



**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**



**additive
MINDED**

О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства

Москва, 25.01.2022

Докладчик: к.т.н., Dr.-Ing., доц. Михаил А. Петров

Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»





**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

СОДЕРЖАНИЕ

- 1) Примеры геометрической оптимизации изделия
- 2) Применение методов планирования экспериментов для решения задач геометрической оптимизации изделия
- 3) О методе многофакторного планирования эксперимента
- 4) Задача о геометрической оптимизации изделия «Рычаг» в программах Altair sT Inspire и HyperStudy



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

Altair
HyperWorks[®]
OptiStruct[™]



примеры геометрической оптимизации

кронштейн
звёздного датчика



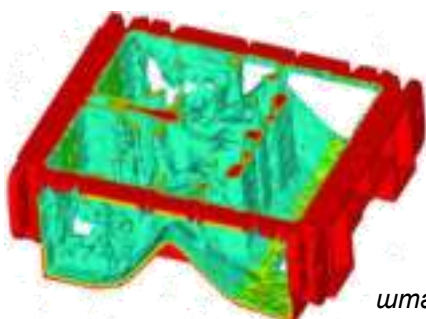
поворотный кулаг
подвески гоночного а/м



кабина тягача



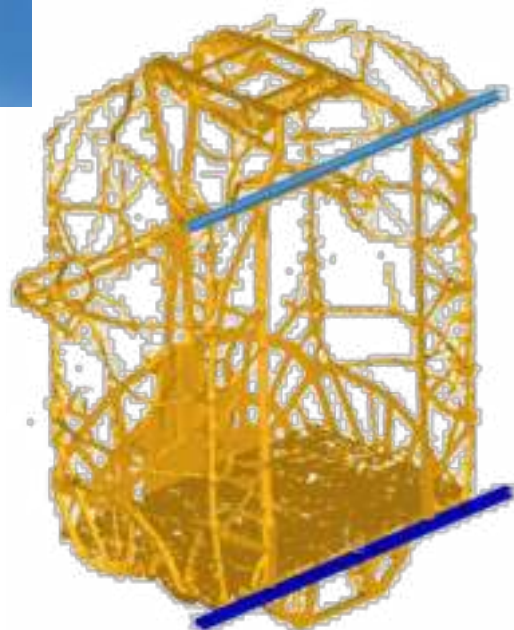
башня



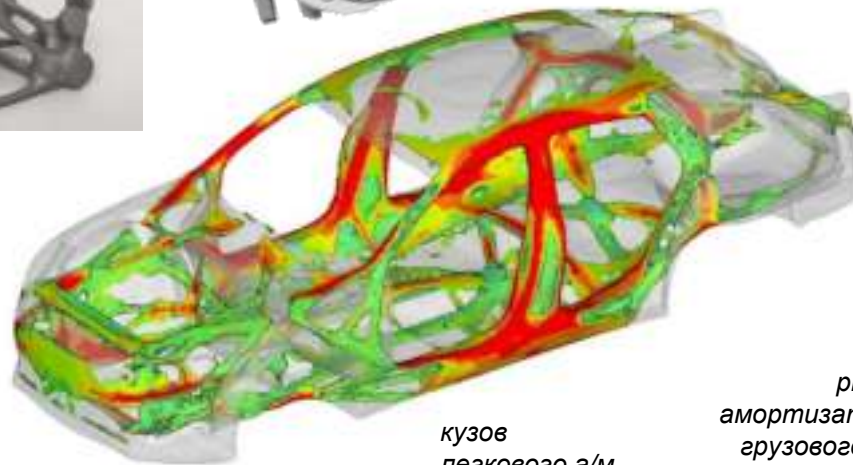
штамп



скейтборд

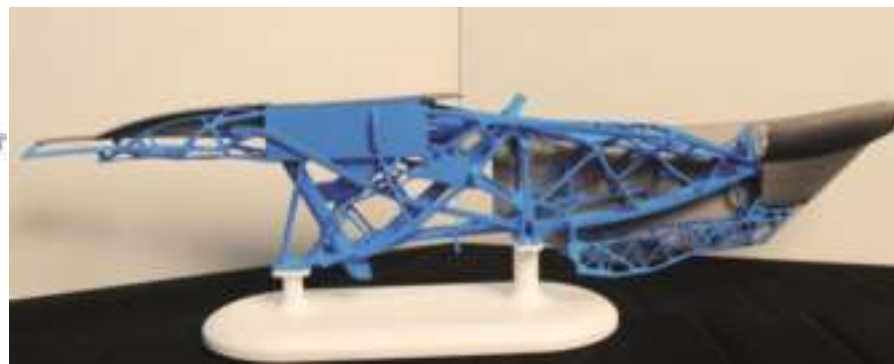


лифтовая кабина



кузов
легкового а/м

рычаг
амортизатора
грузового а/м



пилон двигателя самолёта



рычаг велосипедной рамы



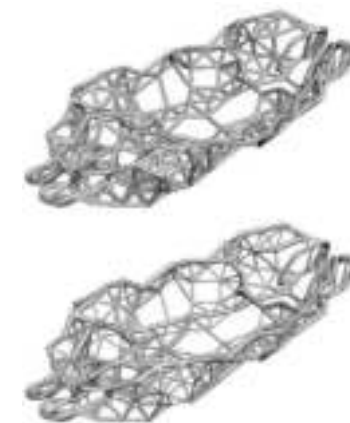
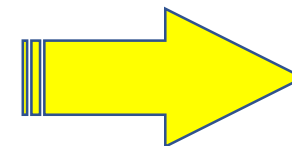
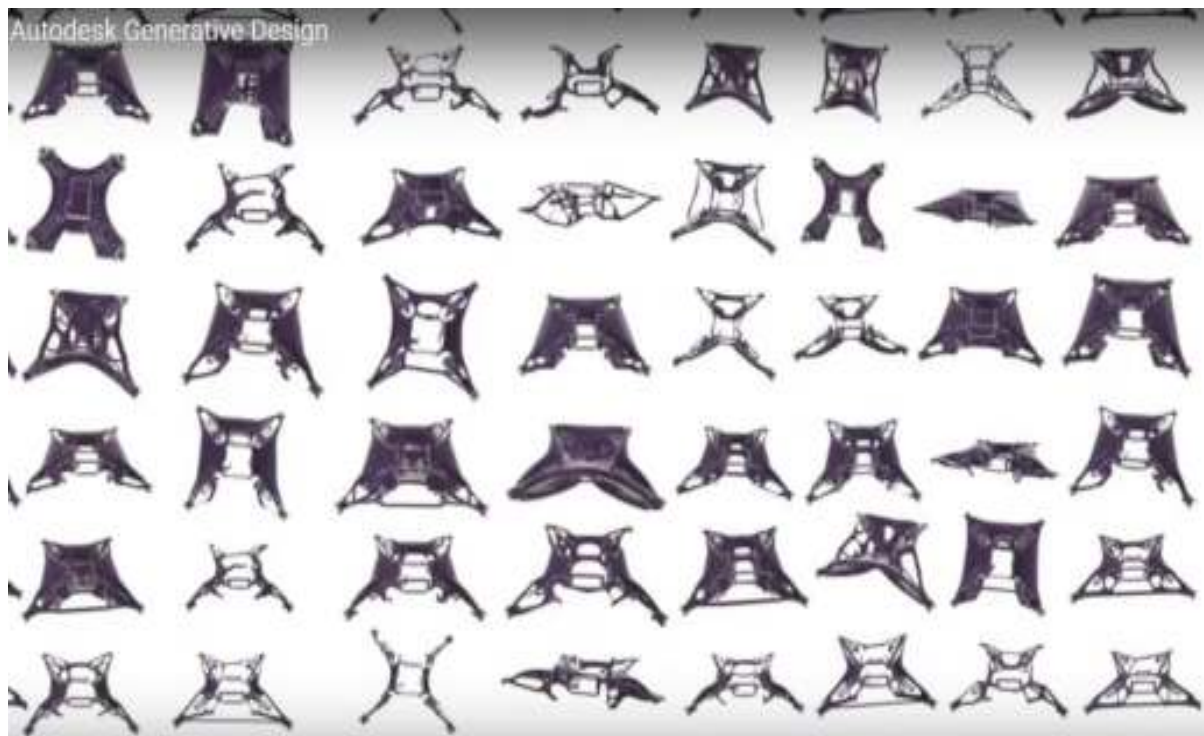
**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**



**О задачах геометрической оптимизации для аддитивного
производства, конференция «Additive Minded»
в рамках выставки «Интерпластика 2022»
ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022**



Autodesk Generative Design



топологическая оптимизация

размерная оптимизация

Источник 1: <https://www.youtube.com/watch?v=CtYRfMzmWFU>

Источник 2: <https://www.autodesk.com/research/projects/project-dreamcatcher>



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022



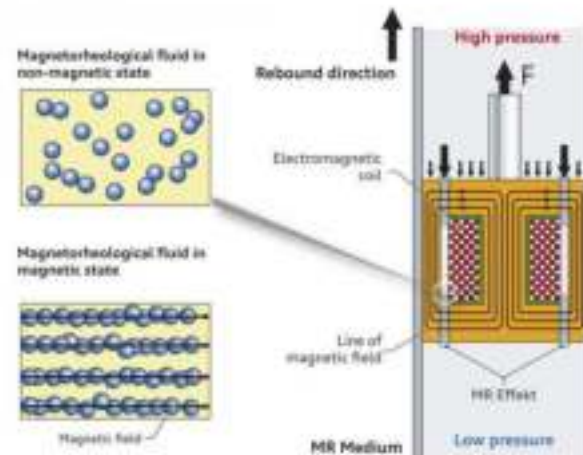
мечты о легко формоизменяемых (трансформируемых) (мета)материалах

кадры из кинофильма «Полёт навигатора» (1986 года)

магнитореологические жидкости



демпфер адаптивной подвески а/м



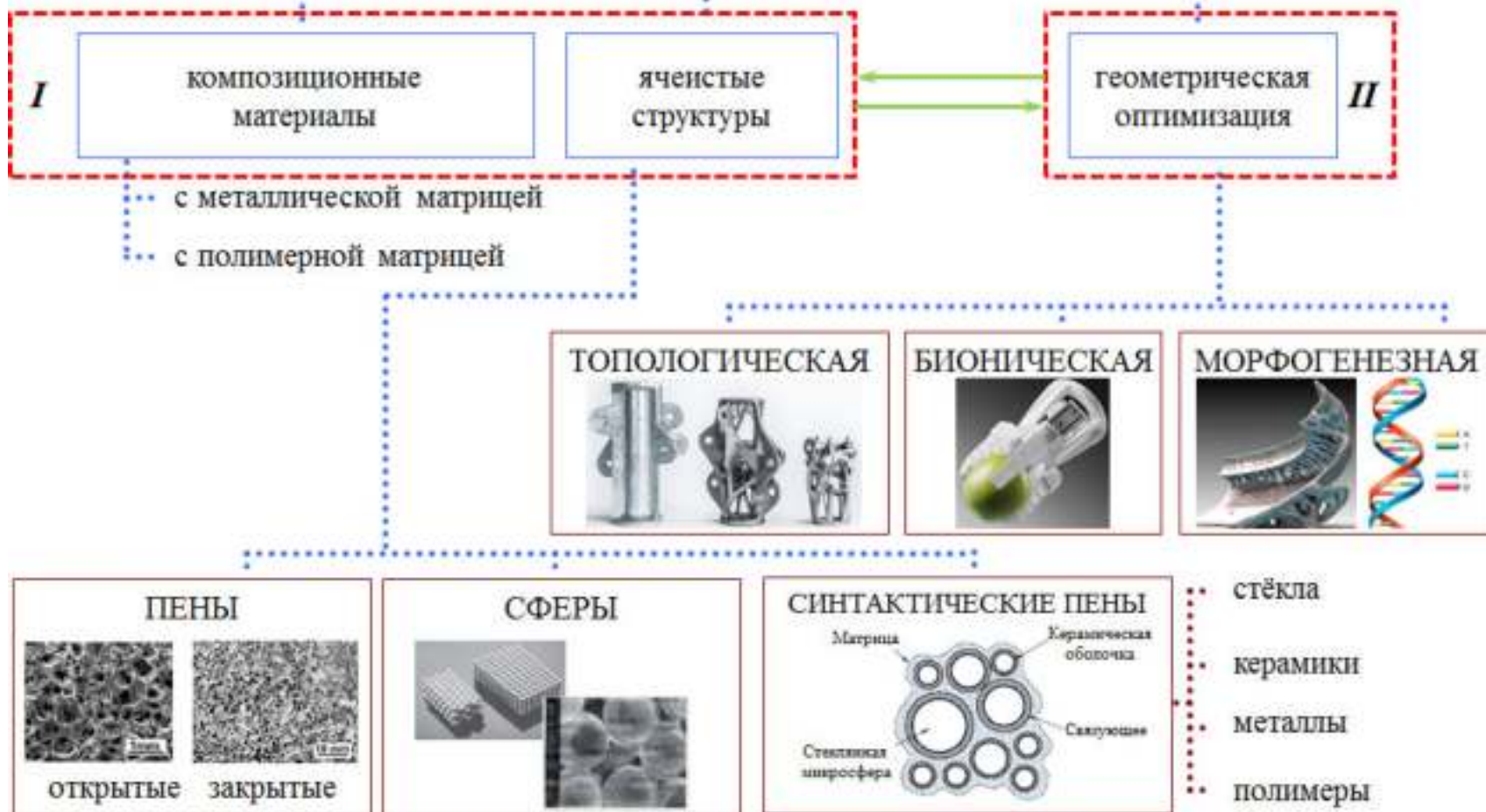
требуют наличия внешнего воздействия!!!

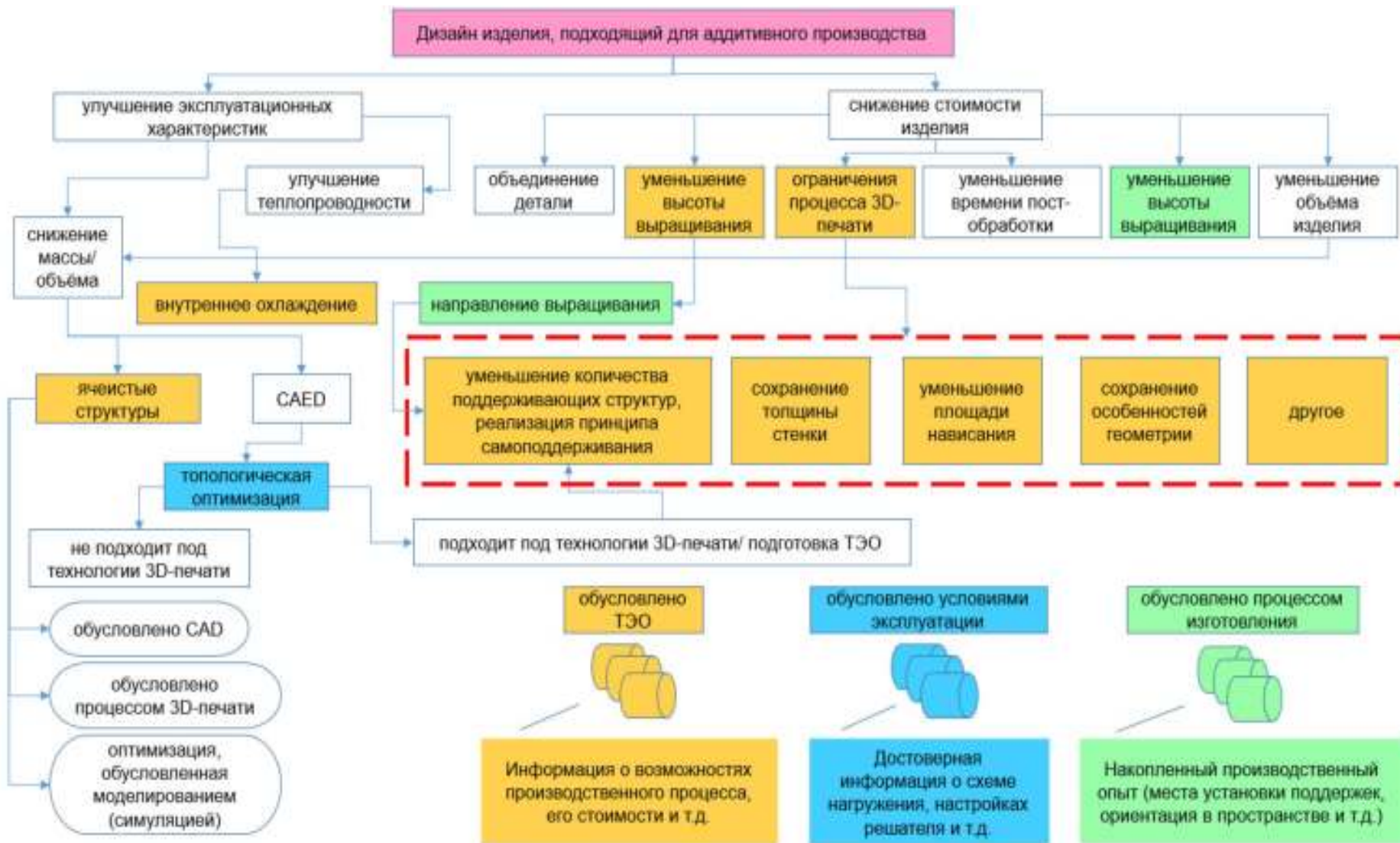
Источник: <https://www.carthrottle.com/post/how-do-adaptive-suspension-systems-work/>



ОБЛЕГЧЁННЫЕ КОНСТРУКЦИИ ДЕТАЛЕЙ

**ОСНОВНЫЕ
направления работ
и исследований по
снижению веса
изделий**





**схема
перепроектирования
изделий с целью
улучшения
эксплуатационных
характеристик
(инновации) или
снижения стоимости
(экономика)**



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

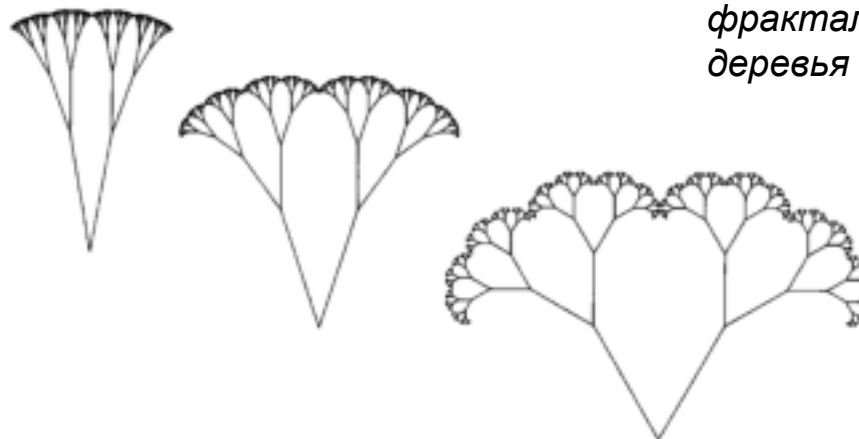


О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

Примеры ячеистой оптимизации в архитектуре



капуста брокколи



фрактальные зонтичные деревья и кроны

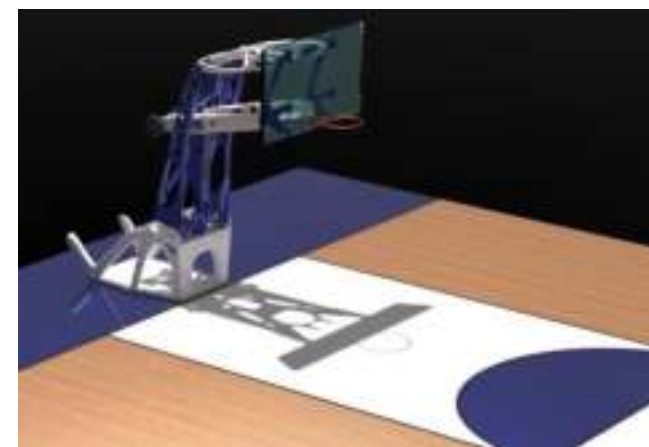


дебаркадер витебского вокзала
(г. Санкт-Петербурга)

Пример топологической оптимизации в машиностроении и спорте



буксировочный крюк
грузового а/м

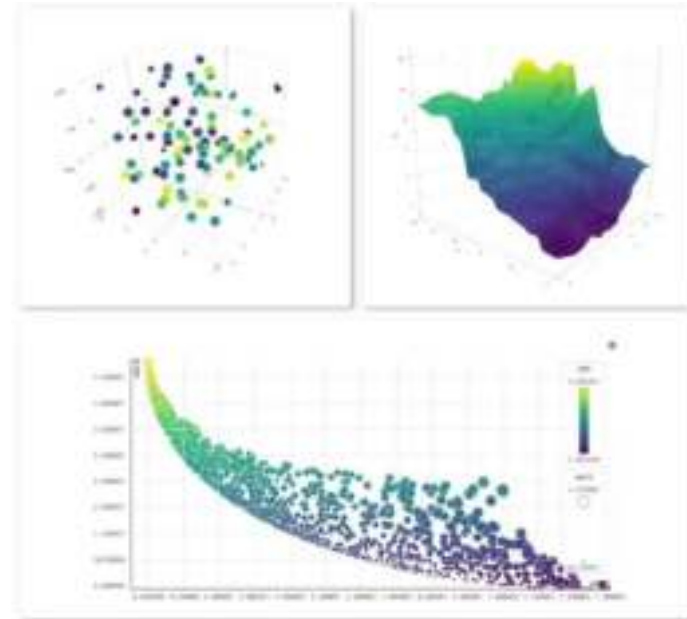


баскетбольная стойка под кольцо

оптимизация с DoE

modeFRONTIER

интеграция инструментов планирования экспериментов с топологической оптимизацией



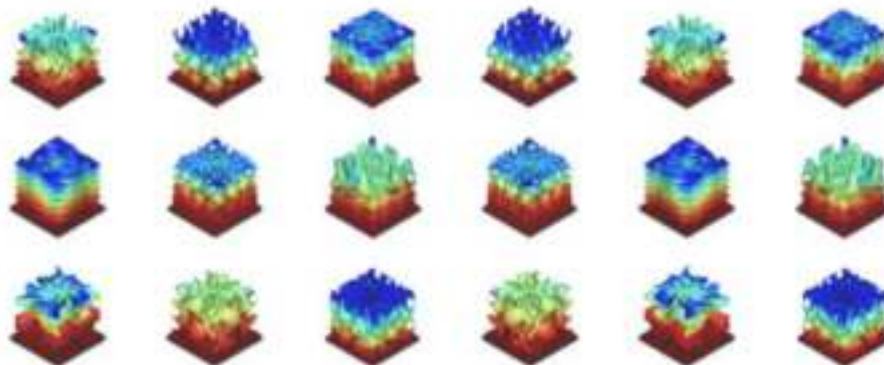
Источник: <https://engineering.esteco.com/>

nTopology

Мультифизическая оптимизация & DoE

Систематическое изменение области проектирования на основании статистических методов автоматического планирования экспериментов.

Источник: <https://ntopology.com/design-automation-software/>





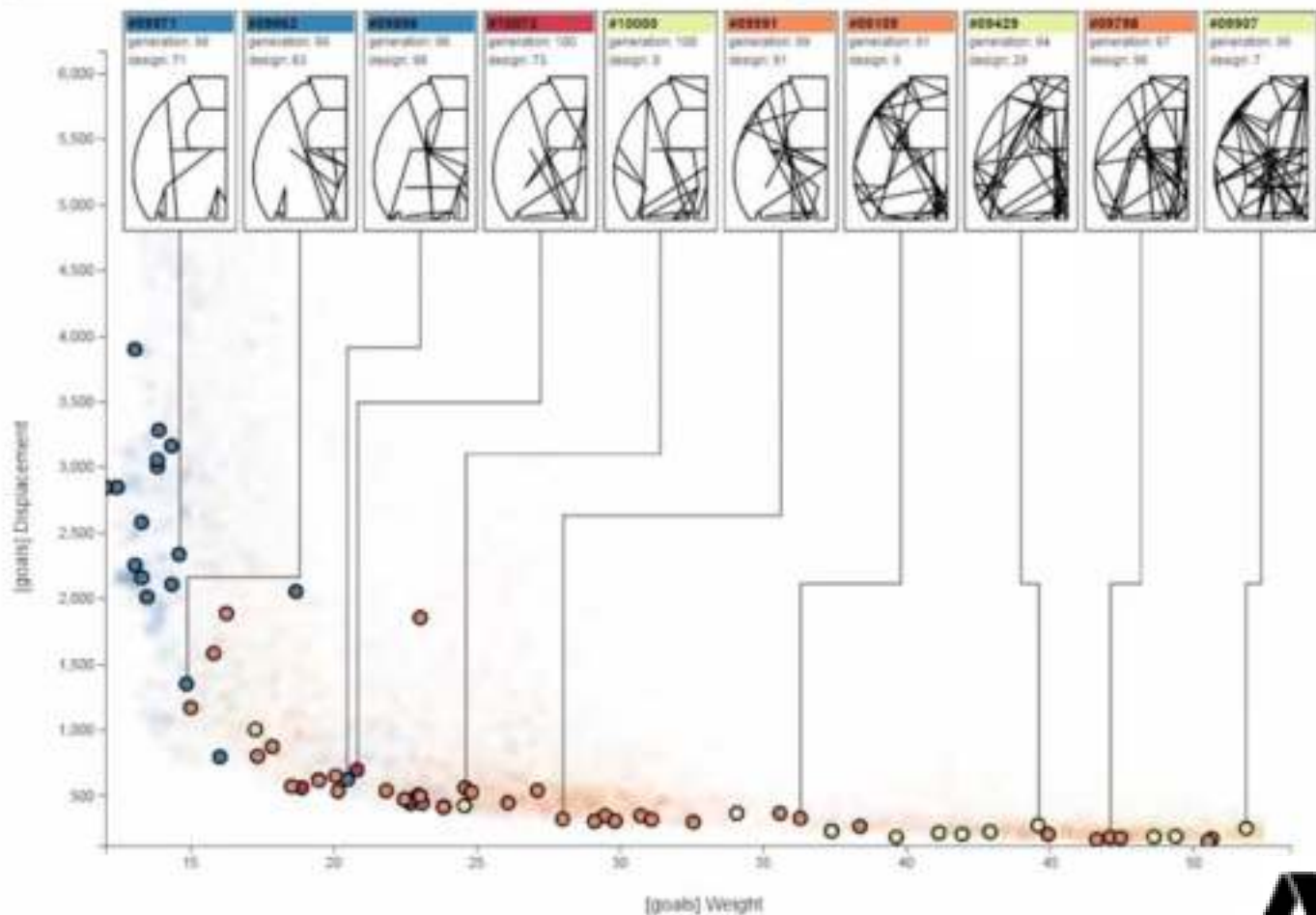
**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

Regenerate Input/Output Time/Cluster Pareto Designs Show/Hide Isolate X-axis: Weight Y-axis: Displacement

оптимизация с DoE



Платформа Dreamcatcher представляет собой целенаправленное проектирование (Goal-Directed Design) геометрической формы с применением искусственного интеллекта (Artificial Intelligence).



Источник 1: <https://www.youtube.com/watch?v=CtYRfMzmWFU>
 Источник 2: <https://www.autodesk.com/research/projects/project-dreamcatcher>



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



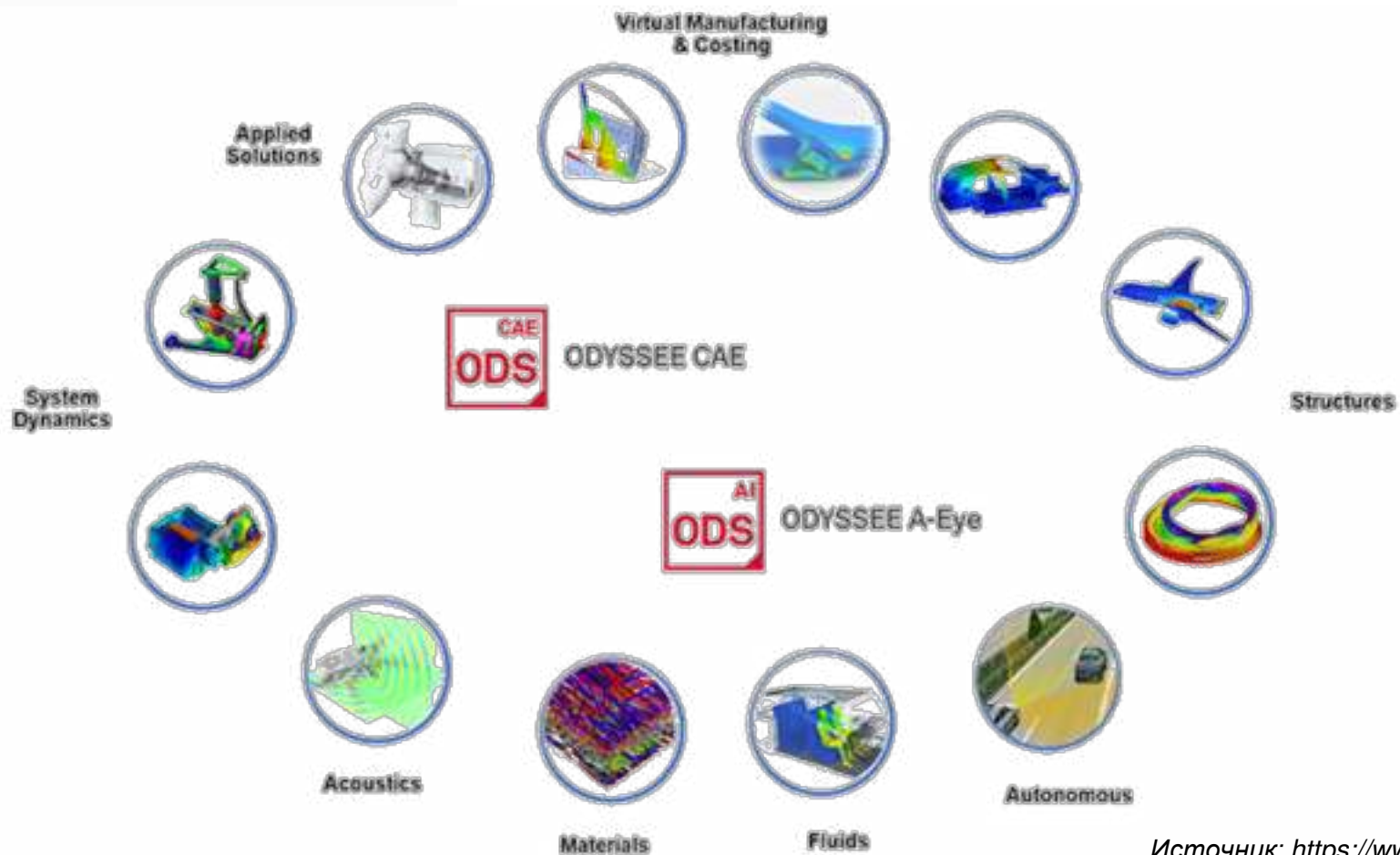
О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022



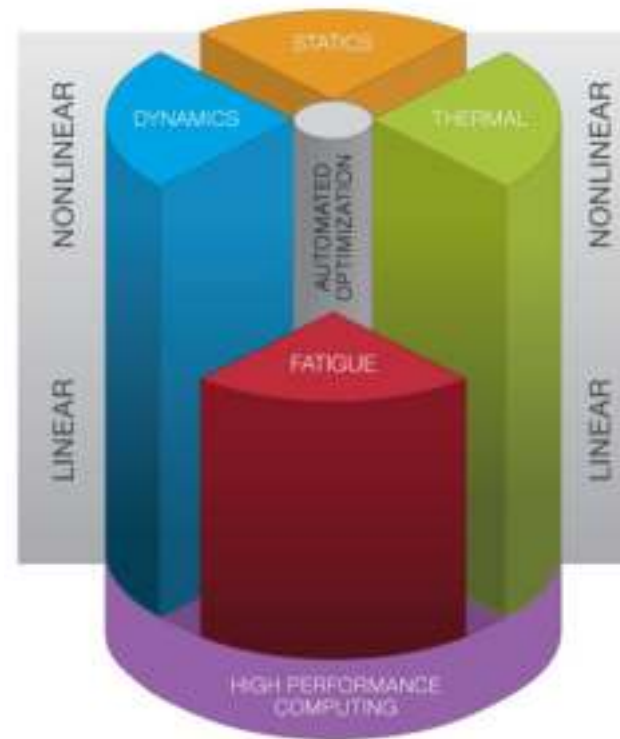
HEXAGON

MSC Software is Hexagon

оптимизация с DoE



MSC Nastran™





МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

оптимизация с DoE

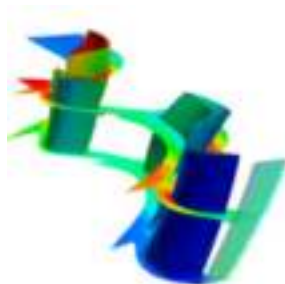
DATAADVANCE



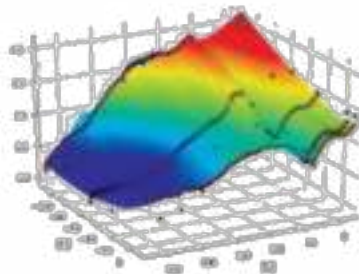
данные низкой точности
(предварительное CAE-моделирование)



данные высокой точности
(экспериментальные измерения)



CAD-модель

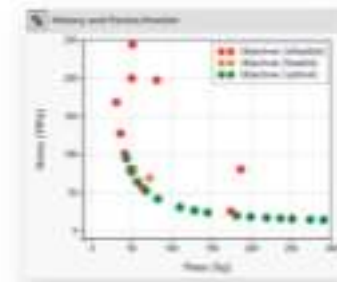


построение предсказательной модели по данным разной точности

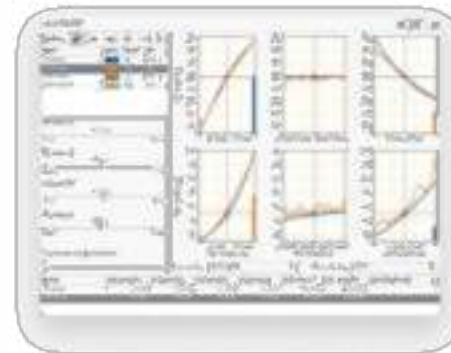


\vec{x}
 \vec{f}

факторы и отклики



Парето-диаграмма



прогнозирование откликов для новых вариантов исполнения конструкции





МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

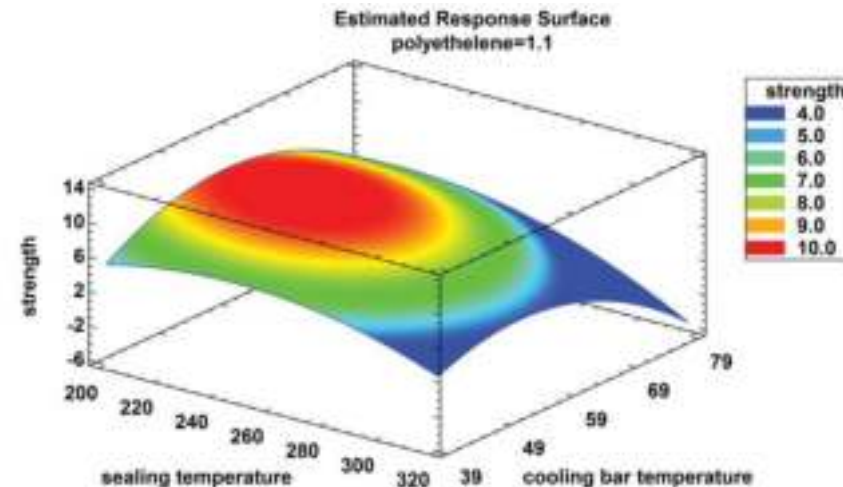
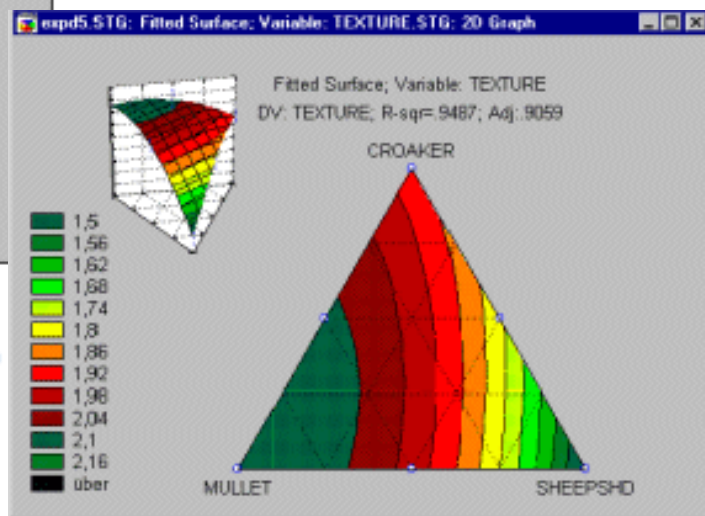
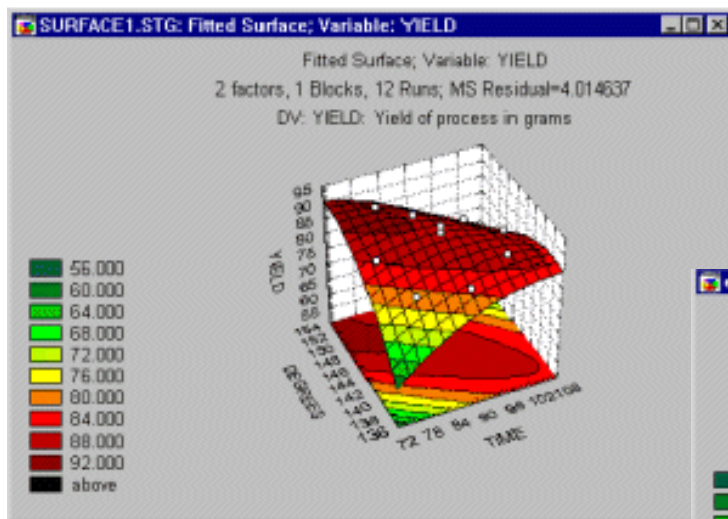


О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

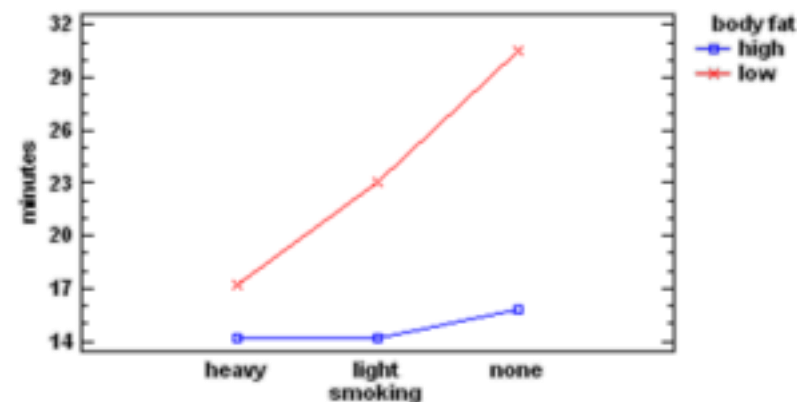
оптимизация с DoE

специализированное ПО по статистическому анализу и обработке данных (data science & analysis)

statgraphics 19^{centurion}



Interaction Plot



StatSoft STATISTICA TIBCO



Полный факторный эксперимент (ПФЭ или full factorial) – это эксперимент, в котором реализуются все возможные, неповторяющиеся комбинации уровней факторов.

варьируемые параметры

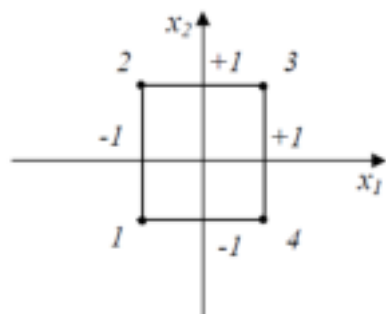
уровни

k	2	3	4
p	2	3	4
2	4	8	16
3	9	27	81
4	16	64	256

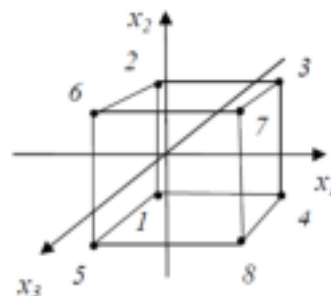
КОЛИЧЕСТВО ОПЫТОВ:

$$N = p^k$$

$p = 2$ (двухмерное пространство)



$p = 3$ (трёхмерное пространство)



$p = n$ (n-мерное пространство)

графическая
интерпретация
отсутствует

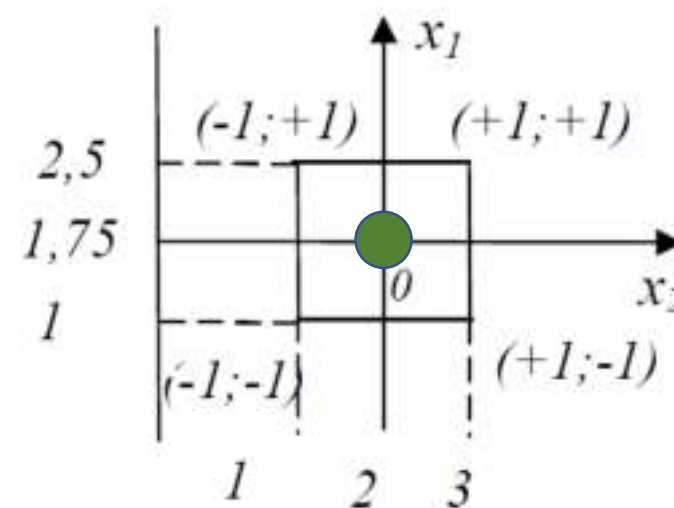
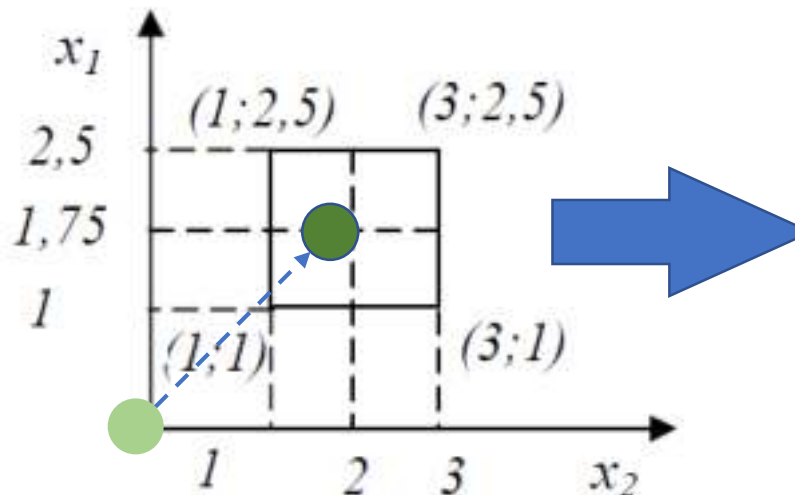


определение уровней варьирования

нормирование по ЦТП

Произведения X_1X_2 , X_1X_3 , X_2X_3 представляют эффект взаимодействия первого порядка; формулой числа сочетаний:

$$C_k^m = \frac{k!}{m!(k-m)!}$$



Алгоритм нахождения уравнения регрессии (кратко):

определяют дисперсию параллельных опытов \Rightarrow вычисляют отношение максимальной дисперсии к сумме всех дисперсий (критерий Кохрена) \Rightarrow определяют числа степеней свободы \Rightarrow выбирают уровень значимости; находят по таблицам критическое отклонение G_T \Rightarrow сравнивают величины G и G_T и если $G \leq G_T$, то дисперсия однородна \Rightarrow ошибка всего эксперимента \Rightarrow расчет коэффициентов регрессии и проверка их значимости \Rightarrow расчет ошибок коэффициентов \Rightarrow нахождение значения F-критерия Фишера и если $F \leq F_T$, то математическое описание функции отклика уравнением регрессии считается адекватным.

коэффициенты ур-я регрессии: $b_u = \frac{\sum_{i=1}^N X_{iu} Y_i}{N}$ ($u = 0, 1, 2, \dots, k$) ур-е регрессии: $\tilde{y} = b_0 + \sum_{u=1}^k b_u x_u + \sum_{u \neq j} b_{uj} x_u x_j + \sum_{u \neq j \neq q} b_{ujq} x_u x_j x_q + \dots + b_{uj\dots k} x_u x_j \dots x_k$



матрица планирования эксперимента

задаваемые факторы из интересующей области определения целевой функции

значения целевой функции, получаемые:

экспериментально

компьютерное (имитационные) моделирование

X_1	X_2	$X_1 X_2$	y
+	+	+	y_1
+	-	-	y_2
-	+	-	y_3
-	-	+	y_4

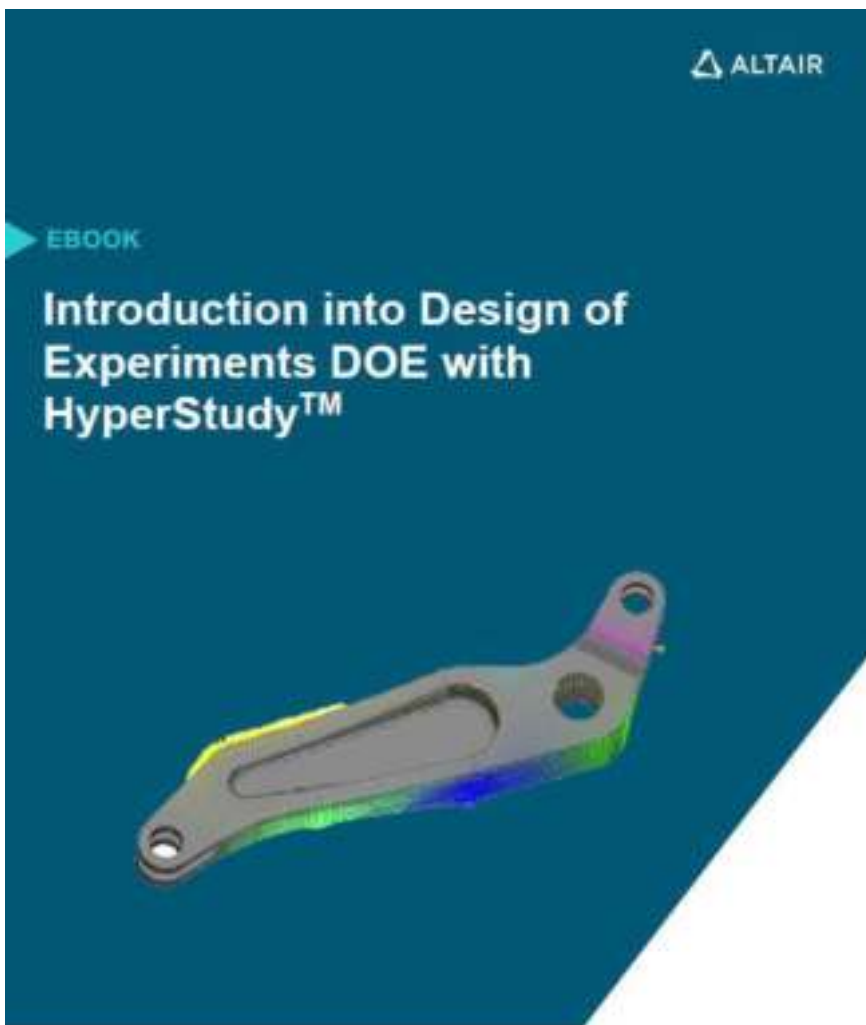
!!!требуется высокий уровень доверия результатам численного моделирования!!!



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022



ALTAIR
UNIVERSITY

Университетская программа

<https://altairuniversity.com/>

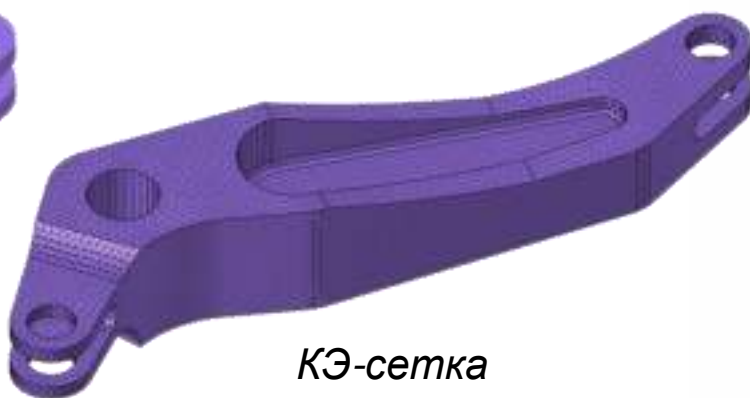
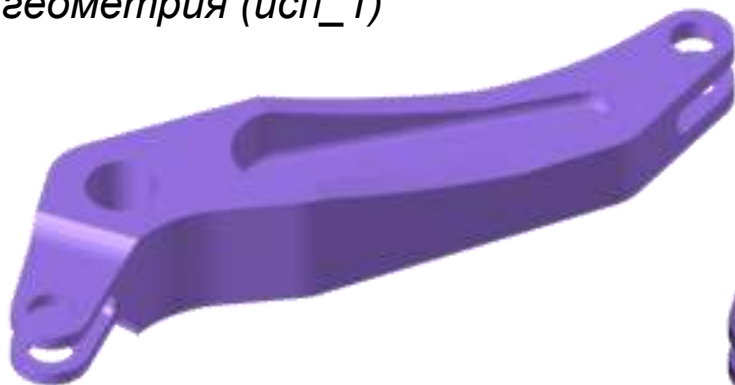


**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

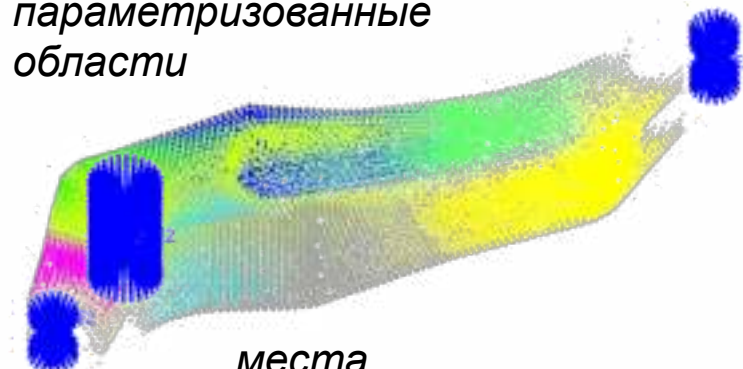


О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

исходная геометрия (исп_1)

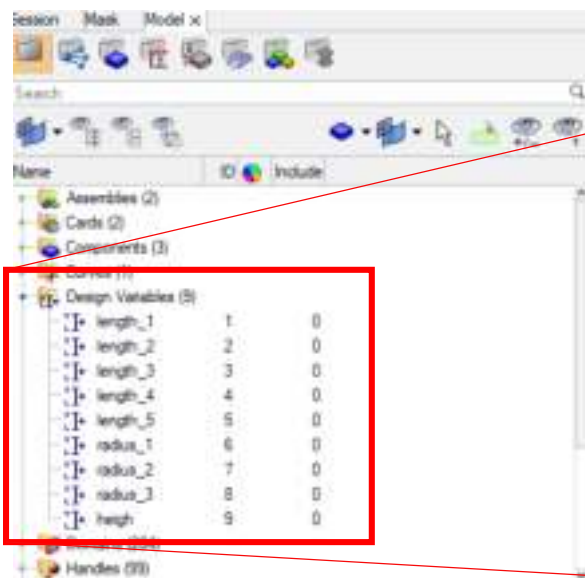


параметризованные области



места нагружения/закрепления (через конекторы)

определённые факторы



Design Variables (9)			
length_1	1	0	
length_2	2	0	
length_3	3	0	
length_4	4	0	
length_5	5	0	
radius_1	6	0	
radius_2	7	0	
radius_3	8	0	
heigh	9	0	

Исходные данные:

макс. объём материала: $1,7667 \cdot 10^6 \text{ мм}^3$
макс. перемещение точки: 1,41 мм
макс. напряжение по Мизесу: 195,29 МПа

Целевые функции:

макс. (избыточный) объём материала
макс. перемещение точки
макс. напряжение по Мизесу

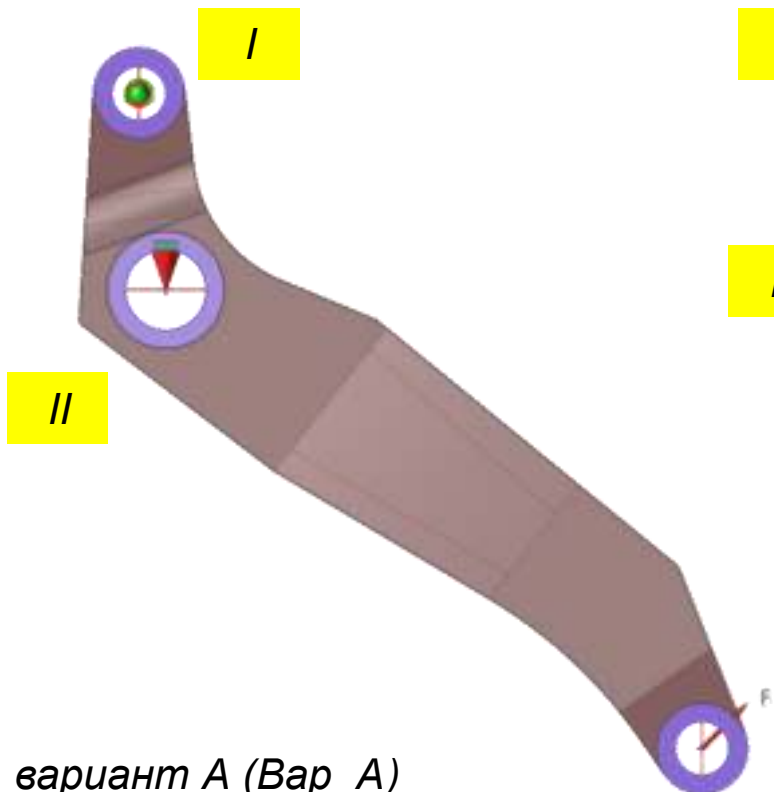


**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**

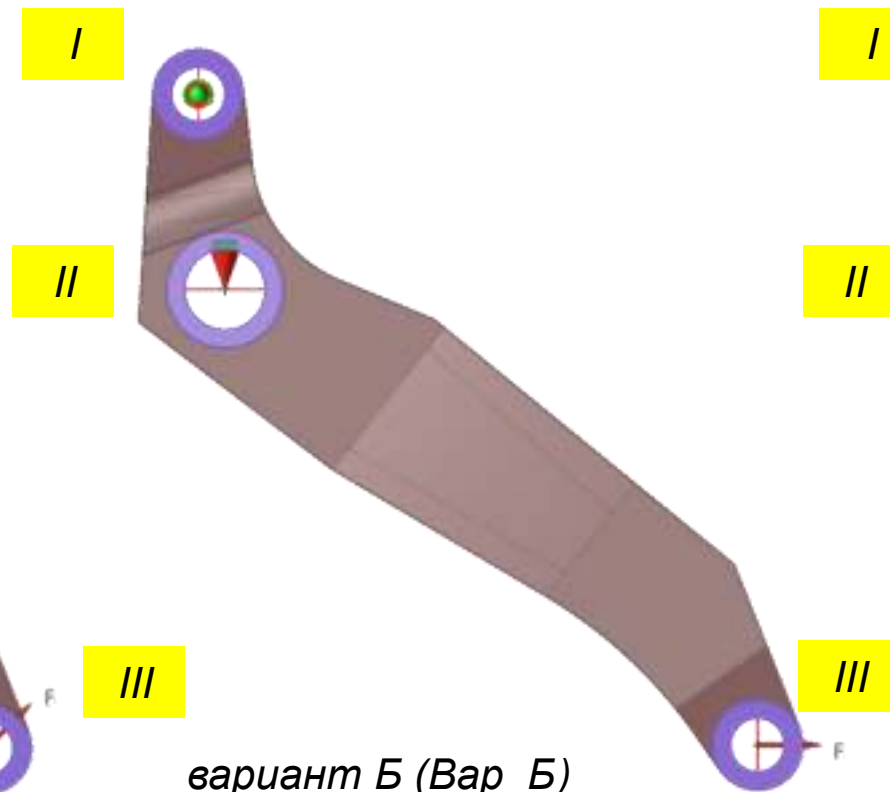


**О задачах геометрической оптимизации для аддитивного
производства, конференция «Additive Minded»
в рамках выставки «Интерпластика 2022»
ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022**

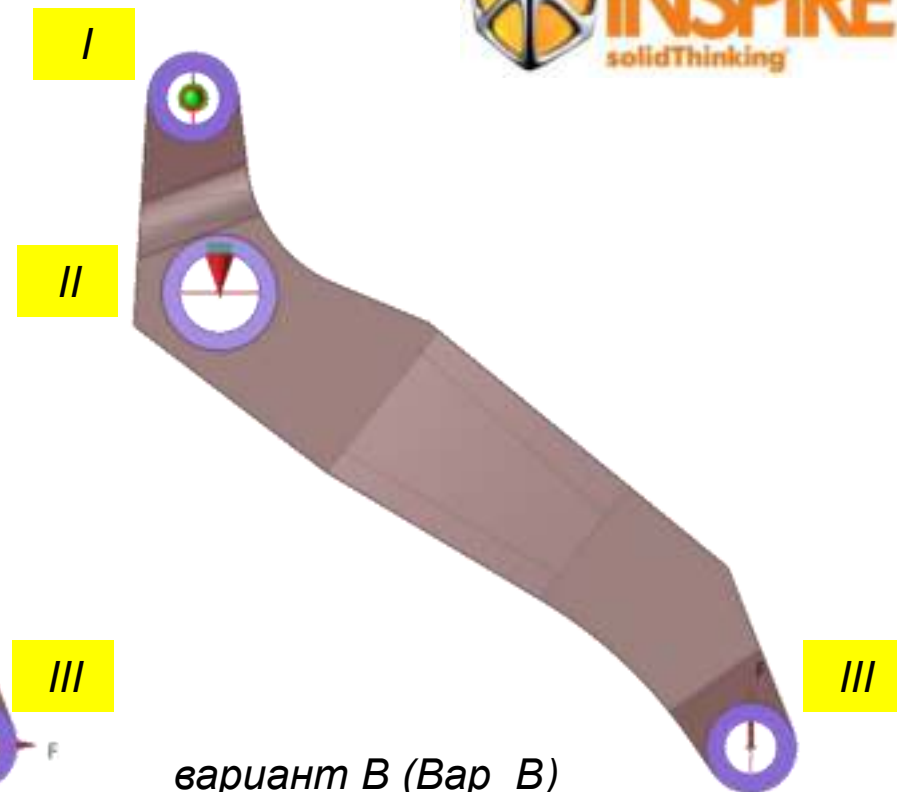
схемы нагружения/закрепления



*вариант А (Var_A)
III – под 45° в плоскости YOZ*



*вариант Б (Var_Б)
III – в направлении +OY*



*вариант В (Var_В)
III – в направлении +OZ*

*I – закрепление 1 (5-ти
подвижная опора)*

*II – закрепление 2
(одноподвижная опора)*

III – место приложения силы

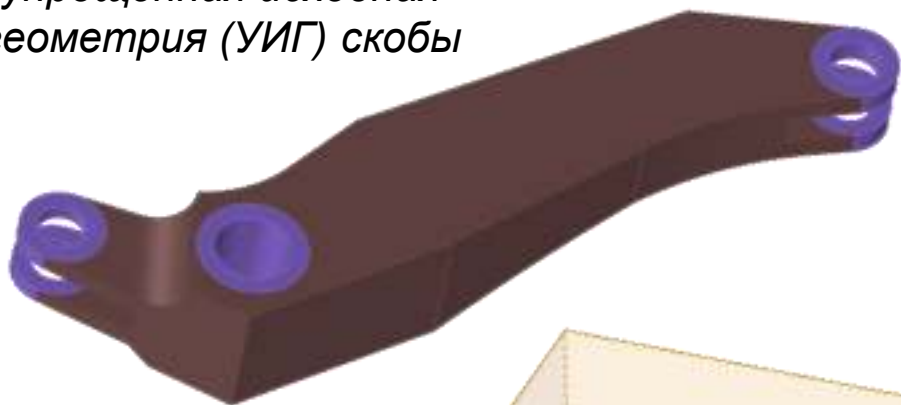


МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

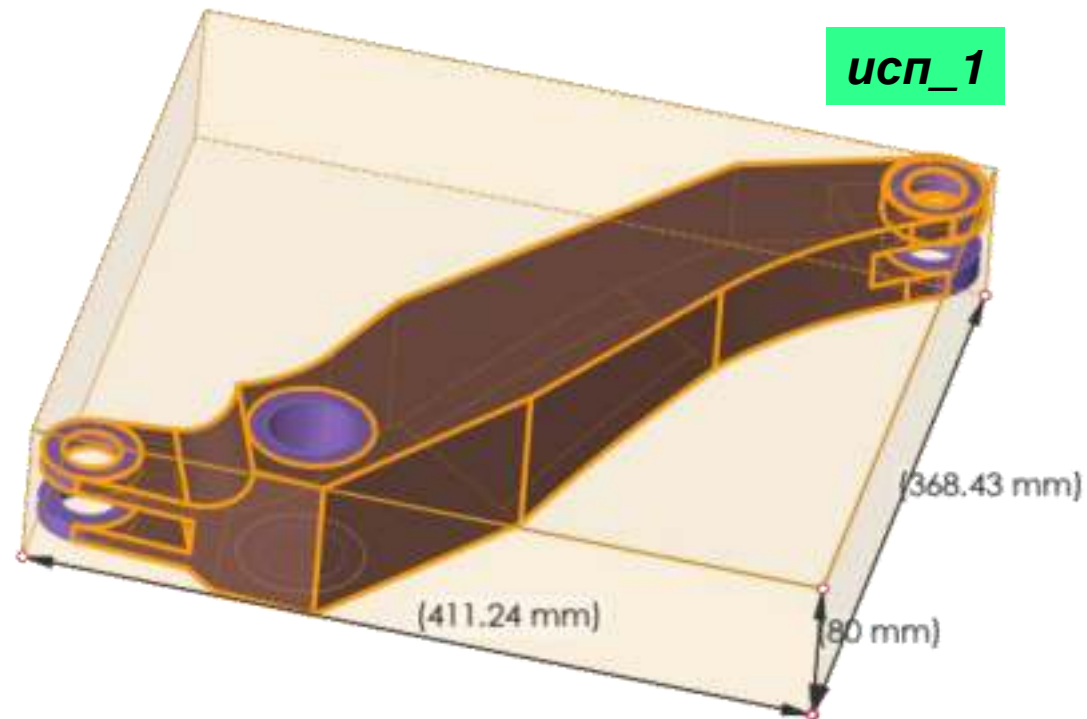


О задачах геометрической оптимизации для аддитивного
производства, конференция «Additive Minded»
в рамках выставки «Интерпластика 2022»
ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

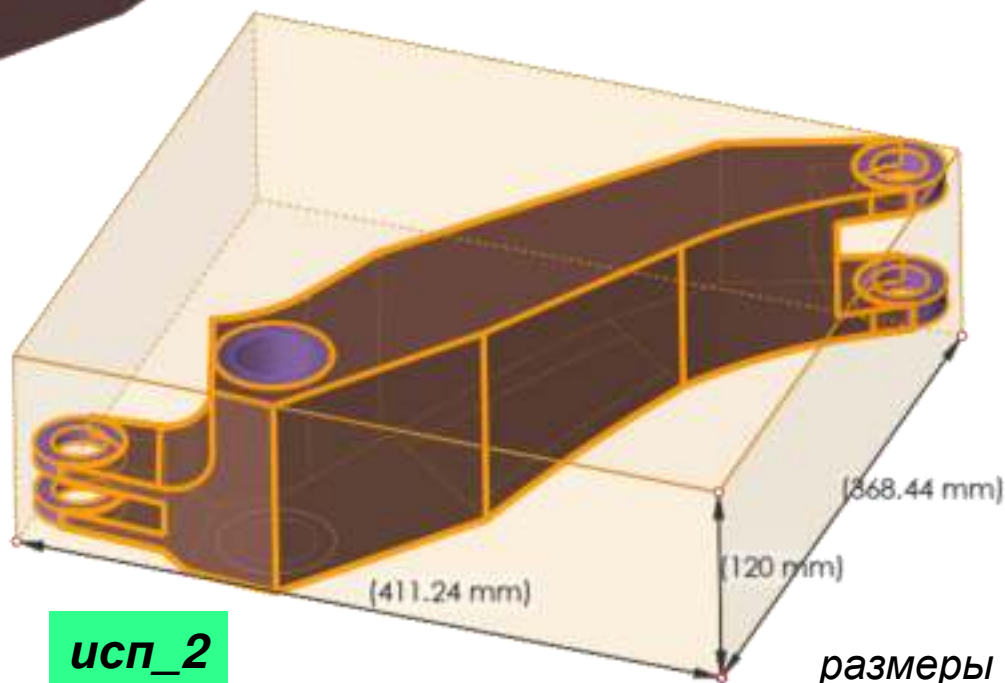
упрощённая исходная
геометрия (УИГ) скобы



исп_1



размеры УИГ скобы (исп_1)



исп_2

размеры изменённой
УИГ скобы (исп_2)

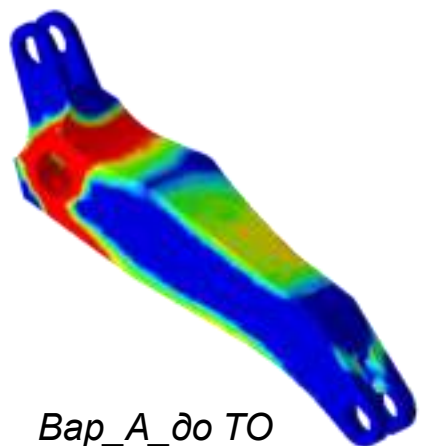
высота скобы
увеличена на 50%



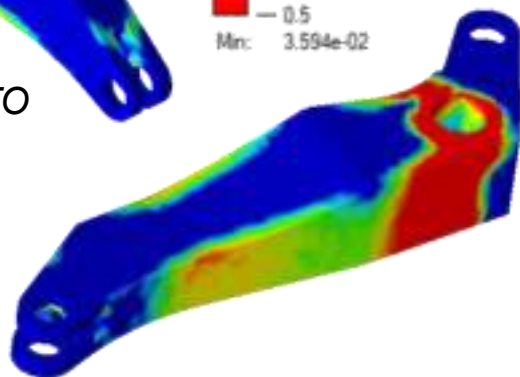
**МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ**



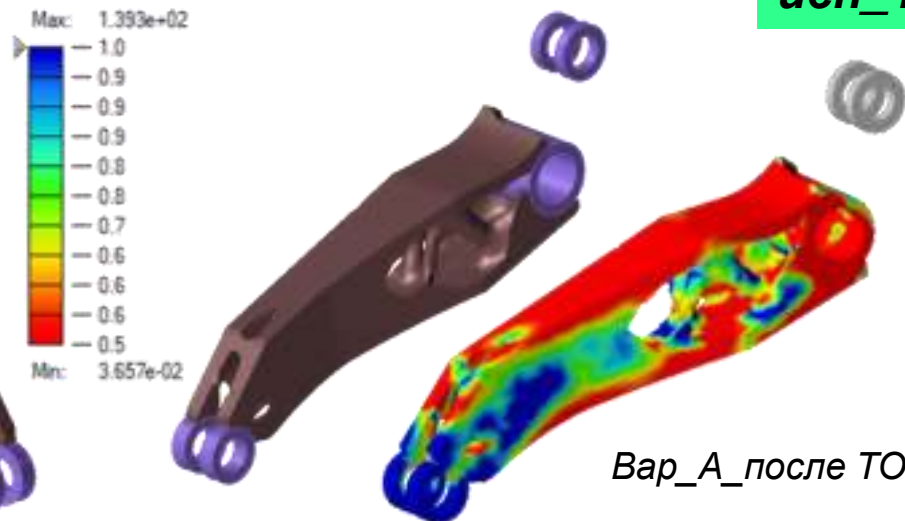
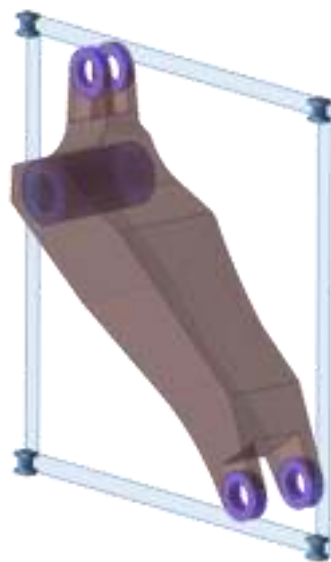
О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022



Var_A_до ТО



Var_A-extr_после ТО



Var_A_после ТО

исп_1

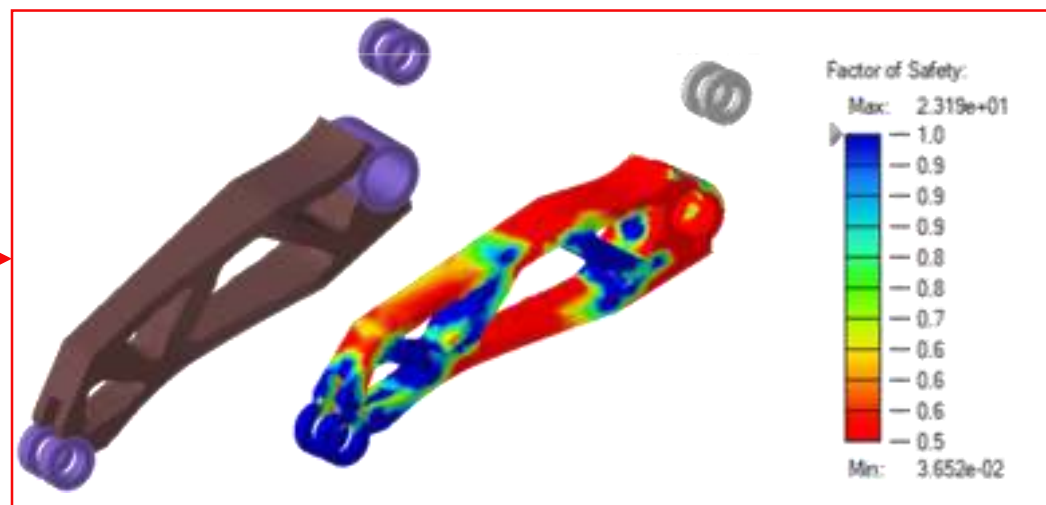
расчёты для исп_1

Min Factor of Safety	Min von Mises Stress	Mass Total
3.657e-02	0.000e+00 MPa	8.409e+00 kg
3.652e-02	0.000e+00 MPa	1.009e+01 kg
3.594e-02	1.877e-01 MPa	1.832e+01 kg

Var_A_до ТО

Var_A_после ТО

Var_A-extr_после ТО





МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ

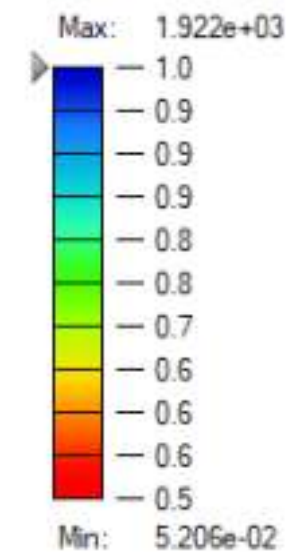
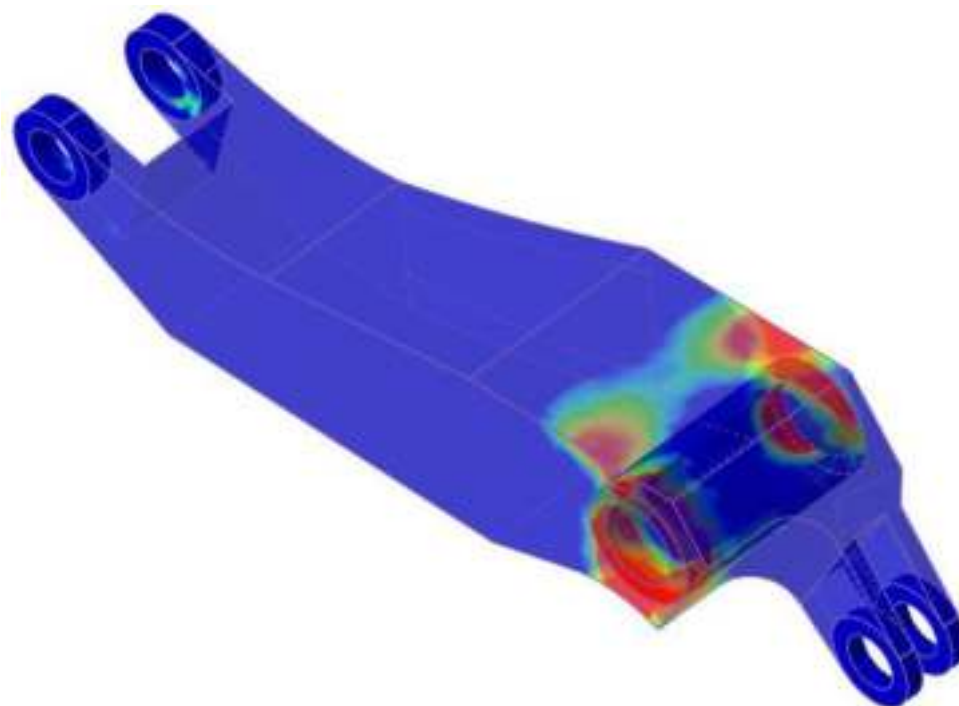


О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

исп_2

результаты статического анализа для изменённой УИГ скобы (исп_2)

коэффициент запаса по прочности





исп_1

*Вар_А (исп_1)_высота 80 мм
нержавеющая сталь 08X18H10 (AISI 304):
до ТО: 18,317 кг
после ТО: 8,4088 кг
после ТО (extr): 10,087 кг*

исп_2

*Вар_А (исп_2)_высота 120 мм
до ТО
BT6 (Ti-6Al-4V): 15,67 кг
до ТО: АД33 (AW 6061-T6): 9,5529 кг
нержавеющая сталь 08X18H10 (AISI 304): 28,305 кг*

физико-механические свойства материалов

Материал	E, [ГПа]	ν	$\rho, \times 10^{-6}$ [кг/мм ³]	σ_T [МПа]	$\alpha, \times 10^{-6}$ [K ⁻¹]	$\lambda, \times 10^{-3}$ [В/мм К]
BT6	116,5	0,31	4,4	827,4	8,8	6,7
АД33	75	0,33	2,7	241,3	23,5	167
08X18H10	195	0,29	8	215	17,3	16,2

масса детали после топологической оптимизации

заметный рост массы

Вариант (исп_2)	BT6	АД33	08X18H10	08X18H10 (extr)
Вар_А	6,8434	4,3499	11,456	15,58
Вар_Б	6,7953	4,5381	12,279	15,673
Вар_В	6,8375	4,5839	13,606	15,636



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного
производства, конференция «Additive Minded»
в рамках выставки «Интерпластика 2022»
ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

08X18H10

Вар_А



Вар_Б



Вар_В

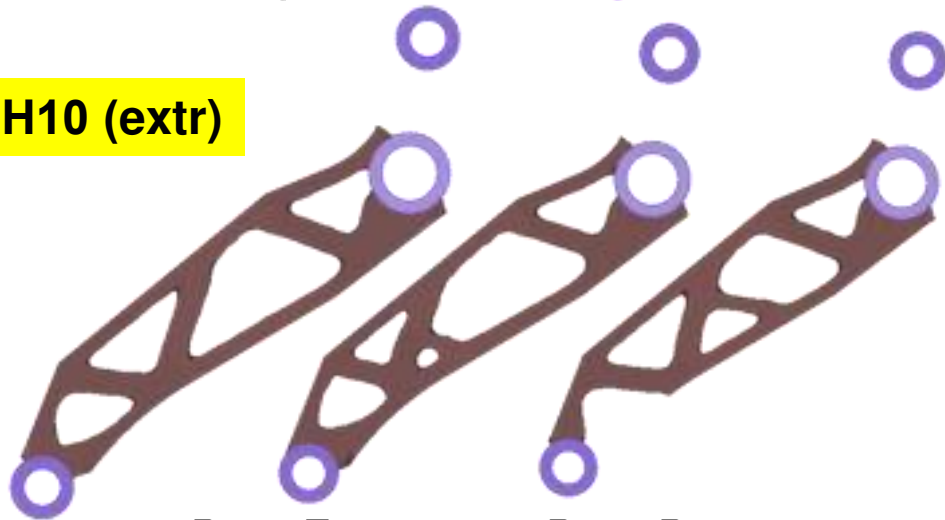


08X18H10 (extr)

Вар_А

Вар_Б

Вар_В



АД33

Вар_А



Вар_Б



Вар_В

исп_2



ВТ6

Вар_А

Вар_Б

Вар_В





МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного
производства, конференция «Additive Minded»
в рамках выставки «Интерпластика 2022»
ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

исп_2

08X18H10

Вар_А



Вар_Б



Вар_В

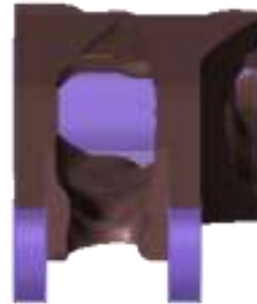


АД33

Вар_А



Вар_Б



Вар_В



Вар_А



Вар_Б



Вар_В



BT6

Как же выбрать из всего
многообразия нужный
вариант конструкции
изделия?



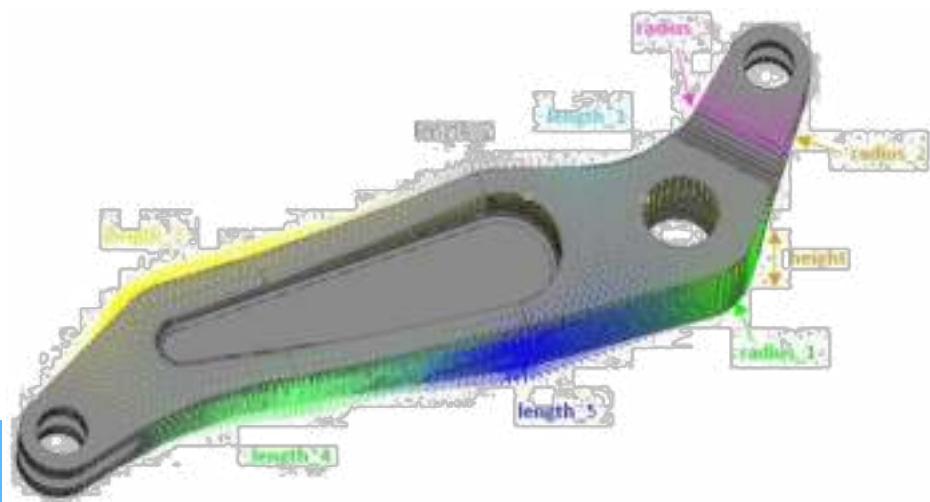
Существующие методы планирования эксперимента (DoE) в
программе HyperStudy

	Mode	Label
1	<input type="radio"/>	Modified Extensible Lattice Sequence
2	<input type="radio"/>	D-Optimal
3	<input type="radio"/>	Fractional Factorial
4	<input checked="" type="radio"/>	Full Factorial
5	<input type="radio"/>	Plackett Burman
6	<input type="radio"/>	Taguchi
7	<input type="radio"/>	Central Composite
8	<input type="radio"/>	Box Behnken
9	<input type="radio"/>	Latin HyperCube
10	<input type="radio"/>	Hammersley

алгоритм
полнофакторного
эксперимента



Постановка задачи в HyperStudy



выделенные геометрические
параметры

верхние (upper) и нижние (lower) значения уровней варьирования

Length1	Lower Bound = -0.5, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 2.0
Length2	Lower Bound = 0.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 2.0
Length3	Lower Bound = -1.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0
Length4	Lower Bound = -1.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0
Length5	Lower Bound = -1.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0
Radius1	Lower Bound = -2.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 2.0
Radius2	Lower Bound = -0.5, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0
Radius3	Lower Bound = -0.5, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0
Height	Lower Bound = -1.0, Initial Bound = 0.0, Upper Bound = 1.0 Three

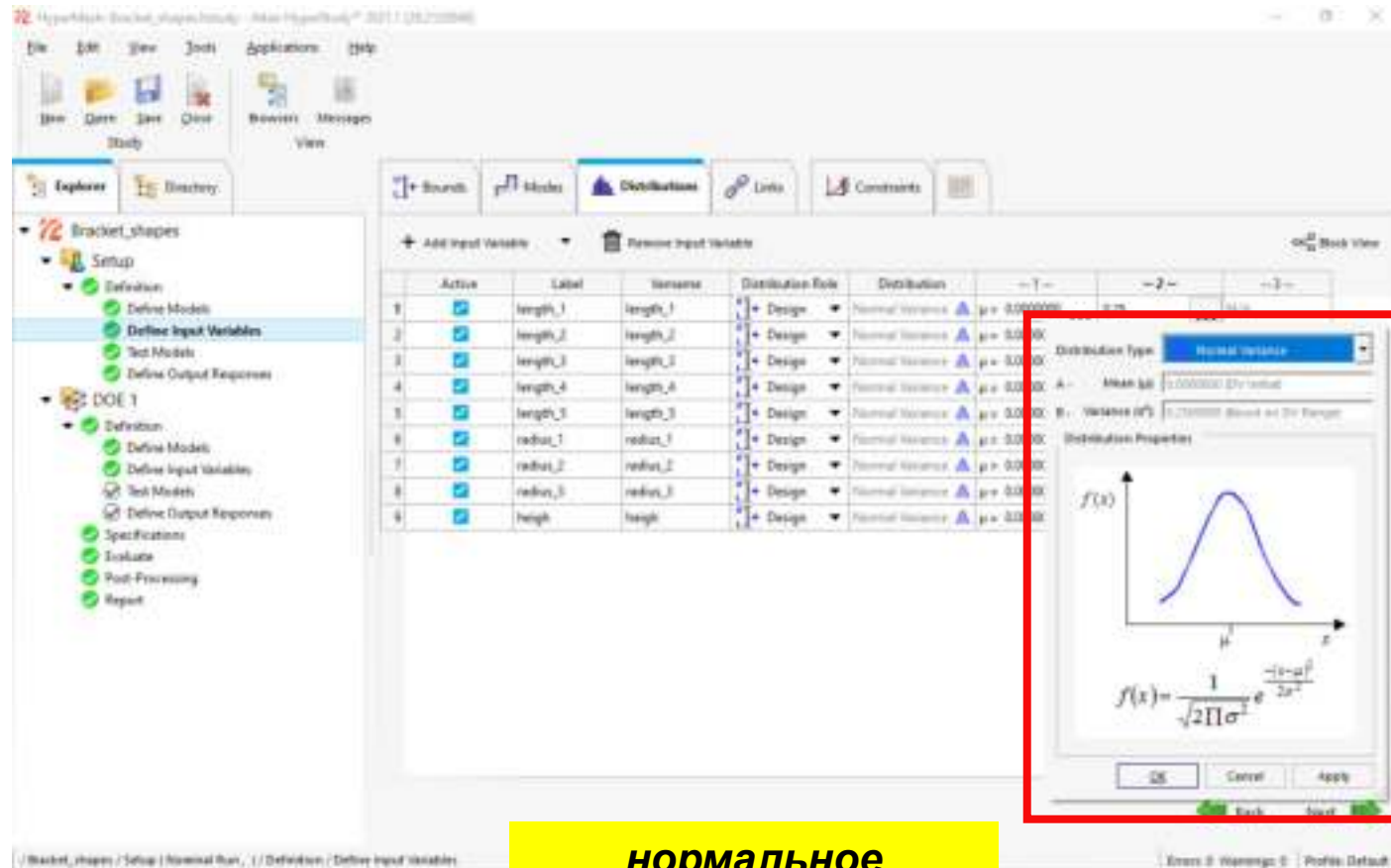


МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

Постановка задачи в HyperStudy



**нормальное
распределение
случайной величины**



	Active	Write	Execute	Extract	Comment
1	<input checked="" type="checkbox"/>	Success	Success	Success	
2	<input checked="" type="checkbox"/>	Success	Success	Success	
3	<input checked="" type="checkbox"/>	Success	Started		
4	<input checked="" type="checkbox"/>	Success	Started		
5	<input checked="" type="checkbox"/>				
6	<input checked="" type="checkbox"/>				
7	<input checked="" type="checkbox"/>				
8	<input checked="" type="checkbox"/>				
9	<input checked="" type="checkbox"/>				
10	<input checked="" type="checkbox"/>				
11	<input checked="" type="checkbox"/>				
12	<input checked="" type="checkbox"/>				
13	<input checked="" type="checkbox"/>				
14	<input checked="" type="checkbox"/>				
15	<input checked="" type="checkbox"/>				
16	<input checked="" type="checkbox"/>				
17	<input checked="" type="checkbox"/>				
18	<input checked="" type="checkbox"/>				

Bracket_shapes / DOE 1 (Full Factorial / Initial, 512 Evaluations) / Evaluate

0% (Remaining ~ 5025)

на 512 комбинаций
требуется порядка
~51 минуты

Параметры расчётной системы

Тип: настольный ПК (desktop)

ОС: Windows 10 Pro

Процессор: Intel Core i5-10400T 2,0 ГГц (6 ядер, 12 потоков)

Графическая карта: Intel UHD 630 (интегрированная) и NVidia Quadro P620 (дискретная)

ОЗУ (RAM, DDR4), ГБ: 8

Объём жёсткого диска, ТБ: 1

Тип жёсткого диска: SSD

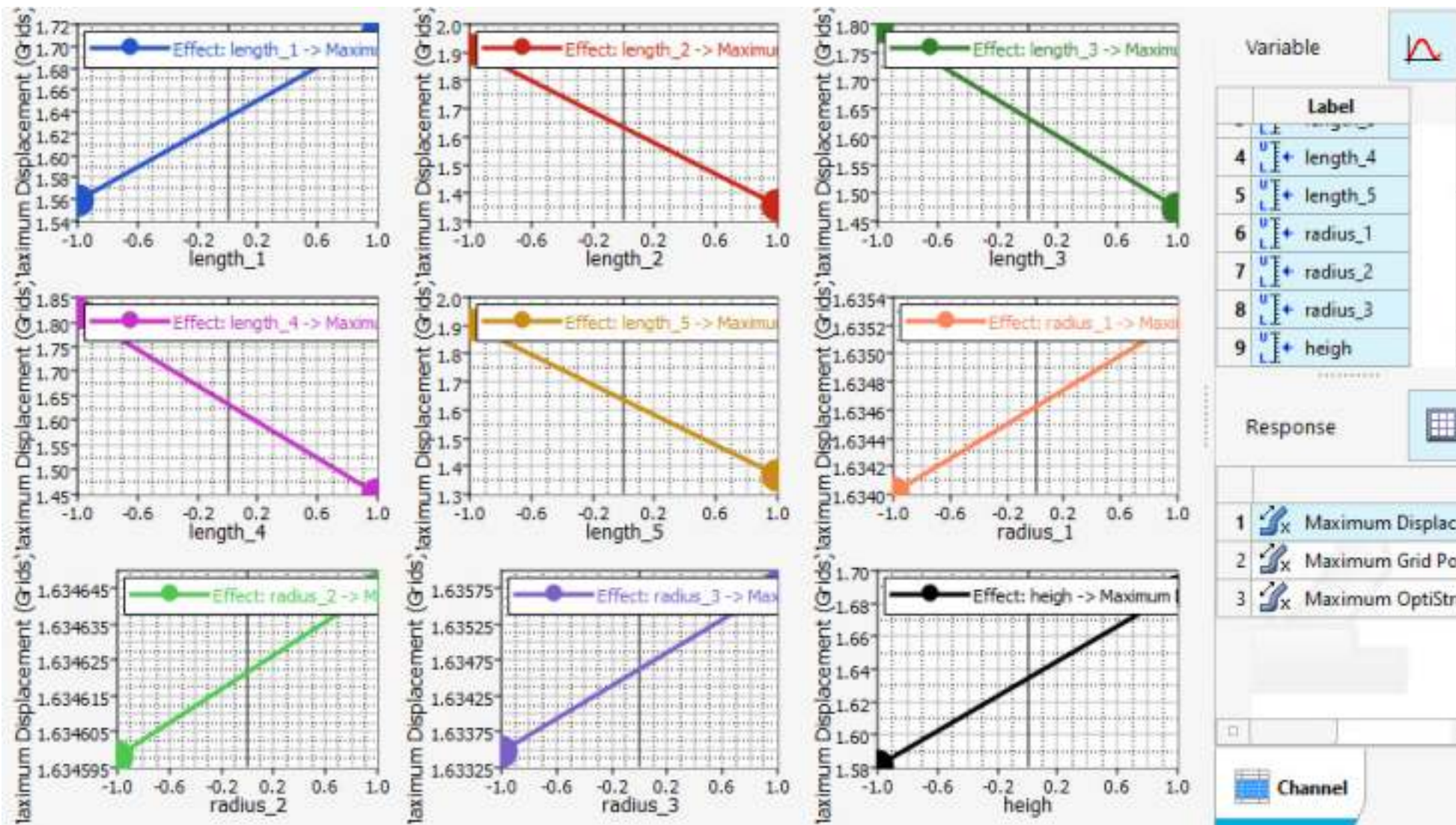


МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



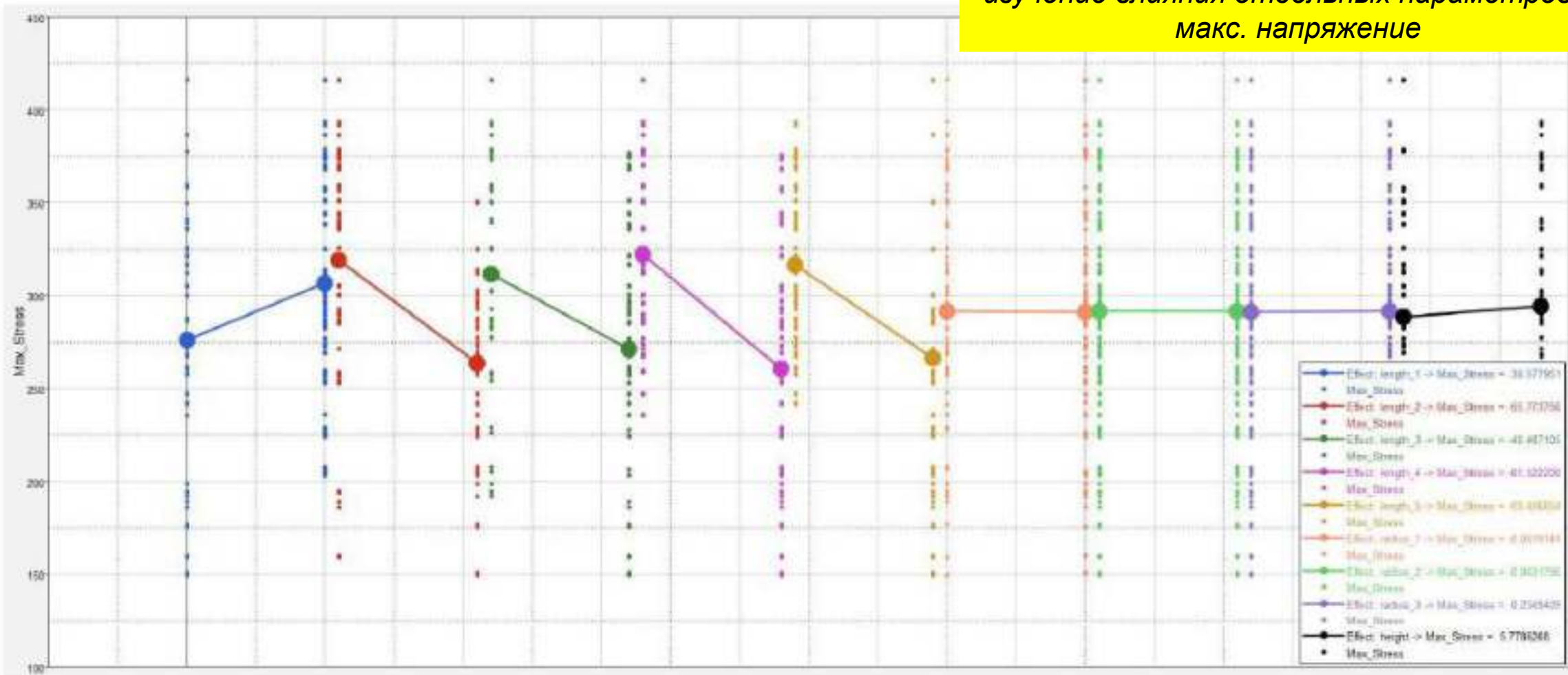
О задачах геометрической оптимизации для аддитивного производства, конференция «Additive Minded» в рамках выставки «Интерпластика 2022» ЦВК «Экспоцентр», 25.01.2022

изучение влияния отдельных параметров на макс. перемещение



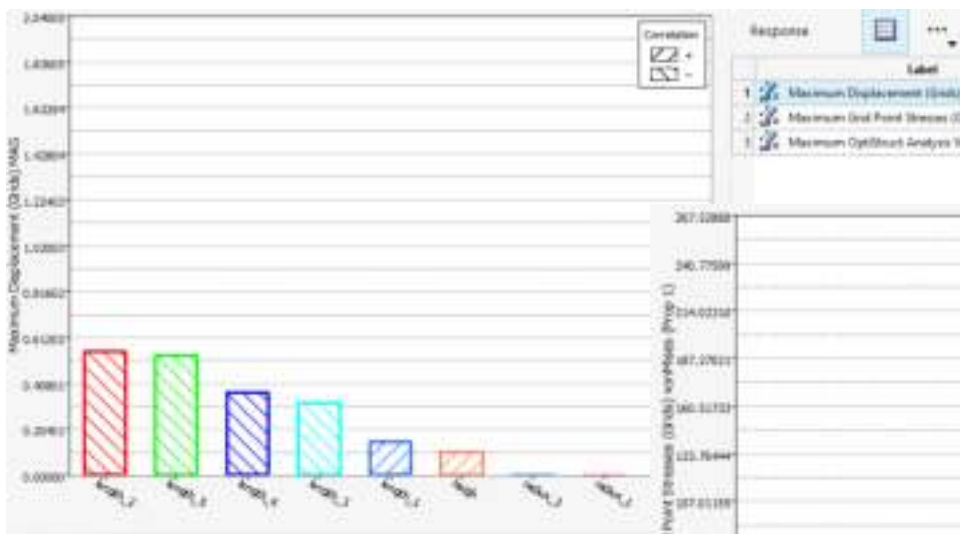


изучение влияния отдельных параметров на макс. напряжение

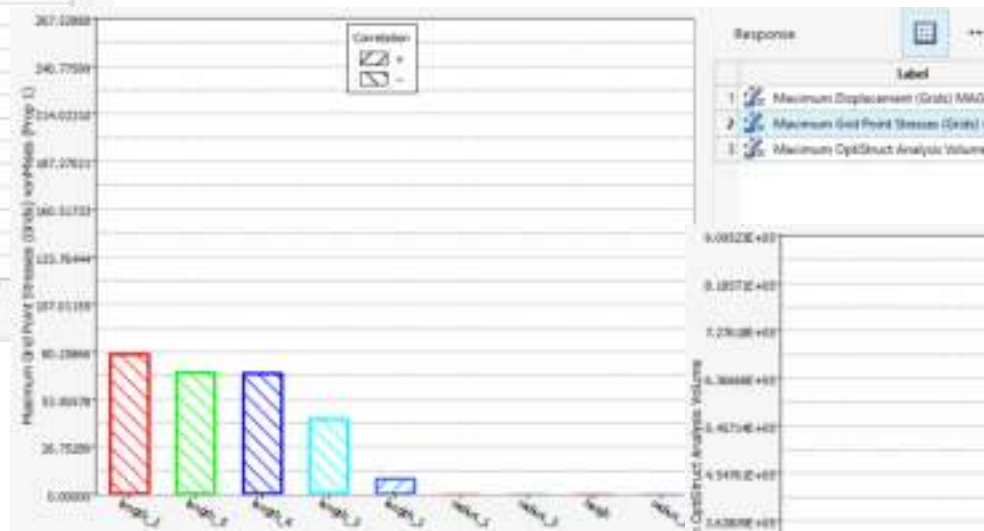




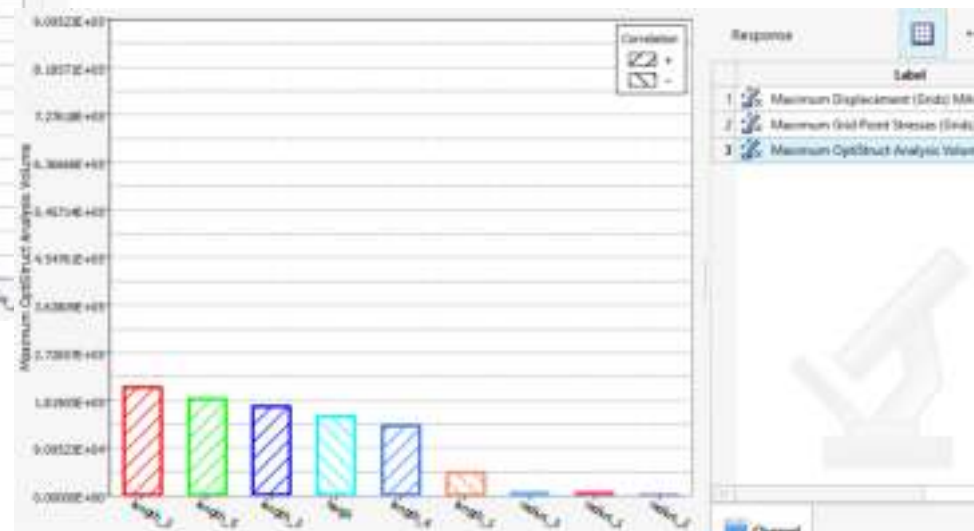
столбчатая Парето-диаграмма полученных результатов



макс. перемещение точки



макс. напряжение по Мизесу



макс. объём материала

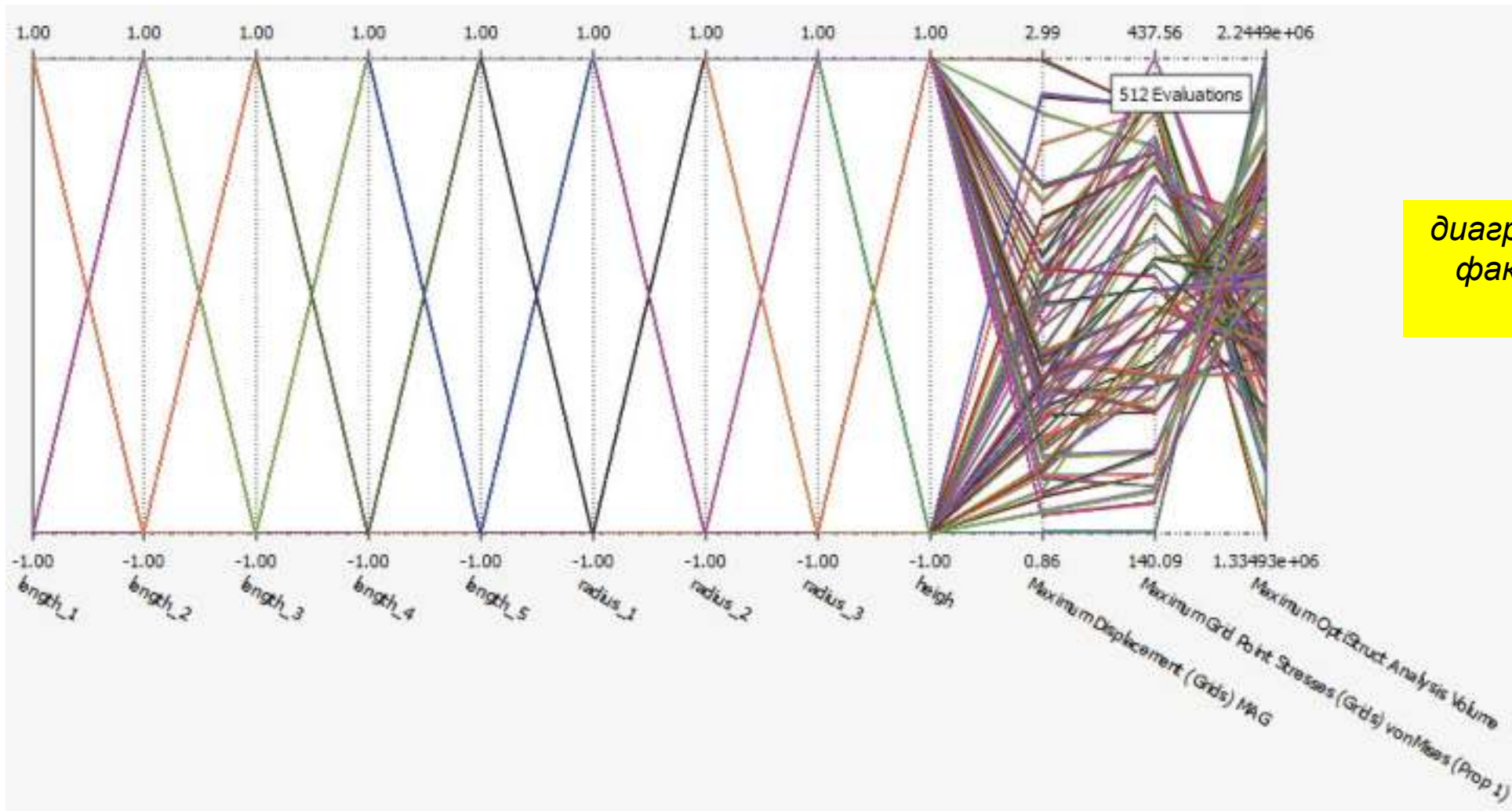


диаграмма варьирования факторов по уровням (snake diagram)



МОСКОВСКИЙ
ПОЛИТЕХ



additive
MINDED

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



[*m.a.petrov@mospolytech.ru*](mailto:m.a.petrov@mospolytech.ru)

Кафедра «Обработка материалов давлением и аддитивные технологии»