Компрессор среднего давления
IGV	Входной направляющий аппарат	HPC	Компрессор высокого давления
SGV	Направляющий аппарат	CSH	Камера сгорания
RB	Рабочая лопатка	HPT	Турбина высокого давления
RW	Рабочее колесо	IPT	Турбины среднего давления
DFR	Диффузор	LPT	Турбина низкого давления
OGV	Спрямляющий аппарат	PT	Турбина силовая
SV	Сопловой аппарат	FMIX	Смеситель потоков
SB	Сопловая лопатка	EXH	Выходное устройство
DFL	Дефлектор	NOZ	Сопло
DISK	Диск основной		
IDISK	Диск промежуточный		

Формализация правил хранения и обращения с компьютерными моделями

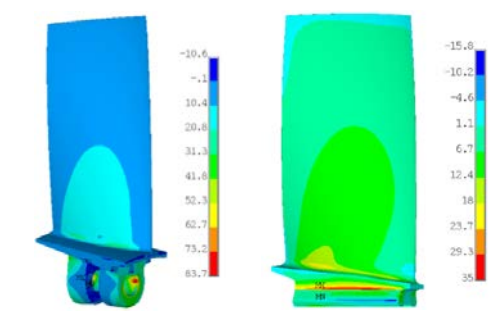


Формализация правил хранения и обращения с компьютерными моделями

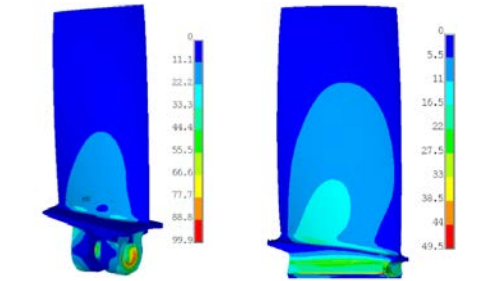


Интеграция численных математических моделей и их взаимоувязка в ЦП по результатам расчетных работ прочности рабочих колес ротора двигателя

1-я ступень

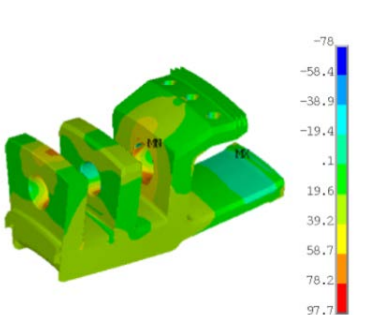


Первые главные напряжения, кгс/мм²

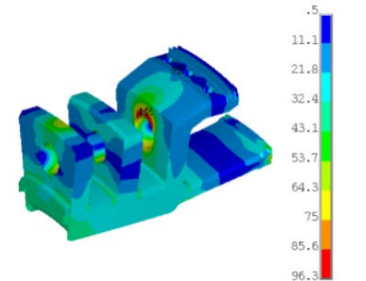


Эквивалентные (по Мизесу) напряжения, кгс/мм²

1-я ступень

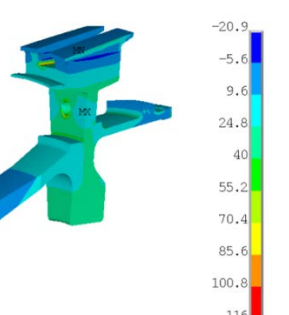


Первые главные напряжения, кгс/мм²

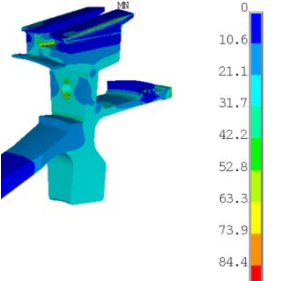


Эквивалентные (по Мизесу) напряжения, кгс/мм²

3-я ступень

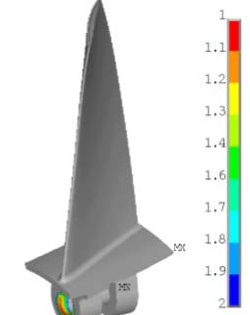


Первые главные напряжения, кгс/мм²

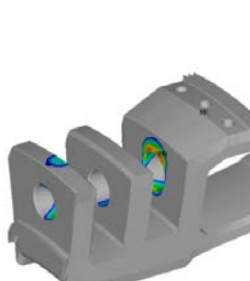


Эквивалентные (по Мизесу) напряжения, кгс/мм²

1-я ступень

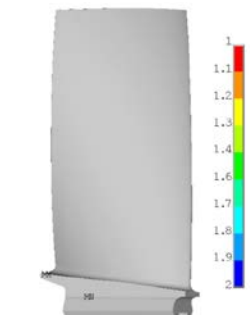


Распределение запасов местной статической прочности

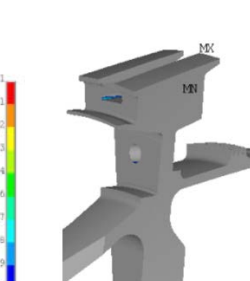


Распределение запасов местной статической прочности

3-я ступень



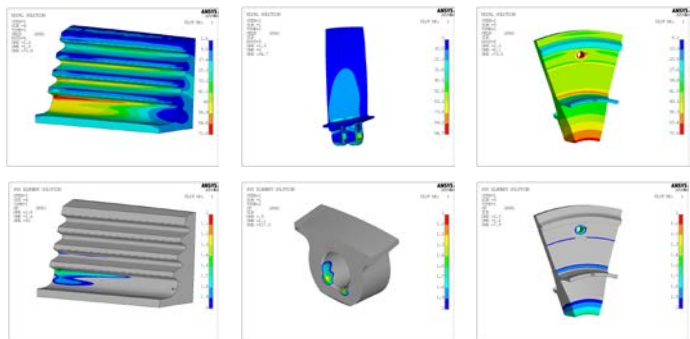
Распределение запасов местной статической прочности



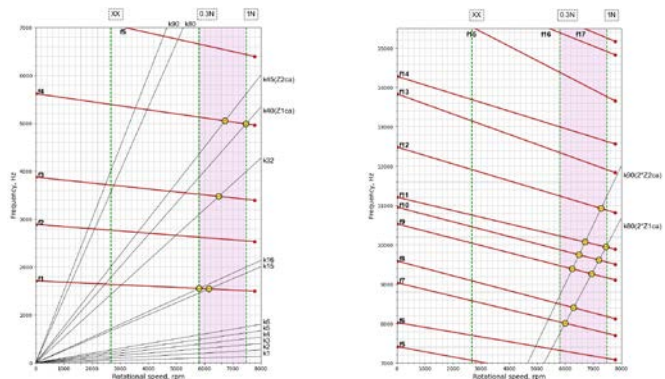
Распределение запасов местной статической прочности

Подетальные расчеты прочности и долговечности основных деталей ротора, статора и обвязки

Прочность рабочих колес КНД и ТНД

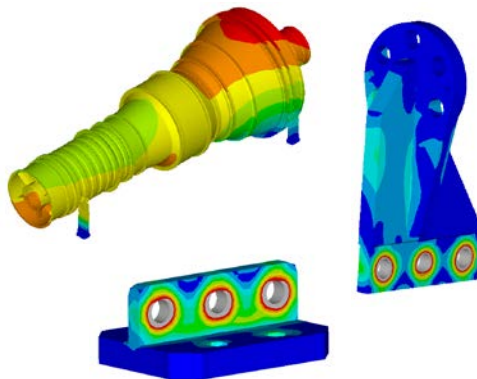


Расчеты вибрационных характеристик (РЛ ТНД)



Основные результаты:

- ✓ Определены запасы статической прочности по местным напряжениям и циклической долговечности дисков рабочих колес и рабочих лопаток КНД;
- ✓ Определены запасы статической прочности по местным напряжениям и циклической долговечности диска и лопатки ротора ТНД;
- ✓ Проведен расчет силовой схемы и узлов крепления двигателя к раме, определена первая собственная частота колебаний двигателя на опорах.

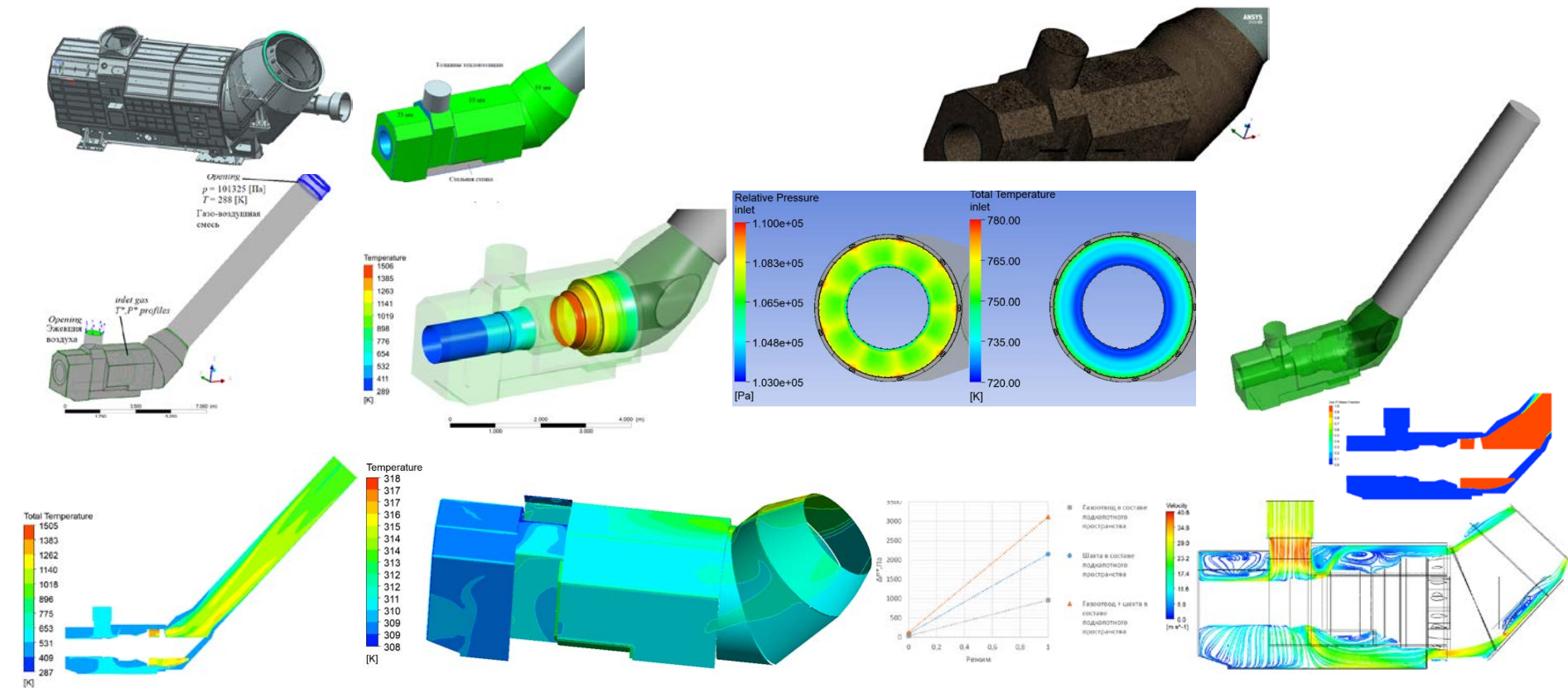


Values 85			
Name	Overview	Target value	Description
<input type="checkbox"/> SF_Front_Bracket	133.72	≥ 1.2 ✓	Front_Bracket minSF
<input type="checkbox"/> SF_Front_Sheet	7.49	≥ 1.2 ✓	Front_Sheet minSF
<input type="checkbox"/> SF_Front_Sole	8.46	≥ 1.2 ✓	Front_Sole minSF
<input type="checkbox"/> SF_Back_Bracket	2.77	≥ 1.2 ✓	Back_Bracket minSF
<input type="checkbox"/> SF_Back_Sheet	1.53	≥ 1.2 ✓	Back_Sheet minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Back_Sole	1.41	≥ 1.2 ✓	Back_Sole minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_A1	4.06	≥ 1.2 ✓	Bolt_A1 minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_B1	4.15	≥ 1.2 ✓	Bolt_B1 minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_C1	3.98	≥ 1.2 ✓	Bolt_C1 minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_D1	4.08	≥ 1.2 ✓	Bolt_D1 minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_E1	4.12	≥ 1.2 ✓	Bolt_E1 minSF
<input type="checkbox"/> SF_S1_Bolt_F1	4.01	≥ 1.2 ✓	Bolt_F1 minSF

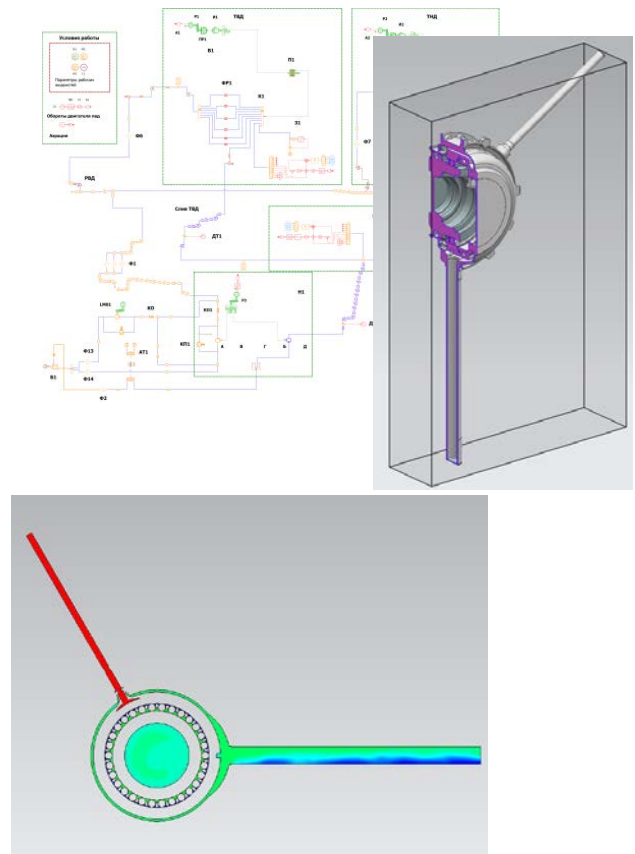
Расчет силовой схемы и узлов крепления двигателя

Газодинамический расчет подкапотного пространства.

Определение теплового состояния навесных агрегатов и элементов подкапотного пространства

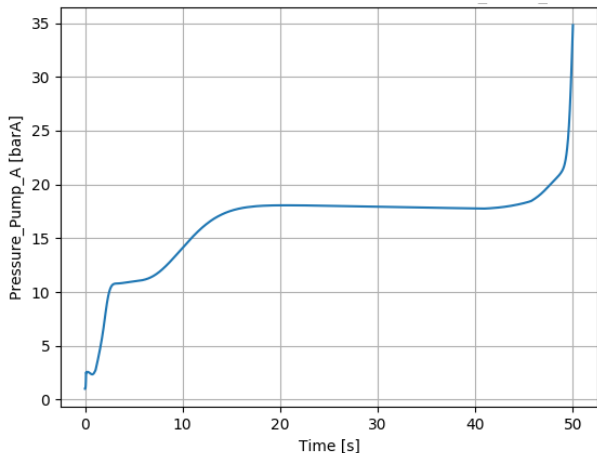
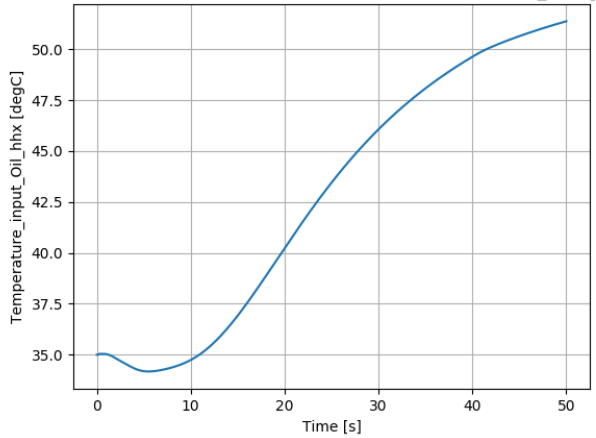


Интеграция численных математических моделей и их взаимоувязка в ЦП CML-Bench по результатам гидравлического расчета системы смазки-суфлирования



Основные результаты:

- ✓ На цифровую платформу CML-Bench интегрирована 1D модель маслосистемы, разработанная в SimCenter AMESim;
- ✓ На цифровую платформу CML-Bench интегрирована 3D модель элемента маслосистемы, разработанная в SimCenter FloEFD;
- ✓ Настроен автоматический постпроцессинг для задач данного типа.



Виртуальные испытания механизмов

Основные результаты:

- ✓ Выполнен анализ шлицевых и шпоночных соединений в полном объеме;
- ✓ Проведен анализ влияния геометрических характеристик зубчатых и шлицевых соединений на запасы прочности;
- ✓ Выполнен расчет «слабого» звена системы приводов;
- ✓ Доработаны скрипты переключения режимов внутри интерфейса KISSsys;
- ✓ Произведена оценка срока службы ДСЕ и веса.

Name	Type	Created By	Overview	Target value	Description
Gear_Sh_min	value	Bench	2.77	> 1.4 ✓	Contact Safety Factor (SH)
Gear_Sf_min	value	Bench	4.93	> 2.2 ✓	Bend Safety Factor (SF)
BG4_Sh	value	Bench	2.77		Contact Safety Factor (SH)
BG3_Sh	value	Bench	2.77		Contact Safety Factor (SH)
BG4_Sf	value	Bench	4.98		Bend Safety Factor (SF)
BG3_Sf	value	Bench	4.93		Bend Safety Factor (SF)

Представление результатов в ЦП CML-Bench



Моделирование технологических процессов

Цепочки моделирования технологических процессов

Интеграция ПО в ЦП CML-Bench™

Корпус форсунки

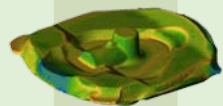
Лопатка НА

Корпус опоры

Стенка

Лопатка турбины

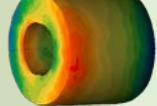
ОМД



ОМД



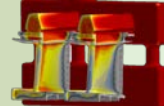
ОМД



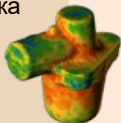
ОМД



Литье



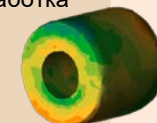
Термическая
обработка



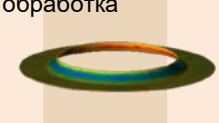
Термическая
обработка



Термическая
обработка



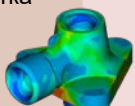
Термическая
обработка



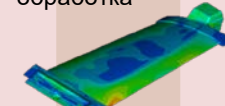
Термическая
обработка



Механическая
обработка



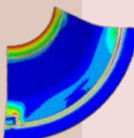
Механическая
обработка



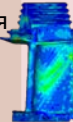
Механическая
обработка



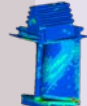
Сварка



Механическая
обработка



Наплавка



эквивалентные
напряжения по Мизесу
увеличились на 8,4 %.
упругие эквивалентные
деформации
увеличились на 16 %

эквивалентные
напряжения по Мизесу
увеличились на 12,4 %.
упругие эквивалентные
деформации
увеличились на 5,9 %

эквивалентные
напряжения по Мизесу
уменьшились на 4 %.
упругие эквивалентные
деформации
уменьшились на 33,3 %

эквивалентные
напряжения по Мизесу
увеличились на 25 %.
упругие эквивалентные
деформации не
изменились

эквивалентные
напряжения по Мизесу
увеличились на 1,8 %.
упругие эквивалентные
деформации не
изменились

ВИС технологическо й операции	ПО (1 - основное, 2 - альтернативное)	Интегра- ция
Обработка давлением (ОМД)	Qform (1)	-
	LS-DYNA (2)	+
Термическая обработка (ТО)	Qform (1)	-
	SYSWELD (2)	+
Механическая обработка (МО)	Abaqus	+
	LS-DYNA	+
Литье	ProCast	+
Сварка/ Наплавка	SYSWELD (1)	+
	LS-DYNA (2)	+

Сквозное моделирование технологического процесса изготовления детали «Корпус пусковой форсунки»

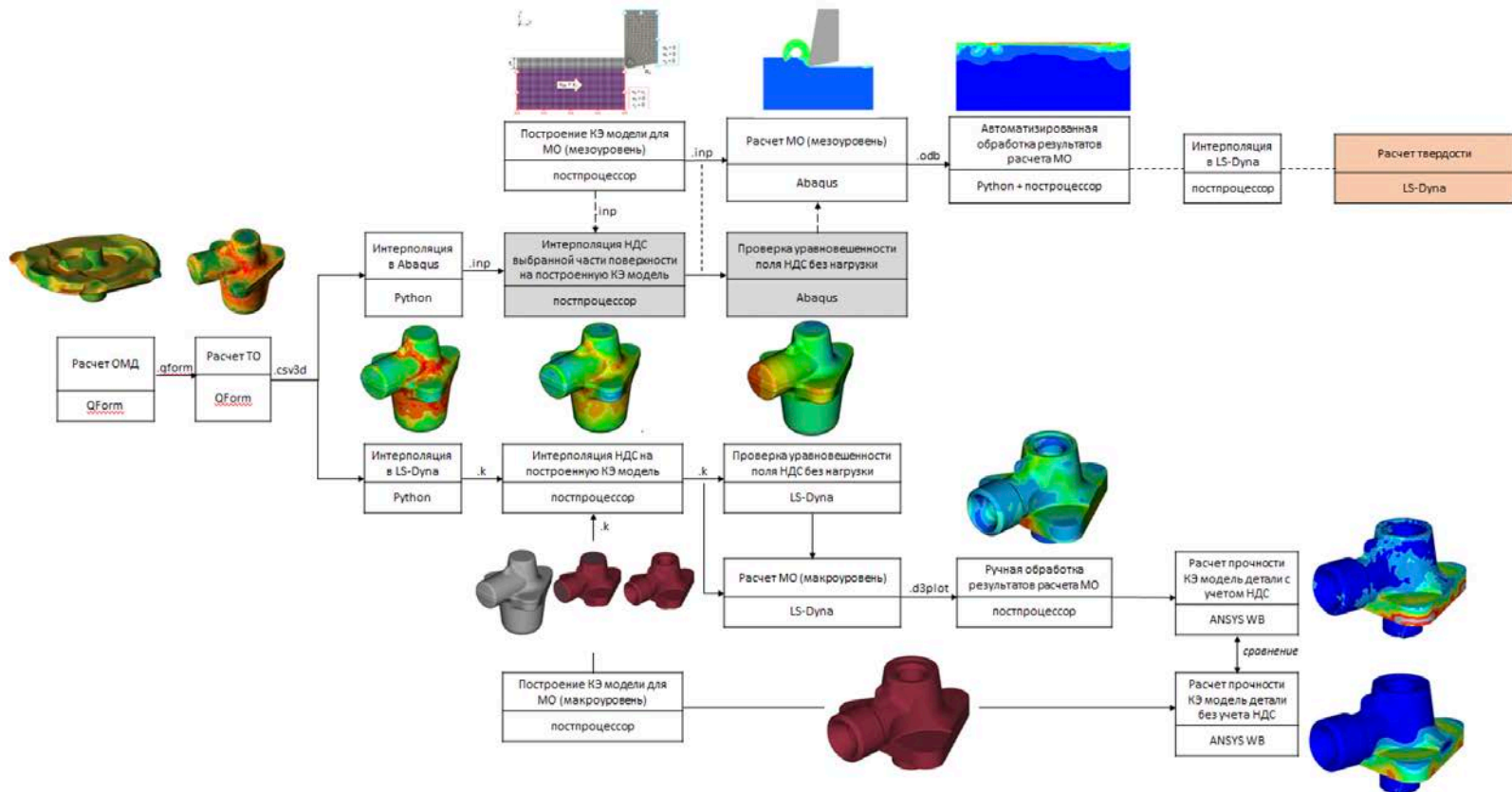
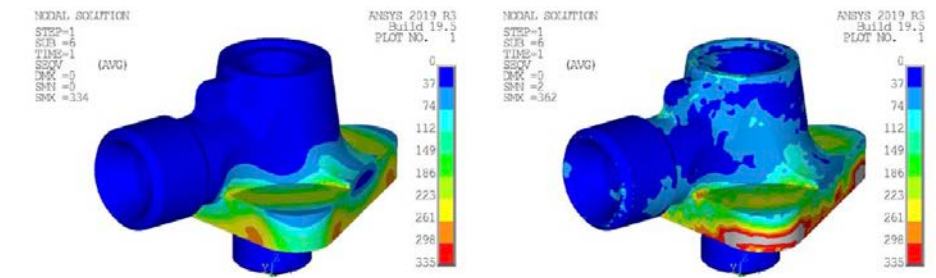


Схема расчетной цепочки

Расчетная оценка влияния учета напряженно-деформированного состояния детали, наследуемого из моделирования технологических операций, на прочность детали



Расчетный случай	Без НДС	с НДС	Разница, %
$u_{x_{min}}$, мм	-0,242	-0,239	-1,24
$u_{x_{max}}$, мм	0,193	0,195	1,04
$u_{y_{min}}$, мм	-0,176	-0,172	-2,27
$u_{y_{max}}$, мм	0,176	0,178	1,14
$u_{z_{min}}$, мм	-0,066	-0,057	-13,64
$u_{z_{max}}$, мм	0,228	0,231	1,32
$\sigma_{\text{ЭКВmax}}$, МПа	333	361	8,41
$\epsilon_{\text{упрmax}}$	0,0025	0,0029	16,00

Цели и задачи:

- Анализ влияния наследуемого НДС в процессе сквозного моделирования технологического процесса изготовления детали;
- Расчет НДС корпуса форсунки выполнен с учетом следующих действующих нагрузок на режиме 1N:
 - распределение давлений;
 - распределение температур;
 - поле предварительного НДС, переданного с МО (тензор напряжений и эквивалентные пластические деформации).

Результаты:

- Выполнен сравнительный прочностной анализ детали с учётом наследуемого НДС в ходе сквозного моделирования технологический процессов и без него.
- Максимальные напряжения в детали с учетом наследуемого НДС **на 8,4% больше**

log (стоимость изменений)

Утверждения.

1. Чем позже мы вносим изменение, тем дороже это изменение будет стоить.
2. Как правило, для внесения изменения, нужно возвращаться на предыдущие этапы.
3. Как правило, внесение изменения в один из компонентов, влияет на смежные компоненты.
4. Как правило, изменений много ?? "дорого и долго".

Вывод. Нужен "инструментарий", позволяющий вносить и анализировать изменения на ранних этапах работы.

Издержки, \$





ОБЪЕДИНЕННАЯ
ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ
КОРПОРАЦИЯ



ОДК | САТУРН



Технет



20.35
УНИВЕРСИТЕТ



Передовые
инженерные
школы



ПОЛИТЕХ
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого



ЦИФРОВОЙ
ИНЖИНИРИНГ
ПИШ СЛБПУ



НЦМУ
ПЕРЕДОВЫЕ ЦИФРОВЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ



ПОЛИТЕХ
Центр Национальной
технологической инициативы
Новые производственные технологии



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ЦЕНТР КОМПЬЮТЕРНОГО
ИНЖИНИРИНГА СЛБПУ
CompMechLab

**Международный технологический форум
“Инновации. Технологии. Производство”.
Круглый стол «Технологии создания цифровых двойников ГТД
на основных этапах жизненного цикла»**

21 апреля 2023 года, г. Рыбинск

Опыт разработки и внедрения экспериментальной технологии цифрового двойника на примере морского ГТД

А.А. Себелев

О докладчике:

к.т.н., руководитель отдела перспективных разработок в двигателестроении

