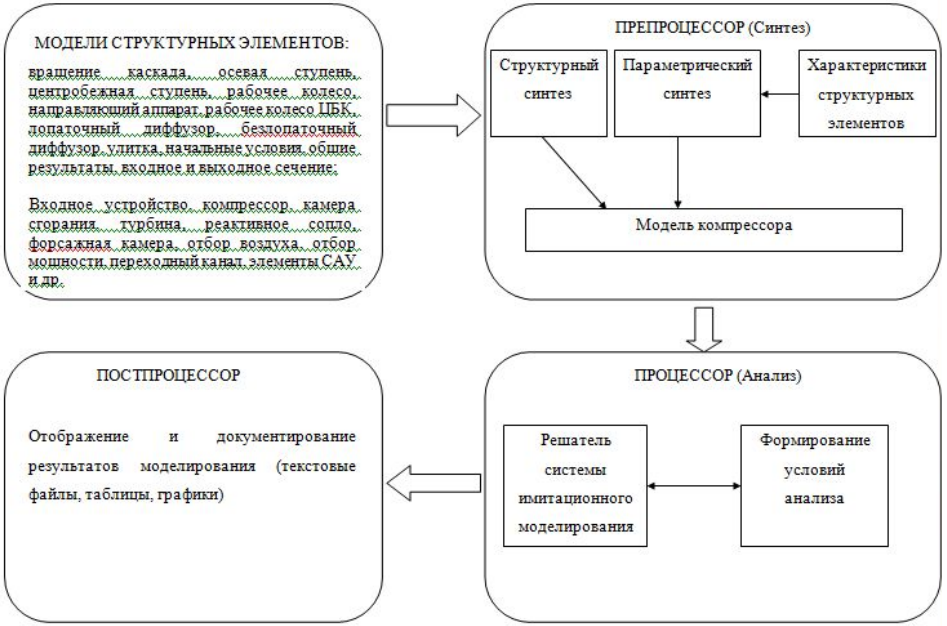
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
УФИМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АВИАЦИОННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАННИХ СТАДИЙ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

АСПИРАНТЫ КАФЕДРЫ АВИАЦИОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
МИХАЙЛОВА АЛЕКСАНДРА БОРИСОВНА
МИХАЙЛОВ АЛЕКСЕЙ ЕВГЕНЬЕВИЧ

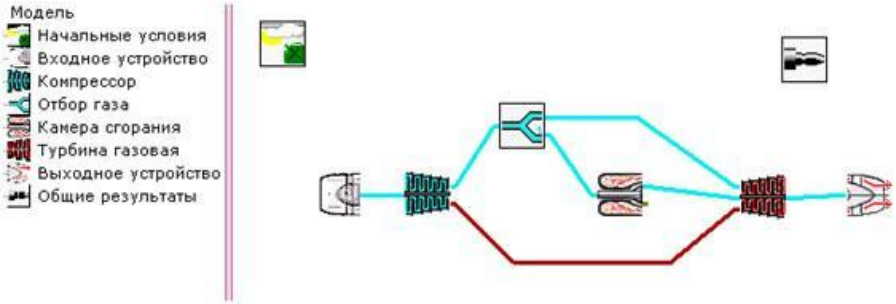
НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ
ОКТОР ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК, ПРОФЕССОР
АХМЕДЗЯНОВ ДМИТРИЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

ОСОБЕННОСТИ ПРОГРАММНОЙ СРЕДЫ МЕТАСАПР САМСТО

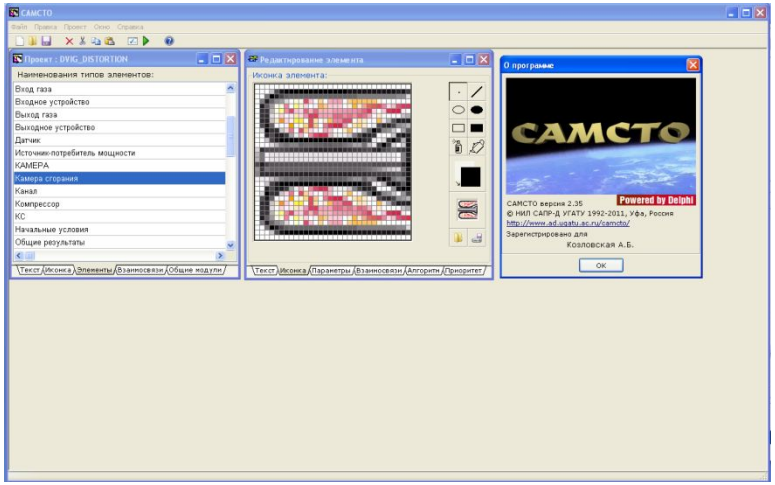


Структура средств имитационного моделирования

Единая схема представления структурных элементов

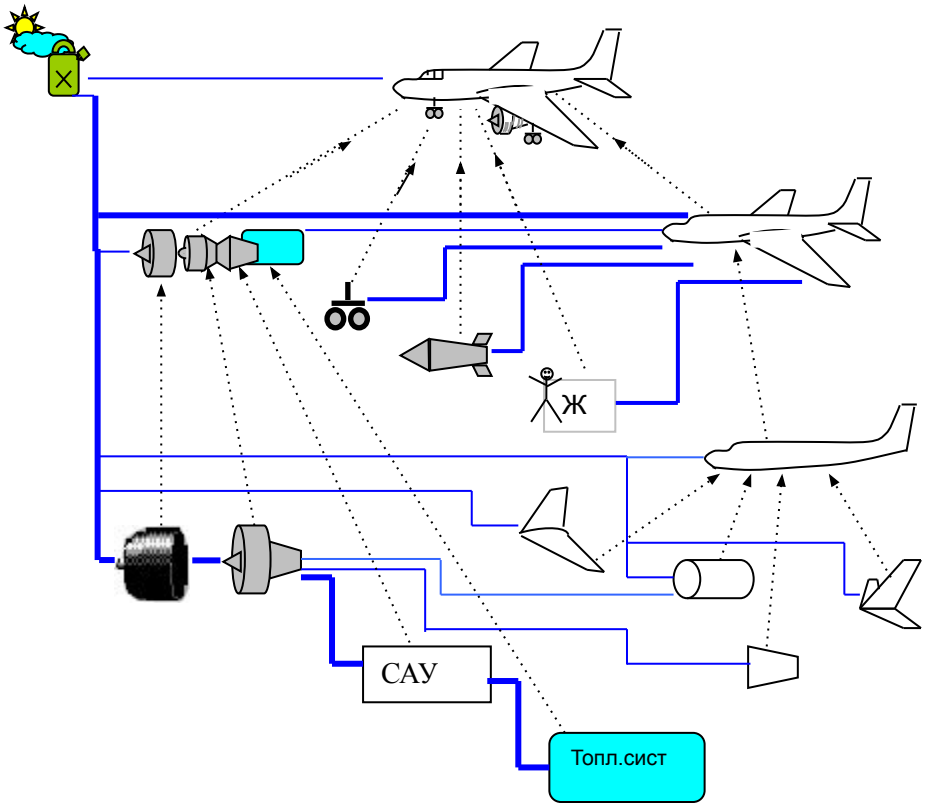


Модульность построения структурной схемы и задание информационных потоков

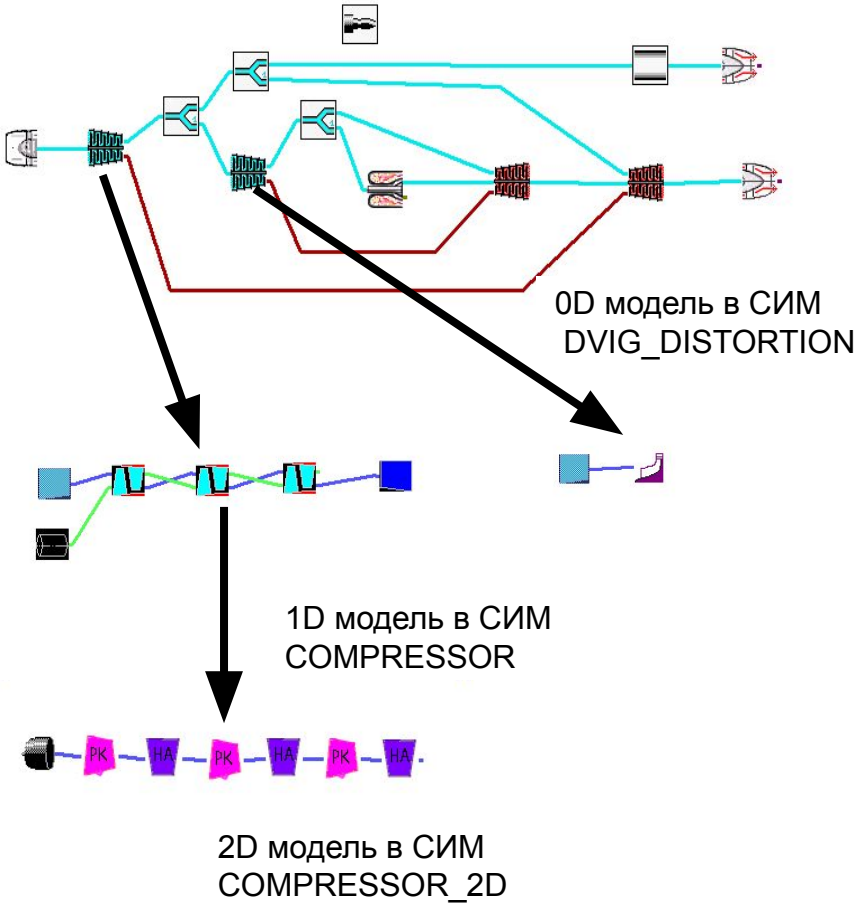


Внешний вид МетаСАПР САМСТО

МНОГОУРОВНЕВАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОМ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ

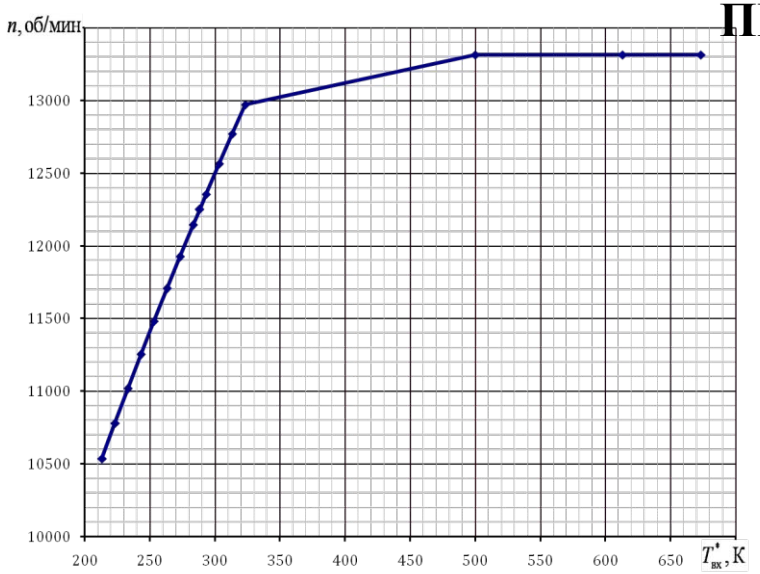


Трехуровневая функциональная модель (дерево проекта) самолета с силовой установкой на основе ГТД

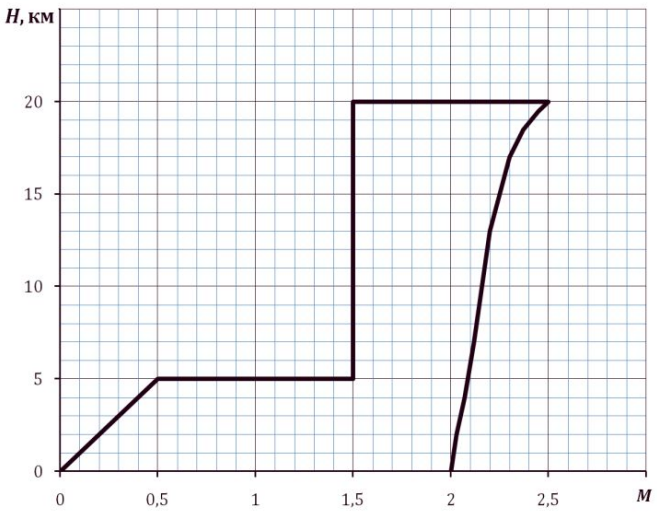


Трехуровневая функциональная модель газотурбинного двигателя в среде МетаСАПР САМСТО

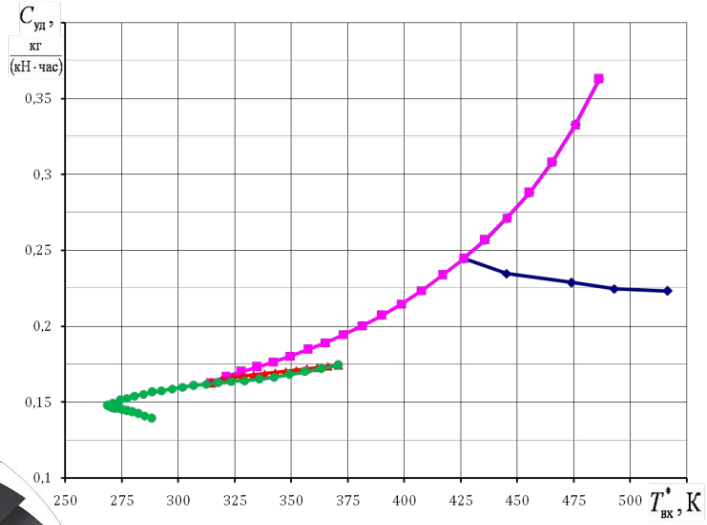
РАСЧЕТ ВЫСОТНО-СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТКИ ПО ТРАЕКТОРИИ ПОЛЕТА БПЛА ОДНОРАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ



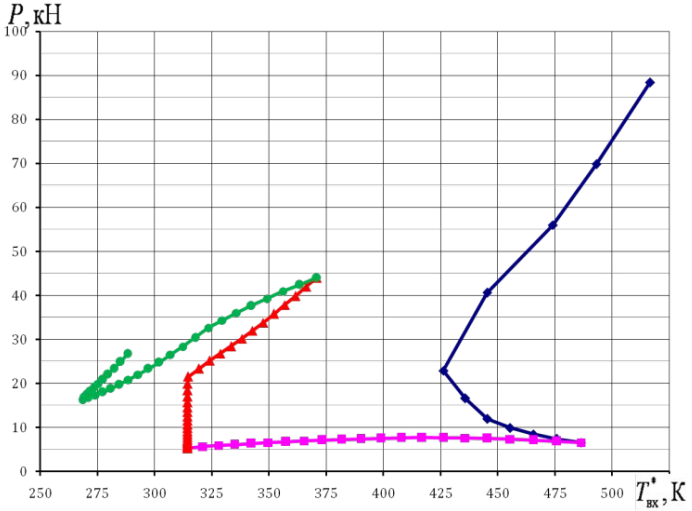
Программа регулирования ТРД



Типовая траектория полета ЛА



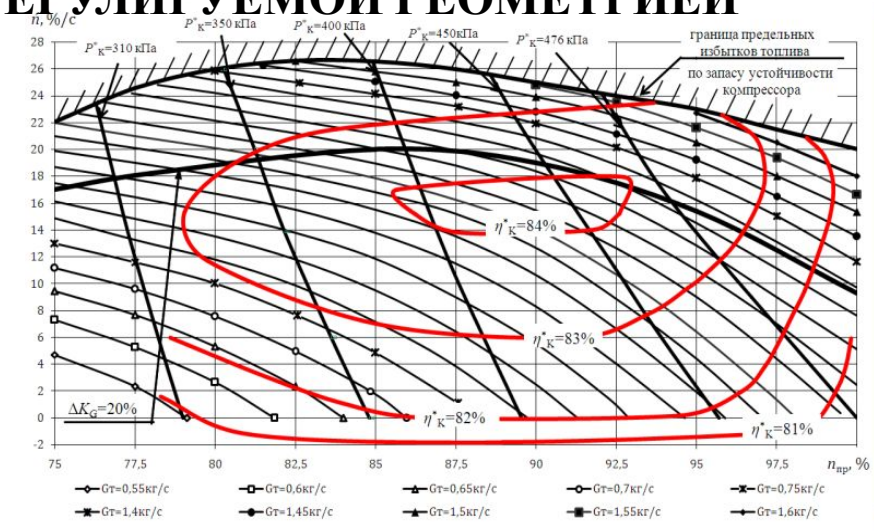
Зависимость удельного расхода топлива от условий полета



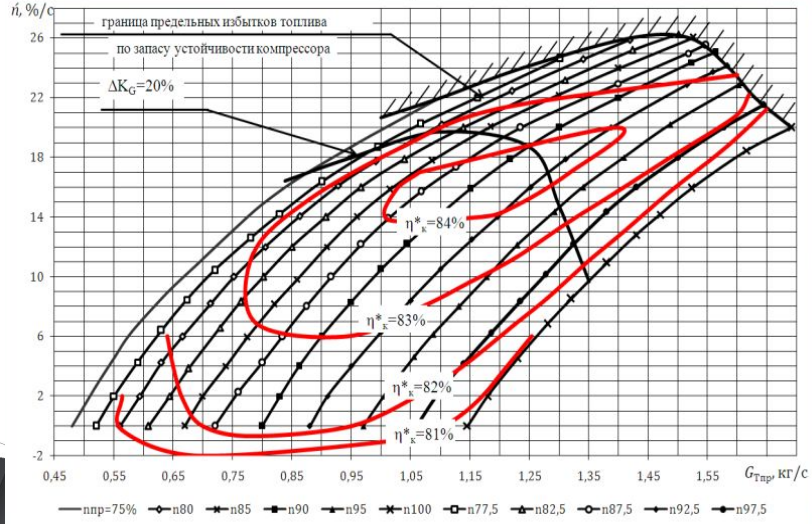
Зависимость тяги сопла двигателя от условий полета

РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОВАЛЬНОГО ТРД С НЕРЕГУЛИРУЕМОЙ ГЕОМЕТРИЕЙ

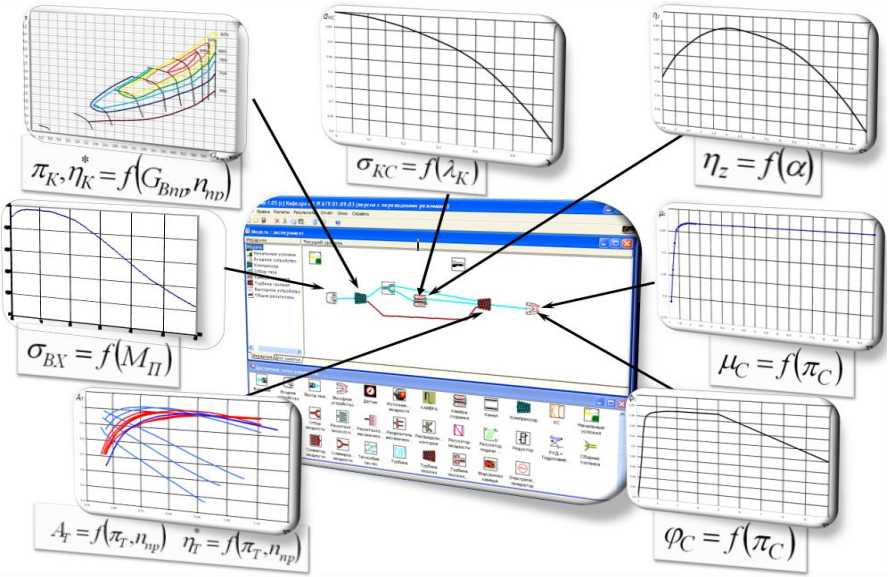
$$G_{Тпр} = f(n_{пр}, \pi)$$



$$\pi = f(n_{пр}, G_{Тпр})$$

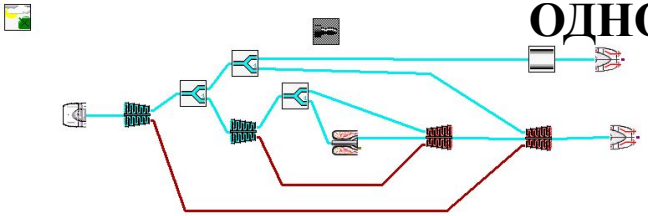


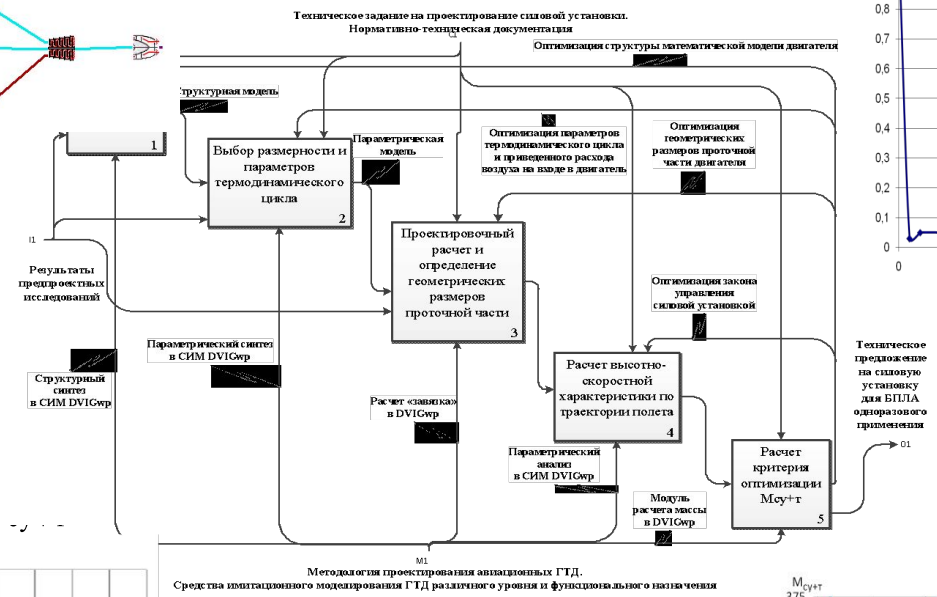
$$\pi = f(G_{Тпр}, n_{пр})$$

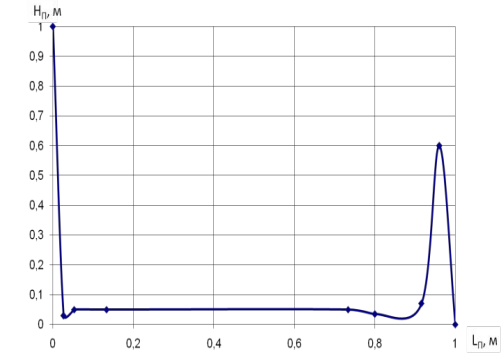


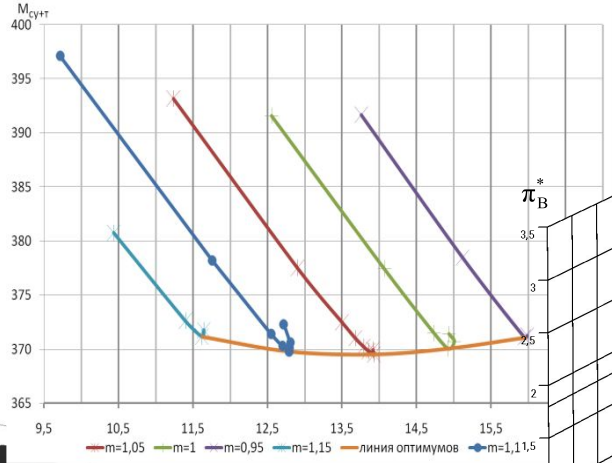
Создание индивидуальной модели ГТД

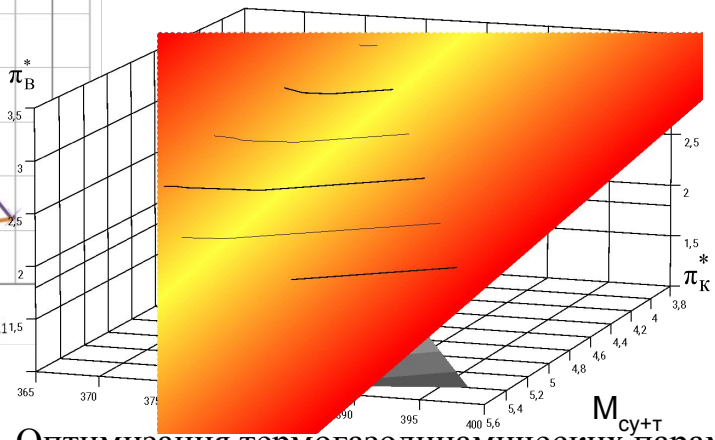
МНОГОФАКТОРНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ЦИКЛА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ БПЛА ОДНОРАЗОВОГО ПРИМЕНЕНИЯ

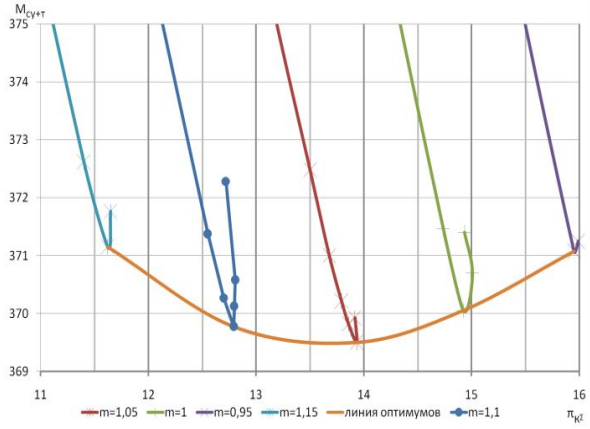






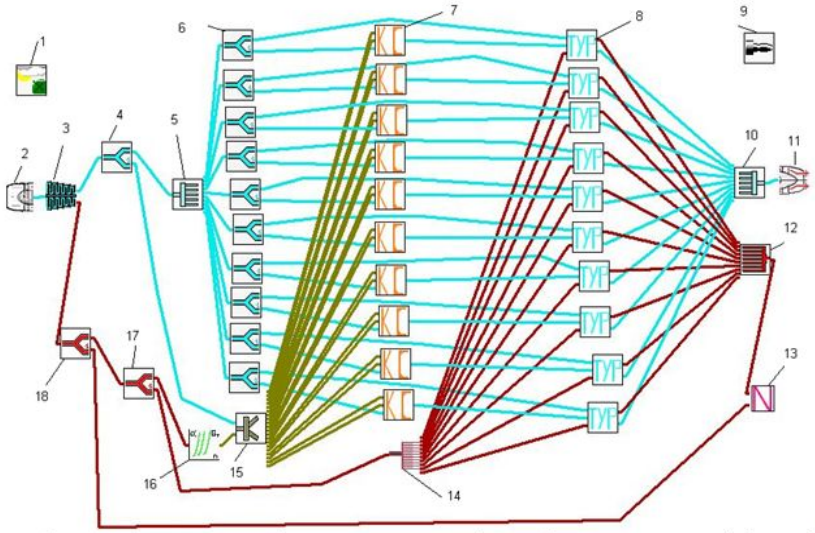




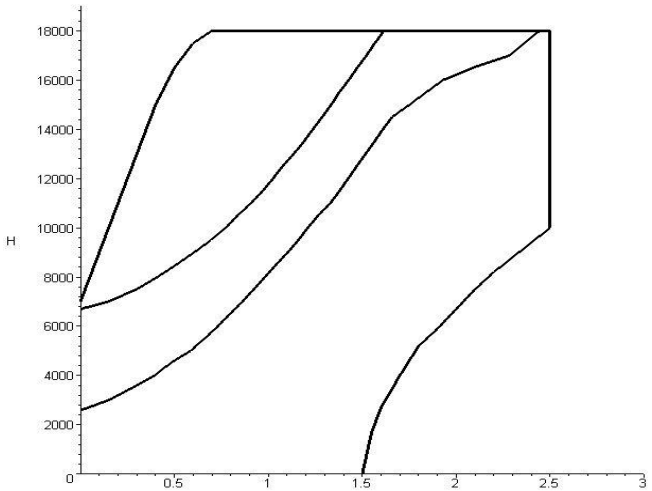


Оптимизация термогазодинамических параметров ТРДД с использованием комплекса

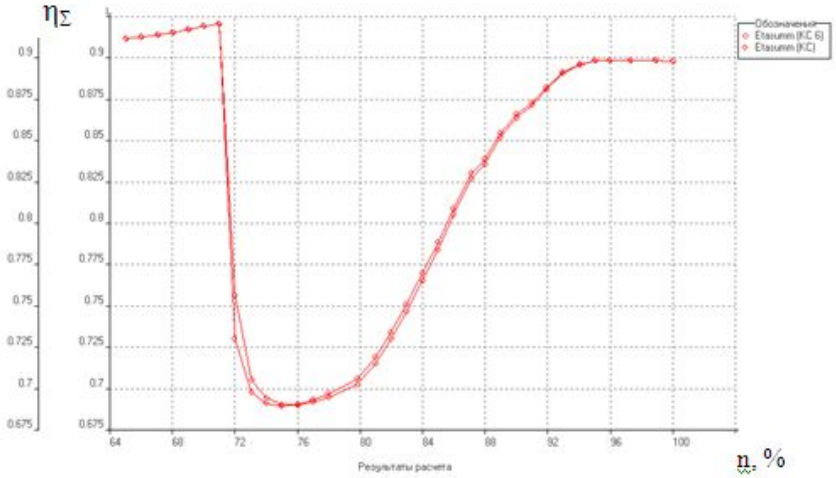
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЗАПОЛНЕНИЯ ОСНОВНОГО ТОПЛИВНОГО КОЛЛЕКТОРА В СИМ DVIG_DISTORTION



Топологическая схема модели ТРД



Выработка ограничения по эксплуатационным режимам работы силовой установки в составе ЛА



Изменение среднемассовой полноты сгорания топлива между верхней и нижней форсунками

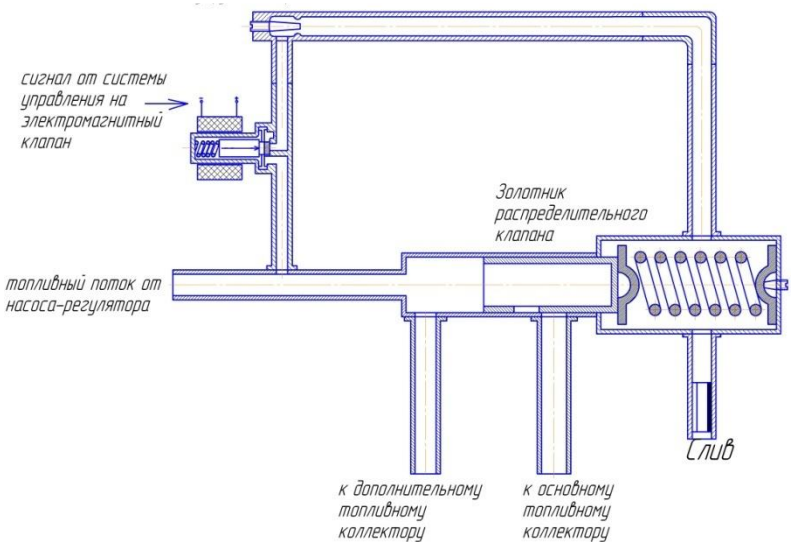
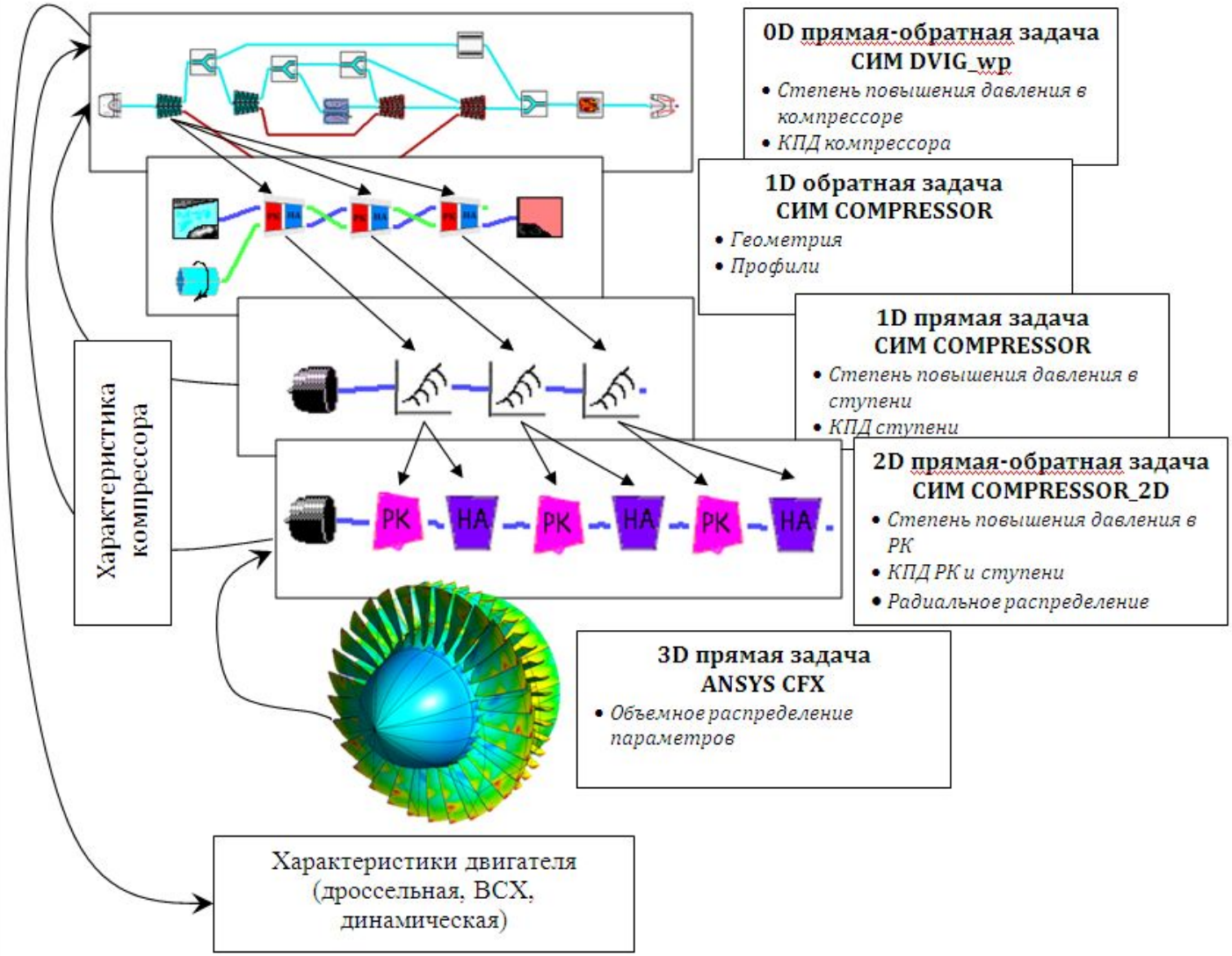
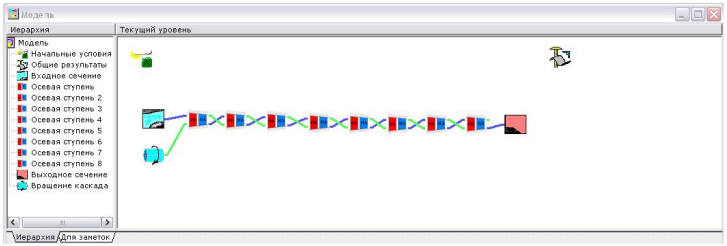


Схема распределительного клапана с противодавлением в золотниковой полости

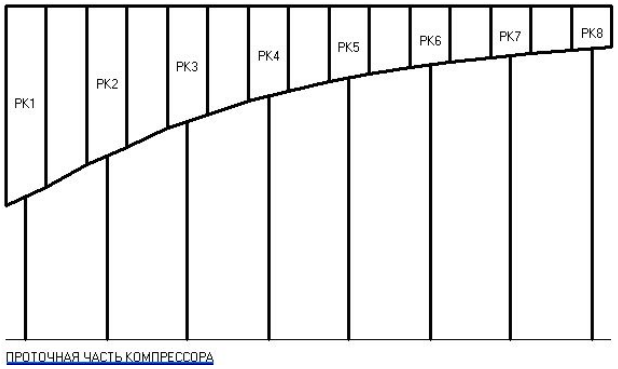
ИНТЕГРАЦИЯ РАЗРАБОТАННЫХ СИСТЕМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ КОМПРЕССОРОВ С ДРУГИМИ СИСТЕМАМИ



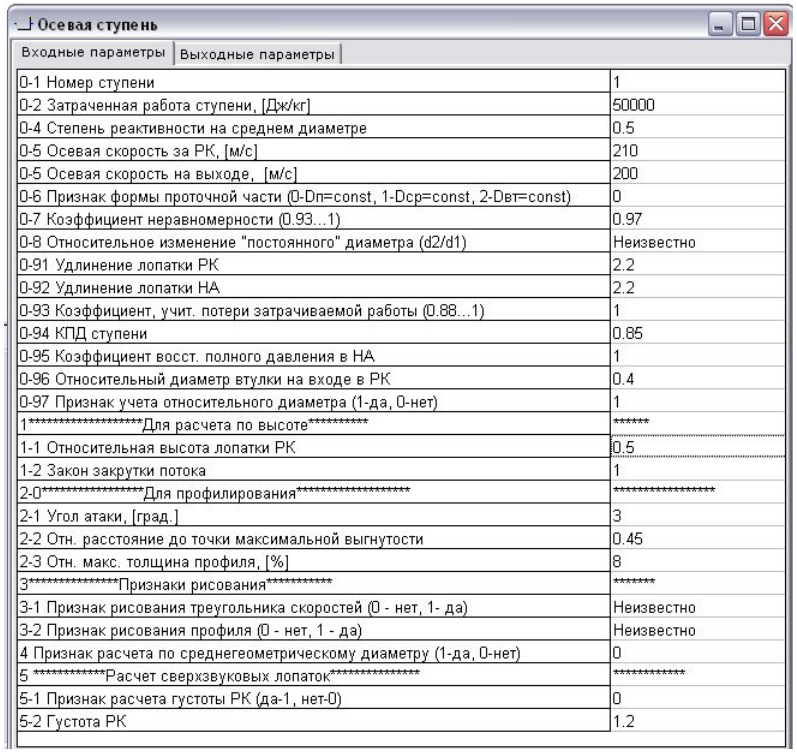
1.3 ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА. ОСЕВОЙ КОМПРЕССОР. СИМ COMPRESSOR



Модель многоступенчатого компрессора в системе моделирования



Проточная часть компрессора

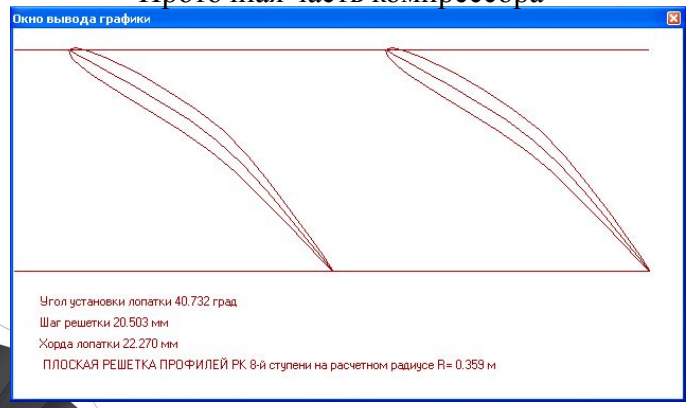


Осевая ступень

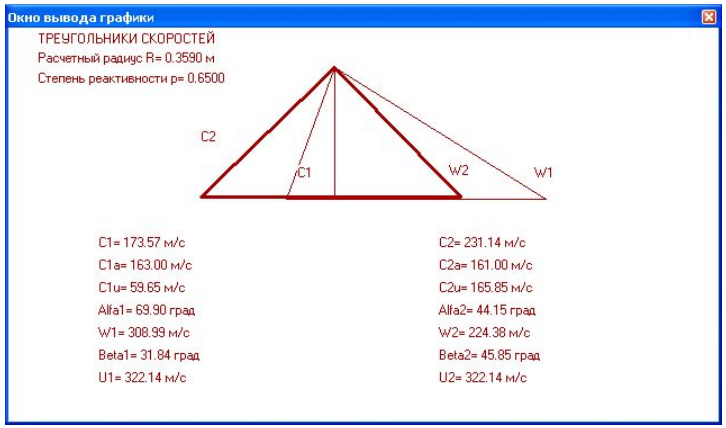
Входные параметры | Выходные параметры

0-1 Номер ступени	1
0-2 Затраченная работа ступени, [Дж/кг]	50000
0-4 Степень реактивности на среднем диаметре	0.5
0-5 Осевая скорость за РК, [м/с]	210
0-5 Осевая скорость на выходе, [м/с]	200
0-6 Признак формы проточной части (0-Dn=const, 1-Dcp=const, 2-Dвт=const)	0
0-7 Коэффициент неравномерности (0.93...1)	0.97
0-8 Относительное изменение "постоянного" диаметра (d2/d1)	Неизвестно
0-91 Удлинение лопатки РК	2.2
0-92 Удлинение лопатки НА	2.2
0-93 Коэффициент, учит. потери затрачиваемой работы (0.88...1)	1
0-94 КПД ступени	0.85
0-95 Коэффициент восст. полного давления в НА	1
0-96 Относительный диаметр втулки на входе в РК	0.4
0-97 Признак учета относительного диаметра (1-да, 0-нет)	1
1**********Для расчета по высоте**********	******
1-1 Относительная высота лопатки РК	0.5
1-2 Закон закрутки потока	1
2-0**********Для профилирования**********	**********
2-1 Угол атаки, [град.]	3
2-2 Отн. расстояние до точки максимальной выгнутости	0.45
2-3 Отн. макс. толщина профиля, [%]	8
3**********Признаки рисования**********	*******
3-1 Признак рисования треугольника скоростей (0 - нет, 1- да)	Неизвестно
3-2 Признак рисования профиля (0 - нет, 1 - да)	Неизвестно
4 Признак расчета по среднегеометрическому диаметру (1-да, 0-нет)	0
5 **********Расчет сверхзвуковых лопаток**********	**********
5-1 Признак расчета густоты РК (да-1, нет-0)	0
5-2 Густота РК	1.2

Исходные данные



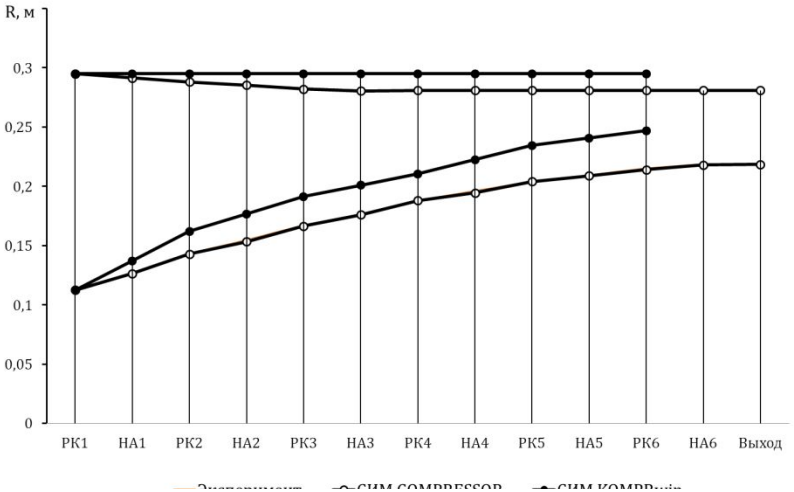
Плоская решетка профилей

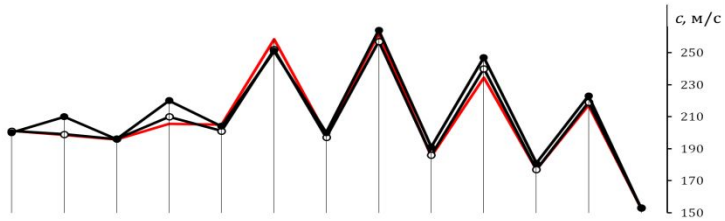


Треугольники скоростей

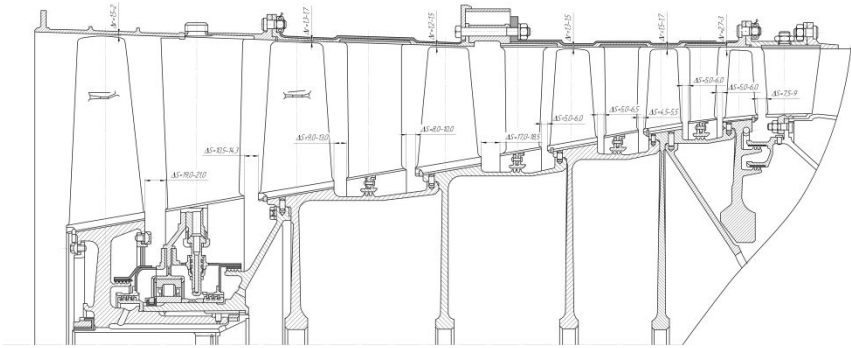
ВЕРИФИКАЦИЯ 1D ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

Параметр	Источник	1	2	3	4	5	6	δ_{max}, %
$\pi^*_{ст}$	Эксперимент	1,305	1,350	1,317	1,332	1,255	1,207	
	СИМ COMPRESSOR	1,305	1,351	1,318	1,332	1,255	1,207	0,08
	δ, %	0	0,07	0,08	0	0	0	
	СИМ KOMPRwin	является исходным параметром						
$\eta^*_{ст}$	Эксперимент	0,820	0,830	0,840	0,840	0,830	0,810	
	СИМ COMPRESSOR	является исходным параметром						
	СИМ KOMPRwin	0,822	0,829	0,841	0,843	0,834	0,812	0,48
	δ, %	0,24	0,12	0,12	0,36	0,48	0,25	
$D_{к1}$, м	Эксперимент	0,590	0,576	0,5655	0,562	0,562	0,562	
	СИМ COMPRESSOR	0,59	0,576	0,564	0,562	0,562	0,562	0,27
	δ, %	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	
	СИМ KOMPRwin	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	4,98
	δ, %	0,00	2,43	4,33	4,98	4,98	4,98	
$D_{к2}$, м	Эксперимент	0,583	0,571	0,562	0,562	0,562	0,562	
	СИМ COMPRESSOR	0,583	0,571	0,561	0,562	0,562	0,562	0,18
	δ, %	0,00	0,00	0,18	0,00	0,00	0,00	
	СИМ KOMPRwin	расчет не производится						
$D_{вт1}$, м	Эксперимент	0,225	0,286	0,334	0,376	0,408	0,43	
	СИМ COMPRESSOR	0,225	0,286	0,333	0,376	0,408	0,428	0,47
	δ, %	0,00	0,00	0,30	0,00	0,00	0,47	
	СИМ KOMPRwin	0,225	0,324	0,383	0,421	0,469	0,494	14,95
	δ, %	0,00	13,29	14,67	11,97	14,95	14,88	
$D_{вт2}$, м	Эксперимент	0,254	0,3095	0,3525	0,392	0,419	0,437	
	СИМ COMPRESSOR	0,253	0,307	0,352	0,389	0,418	0,436	0,81
	δ, %	0,39	0,81	0,14	0,77	0,24	0,23	
	СИМ KOMPRwin	расчет не производится						



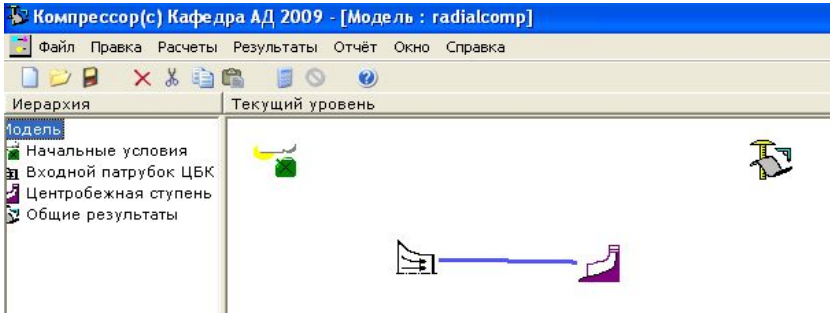


Сравнение проточных частей и скоростей (КР17-300)



Чертеж компрессора КР17-300

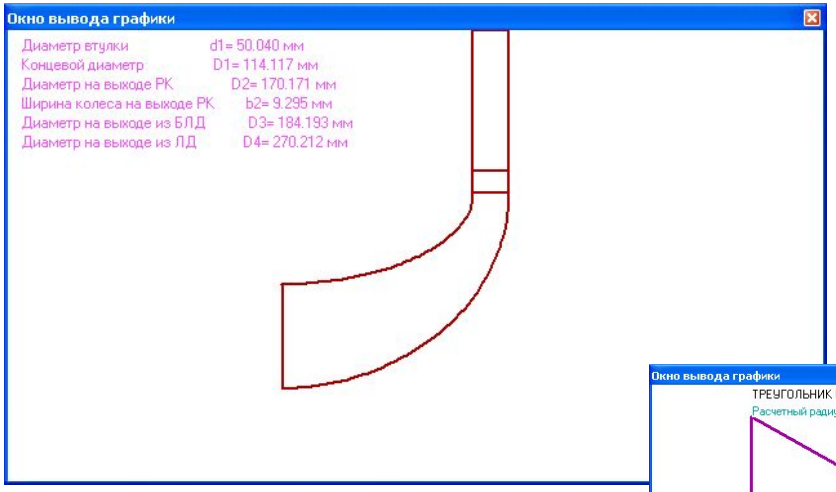
15 ОБРАТНАЯ ЗАДАЧА. ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ КОМПРЕССОР. СИМ COMPRESSOR



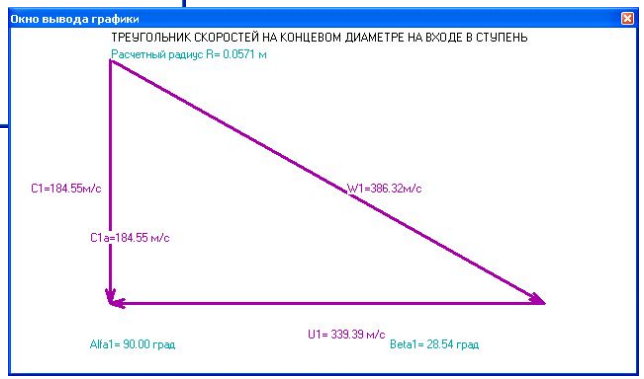
Модель центробежного компрессора
в системе моделирования COMPRESSOR

Входные параметры	Выходные параметры
1 Степень повышения давления в ступени	3.95
1. Угол входа потока, [град.]	90
3. Относительная скорость на входе	1.2
4 КПД компрессора (>=0,74)	0.81
5 Относительный диаметр втулки (D0/D1)	0.4385
7. Отношение диаметров (D1/D2) (0,6...0,65)	0.6706
8. Коэффициент неравномерности	0.845
9. Частота вращения, [об/мин]	56800
9.1.Наличие закрутки на концевом диметре (1-да, 0-нет)	0
9.2. Max по относительной скорости на входе на среднем радиусе (0,65...0,7)	0.9
9.3 Метод закрутки потока (-1...1)	0
9.4 Признак рисования треугольника скоростей на концевом диаметре (1-да, 0-нет)	1
9.5. Число лопаток РК (16...29)	12
9.6. Радиус скругления кромок лопаток на входе, [мм] (0,5...1,0)	0.5
9.7 Коэффициент потерь в ВНА (0,1...0,4)	0.477
9.8 Коэффициент потерь при повороте (0,05...0,15)	0.05
9.9 Коэффициент дисковых потерь (0,04...0,08)	0.04
9.9.1 Отношение D3/D2 (1.05...1.15)	1.0824
9.9.2 Отношение D4/D3 (1.25...1.35)	1.467
9.9.3 Показатель политропы сжатия (1,45...1,65)	1.55
9.9.4 Отношение проходных сечений в диффузоре (2...2,5)	2.9
9.9.5 Число лопаток ЛД (9...25)	27
9.9.6 Коэффициент потерь в выходном устрйстве (0,5)	0.95
9.9.7 Абсолютная скорость потока после выходного устройства (60...140), [м/с]	50
9.9.8 Средний угол расширения ЛД (4...11)	11
9.9.9 Признак наличия безлопаточного диффузора (1-да, 0-нет)	1
9.9.9.1 Признак наличия лопаточного диффузора (1-да, 0-нет)	1
9.9.9.2 Признак наличия выходного устройства (1-да, 0-нет)	1

Исходные данные



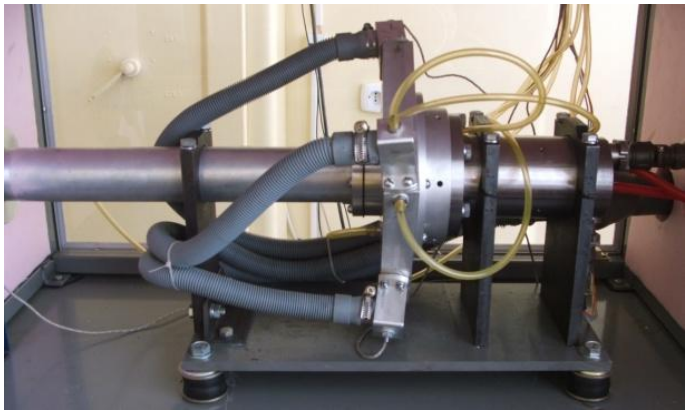
Проточная часть компрессора

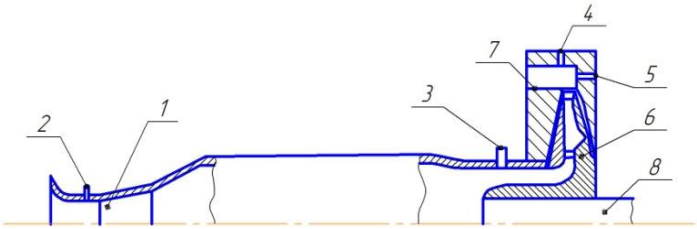


Треугольник скоростей

ВЕРИФИКАЦИЯ 1D ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Параметр	Расчет	Эксперимент	δ_{max}, %
$D_{вт}$	50,04	50	0,08
D_1	114,12	114	0,102
D_2	170,17	170	0,1
D_3	184,93	184	0,11
D_4	270,19	270	0,07
b_2	9	9	0
$c_{1ср}$	184,55	188,6	2,14
$c_{1aср}$	184,5	188,6	2,14
$W_{1ср}$	320,5	322,64	0,6
W_2	208,7	230,3	9,3
α_2	24,3	25,1	3,18
$\beta_{1ср}$	35,16	35,77	1,7
p_1	81,122	80,178	1,17
T_1	271	270,3	0,26
T_2	404,98	401,69	0,25
$\pi^*_{РК}$	4,38	4,45	1,5



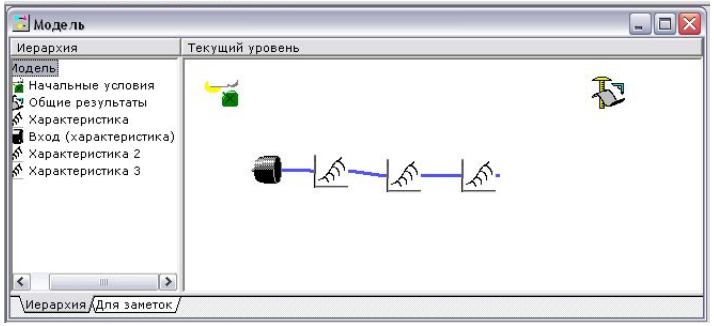


Стенд для испытаний центробежного компрессора

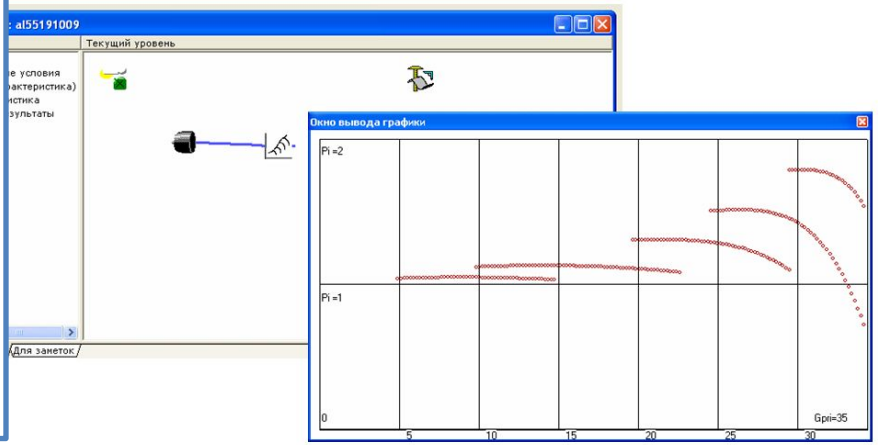
1D ПРЯМАЯ ЗАДАЧА. СИМ COMPRESSOR

1**********Параметры в расчетной точке**********
1-1 Номер ступени
1-2 Наружный диаметр на входе в РК, [м]
1-3 Наружный диаметр на выходе из РК, [м]
1-4 Наружный диаметр на выходе из ступени, [м]
1-5 Относительный диаметр втулки на входе в РК
1-6 Относительный диаметр втулки на выходе из РК
1-7 Относительный диаметр втулки на выходе из ступени
1-8 КПД ступени
1-9 Угол входа потока В РК в абс. движении, [град]
1-91 Угол потока на выходе из РК в отн. движении, [град]
1-92 Осевая скорость на входе в РК, [м/с]
1-93 Осевая скорость на выходе из РК, [м/с]
1-94 Коэффициент неравномерности
1-95 Критический угол атаки, [град]
2**********Характеристики**********

2-1 Имя файла характеристики k1
2-2 Имя файла характеристики k2
2-3 Имя файла характеристики ВНА
3**********Признак**********
*****
3-1 Признак рисования характеристики ступени
4 Расчет по среднегеометрическому диаметру (1-да, 0-нет)



Структурная схема компрессора в СИМ COMPRESSOR

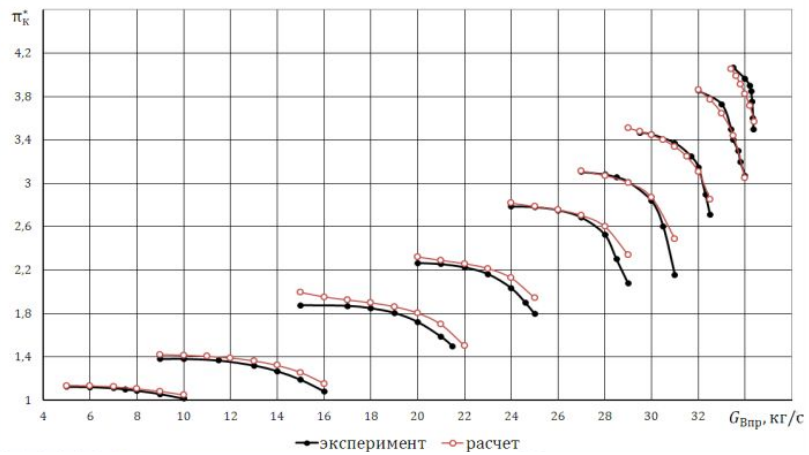


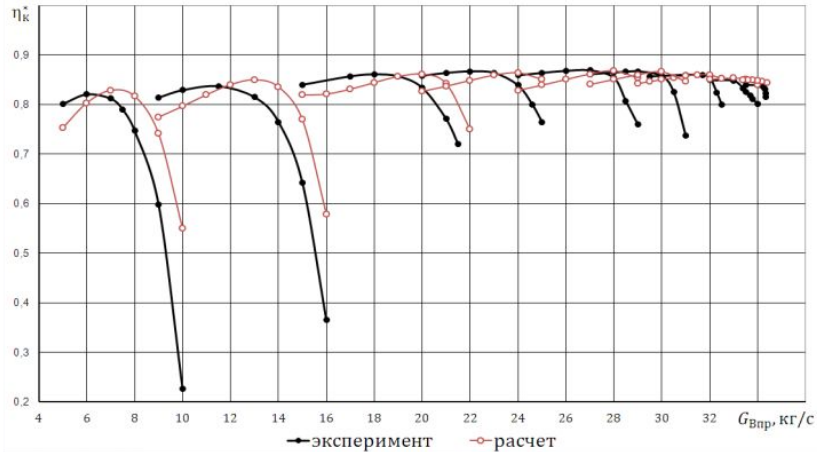
Окно расчета характеристики

$$K_1 = \frac{\overline{H}}{\eta_{\kappa}^{*}} - \frac{\overline{c}_a}{\overline{c}_{a0}} \frac{\overline{H}_0}{\eta_{\kappa 0}^{*}}, \qquad K_2 = \overline{H} - \overline{H}_0 \frac{\overline{c}_a}{\overline{c}_{a0}}.$$

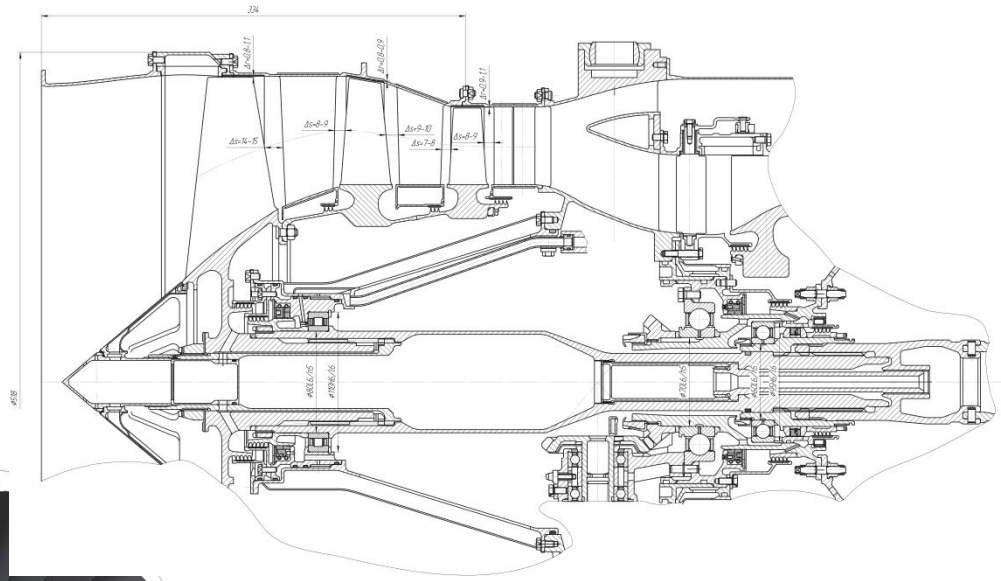
Обобщенные зависимости

ВЕРИФИКАЦИЯ 1D ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

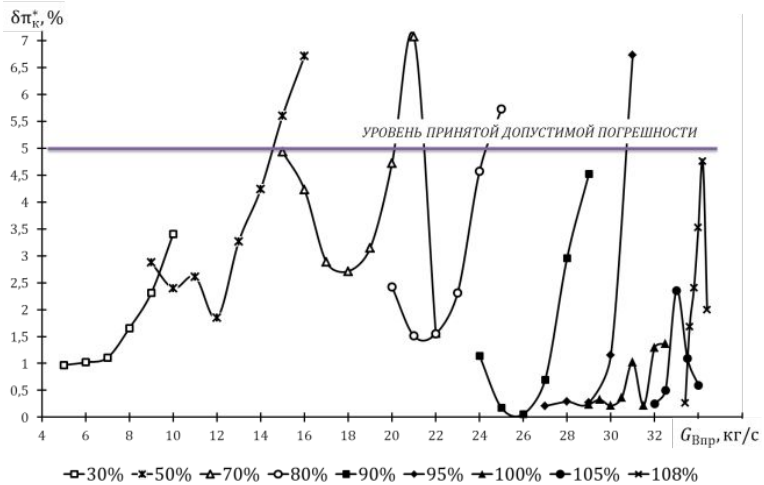




Расчетная и экспериментальная характеристики КНД АЛ-55

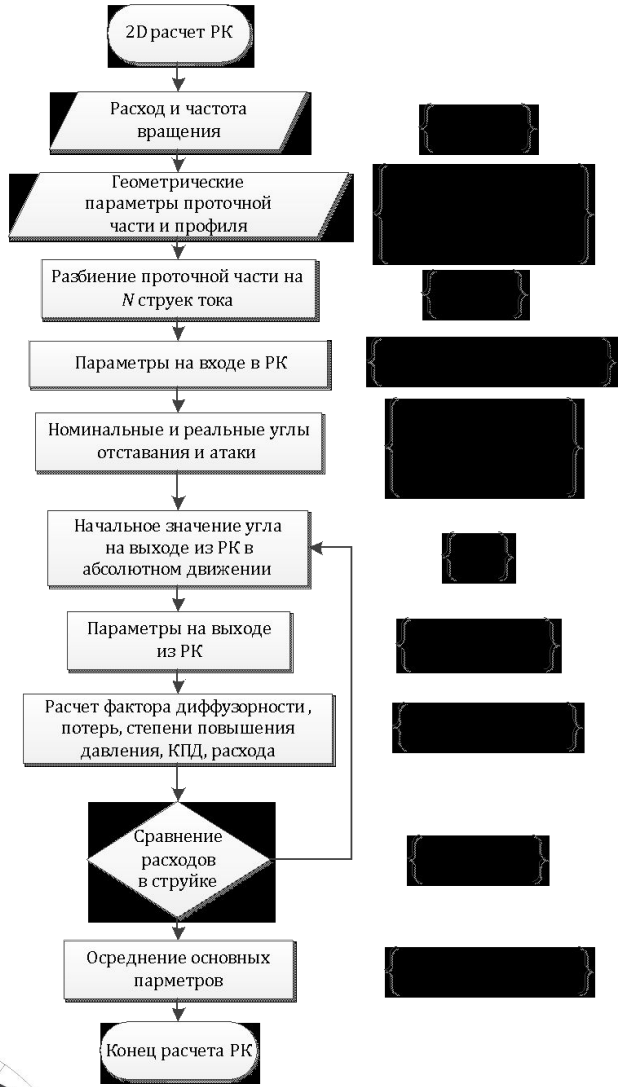


Чертеж КНД АЛ-55

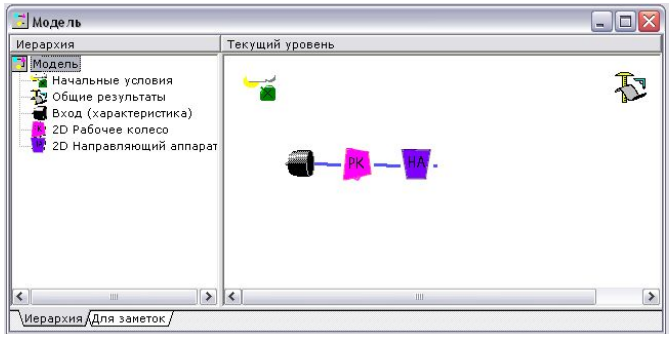


Сравнение погрешностей степени повышения давления при расчете характеристики КНД АЛ-55

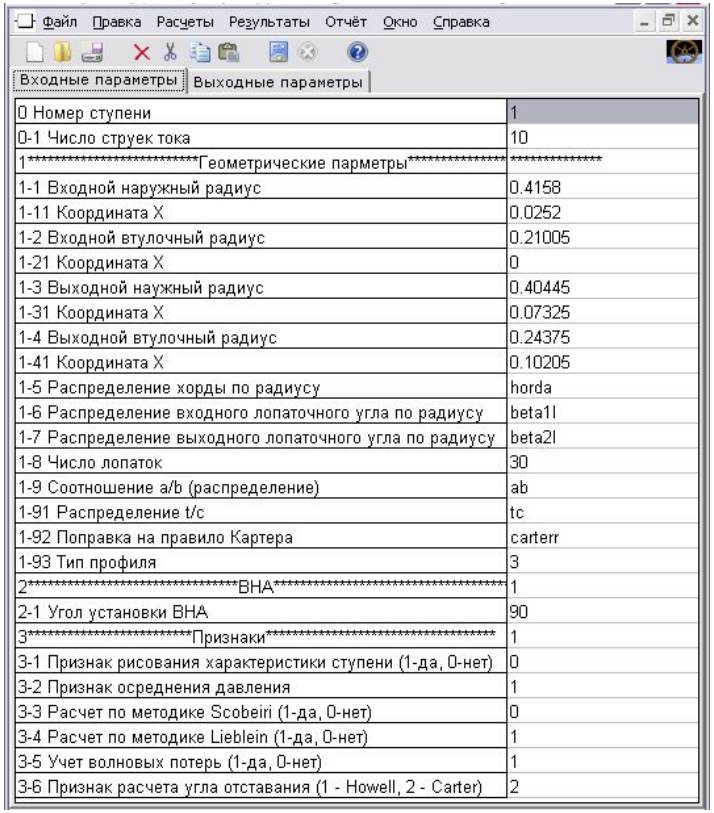
2D ПРЯМАЯ ЗАДАЧА. СИМ COMPRESSOR_2D



Алгоритм расчета РК в СИМ COMPRESSOR_2D



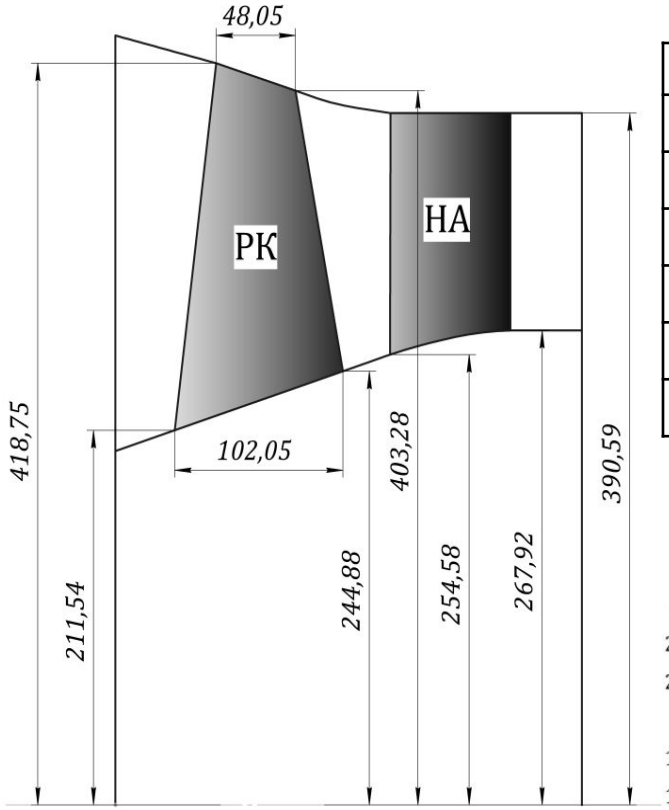
Структурная схема ступени в СИМ COMPRESSOR_2D



0 Номер ступени	1
0-1 Число струек тока	10
1**********Геометрические парметры**********	**********
1-1 Входной наружный радиус	0.4158
1-11 Координата X	0.0252
1-2 Входной втулочный радиус	0.21005
1-21 Координата X	0
1-3 Выходной наужный радиус	0.40445
1-31 Координата X	0.07325
1-4 Выходной втулочный радиус	0.24375
1-41 Координата X	0.10205
1-5 Распределение хорды по радиусу	horda
1-6 Распределение входного лопаточного угла по радиусу	beta1l
1-7 Распределение выходного лопаточного угла по радиусу	beta2l
1-8 Число лопаток	30
1-9 Соотношение a/b (распределение)	ab
1-91 Распределение t/c	tc
1-92 Поправка на правило Картера	carterr
1-93 Тип профиля	3
2**********ВНА**********	1
2-1 Угол установки ВНА	90
3**********Признаки**********	1
3-1 Признак рисования характеристики ступени (1-да, 0-нет)	0
3-2 Признак осреднения давления	1
3-3 Расчет по методике Scobeiri (1-да, 0-нет)	0
3-4 Расчет по методике Lieblein (1-да, 0-нет)	1
3-5 Учет волновых потерь (1-да, 0-нет)	1
3-6 Признак расчета угла отставания (1 - Howell, 2 - Carter)	2

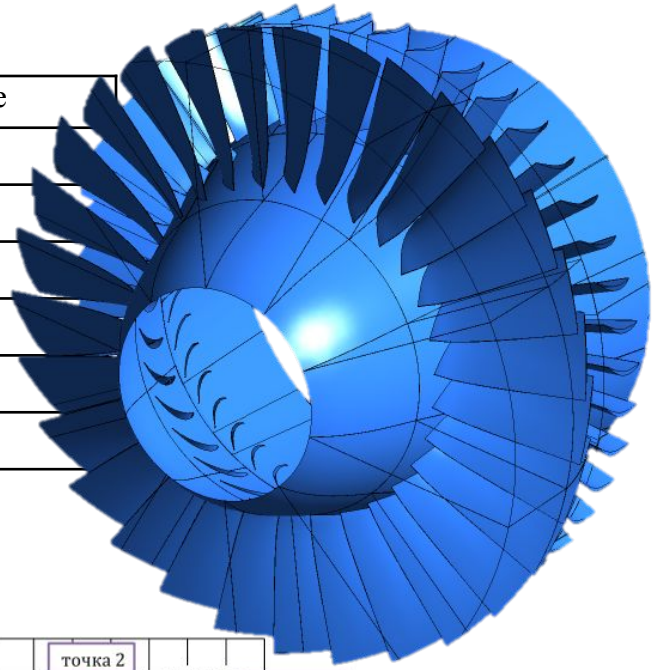
Исходные данные при расчете РК в СИМ COMPRESSOR_2D

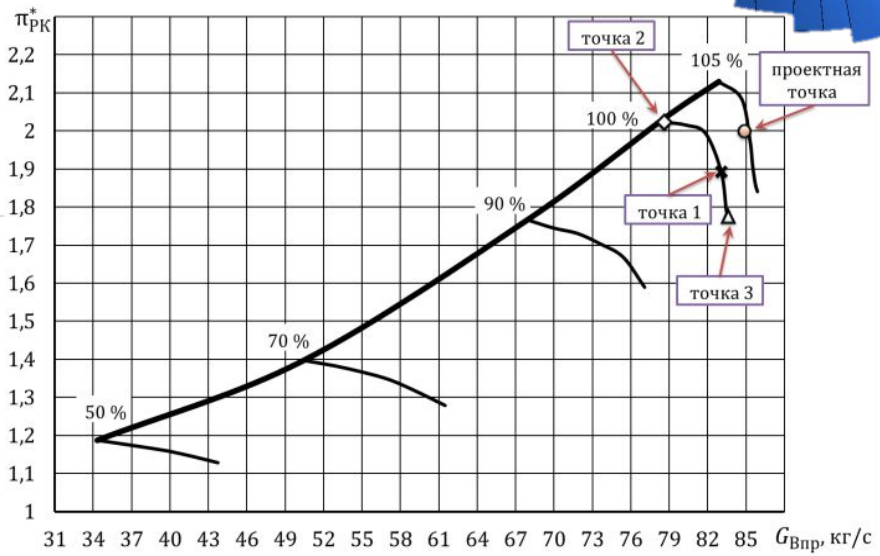
ВЕРИФИКАЦИЯ 2D ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА. ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ СТУПЕНИ



Чертеж меридионального сечения ступени

Параметр	Значение
$G_В$, кг/с	84,867
n, об/мин	11110
$\pi^*_{РК}$	2,000
$\eta^*_{РК}$	0,887
$\pi^*_{СТ}$	1,936
$\eta^*_{СТ}$	0,842

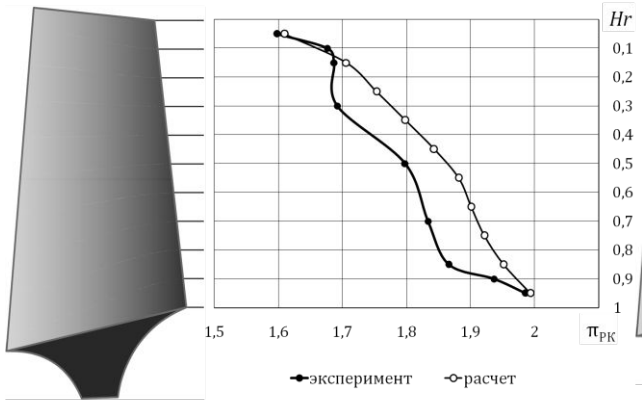




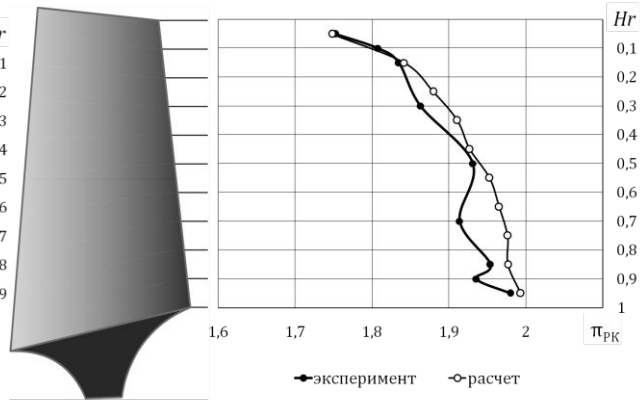
Характеристика рабочего колеса

ВЕРИФИКАЦИЯ 2D ПРЯМОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ОСЕВОГО КОМПРЕССОРА

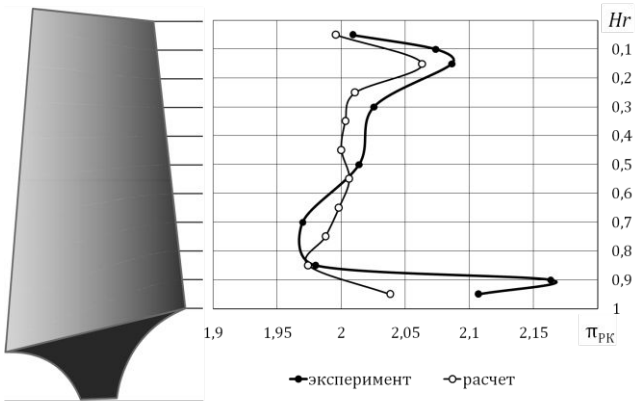
Зона запирания (Точка 3)



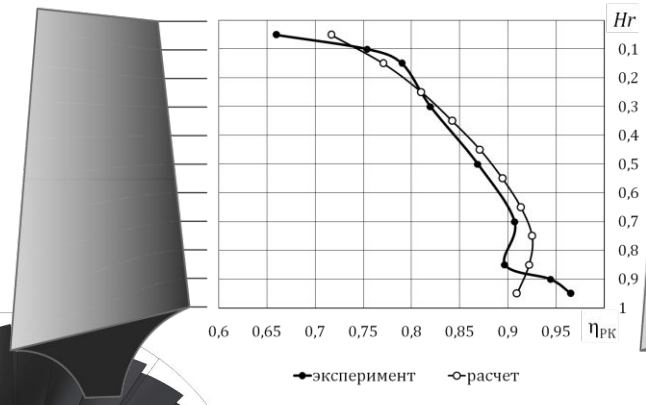
Зона устойчивой работы (Точка 1)

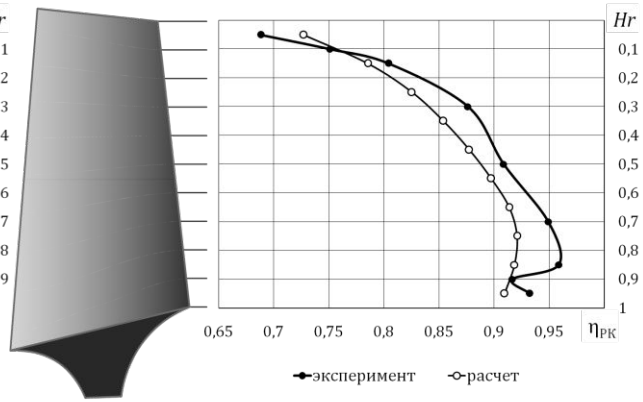


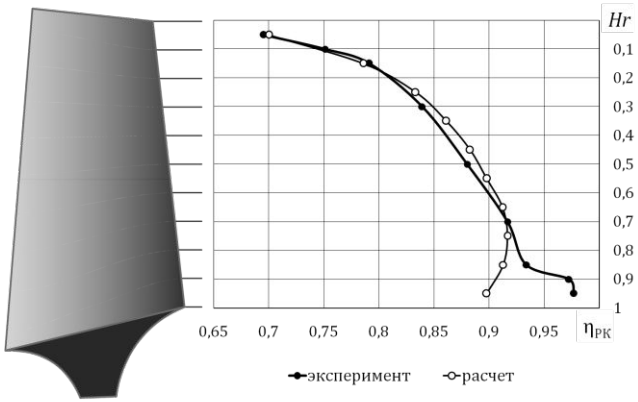
Граница устойчивой работы (точка 2)



Радиальное распределение степени повышения давления в РК

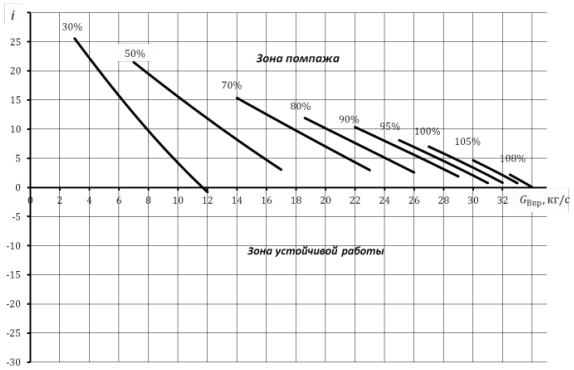




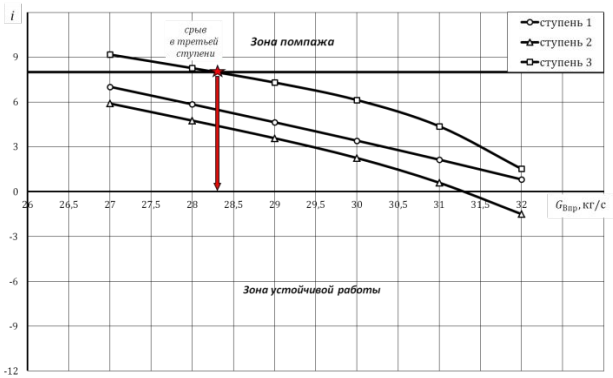


Радиальное распределение КПД в РК

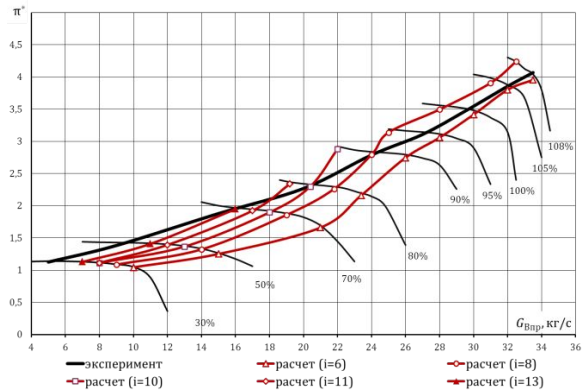
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ (1D)



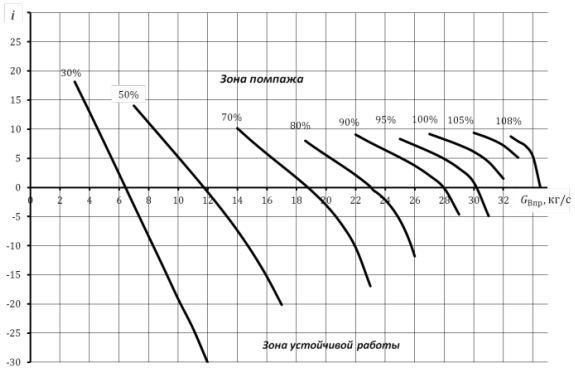
а



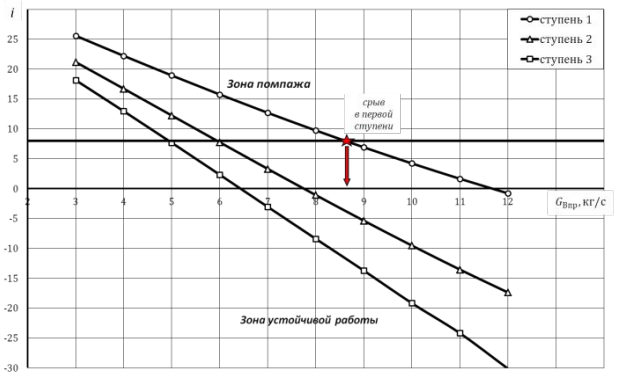
в



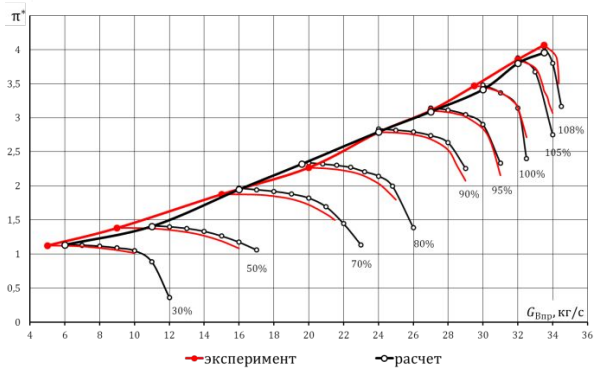
д



б



г



е

Зависимости углов атаки от расхода на разных частотах для первой (*а*) и третьей (*б*) ступени

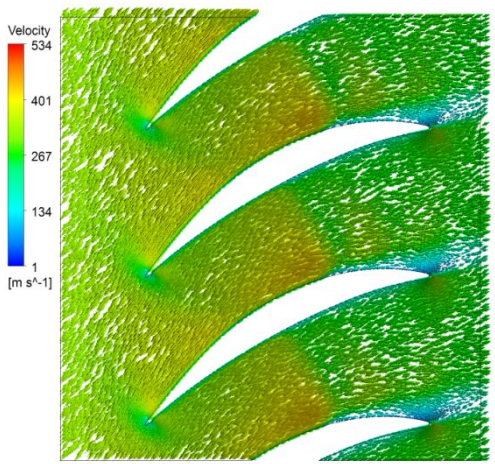
Зависимости углов атаки от расхода для низконапорных (*в*) и высоконапорных (*г*) веток

Сравнение границ устойчивости с различными критическими углами атаки (*д*) и расчетной и экспериментальной характеристик при дискретном задании критического угла атаки на каждой ступени (*е*)

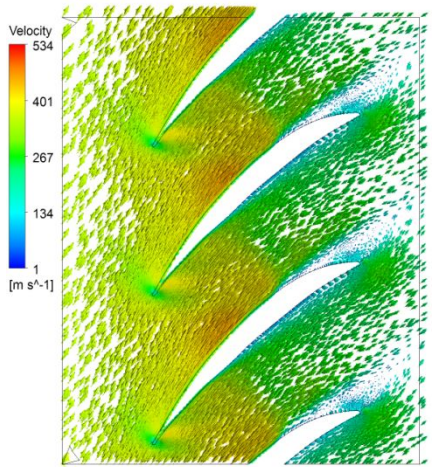
МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦЫ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ (2D)

$$\left(\frac{i-i_{ref}}{\varepsilon_{ref}}=0{,}2\right)$$ зарождение срывных зон на спинке профиля

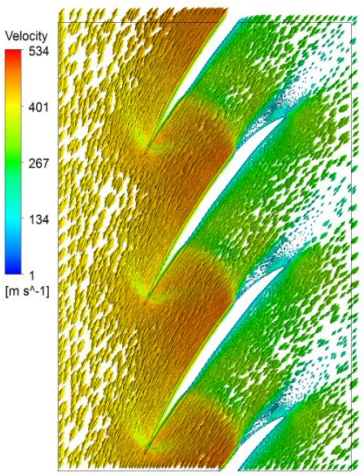
$$\left(\frac{i-i_{ref}}{\varepsilon_{ref}}=0{,}4\right)$$ развитый срыв потока со спинки профиля



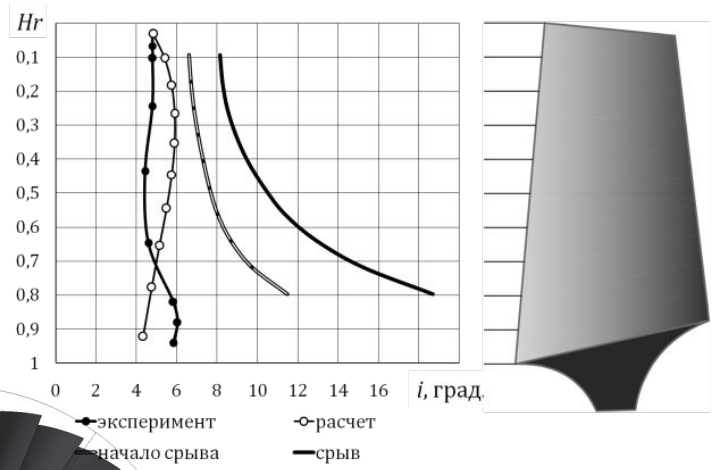
Устойчивое течение



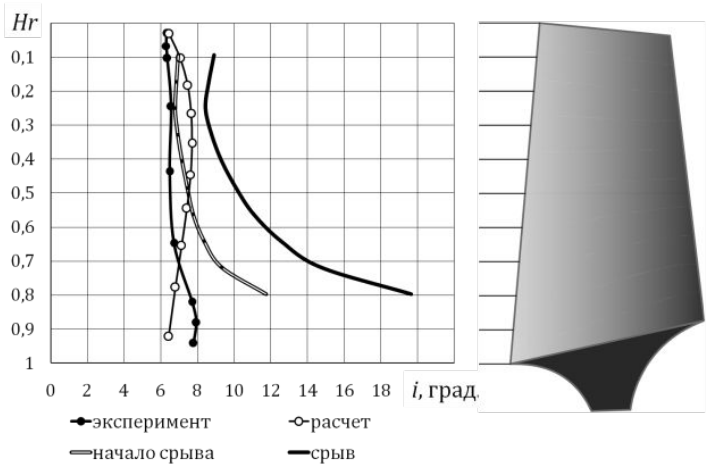
Начало срыва



Срыв

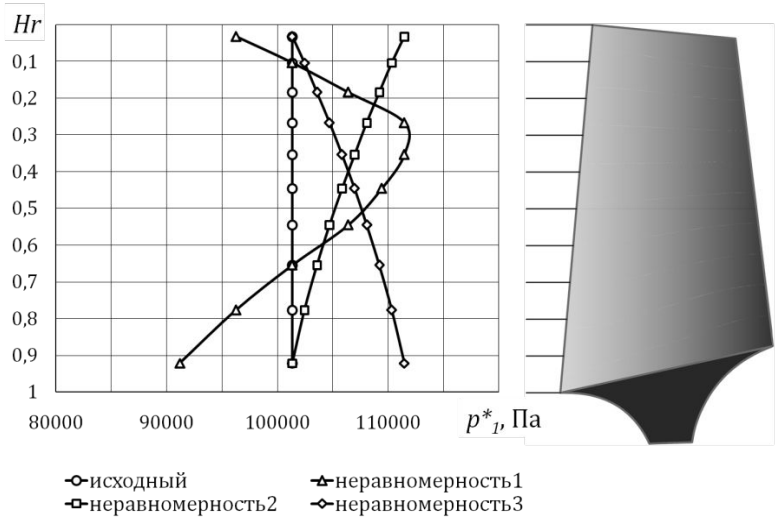


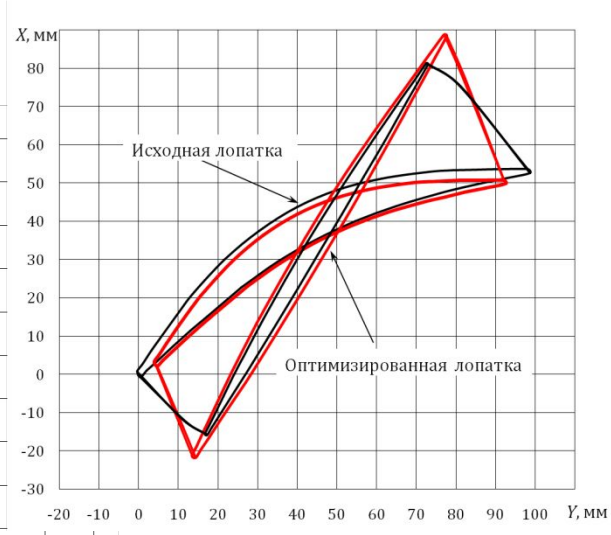
Радиальное распределение углов атаки в РК в устойчивой зоне

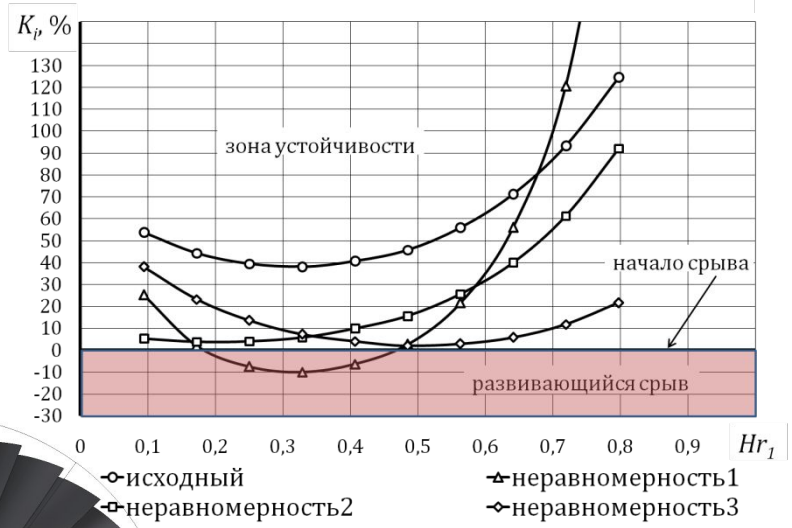


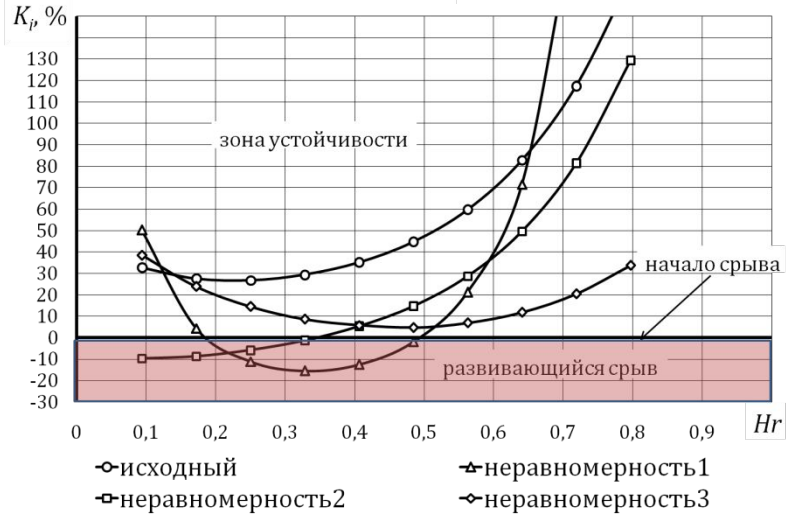
Радиальное распределение углов атаки в РК на границе устойчивости

ОПТИМИЗАЦИЯ ЛОПАТОЧНЫХ ВЕНЦОВ









- По результатам проведенных исследований авторами опубликовано 64 печатных работы, в том числе 13 работ в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией РФ для публикации основных результатов диссертационных исследований на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук и 1 методическое указание для проведения лабораторных работ.
- Получено 3 свидетельства о регистрации программных продуктов для ЭВМ РОСПАТЕНТА РФ на системы имитационного моделирования DVIG_DISTORTION (№2010612065), COMPRESSOR (№ 2009612688), COMPRESSOR_2D(№2011611711).