

УДК 629.3.015.4

doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-28-40

# Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля

Р.Б. Гончаров

МГТУ им. Н.Э. Баумана

## A Study of the Effectiveness of Parametric Optimization Algorithms: Collision Impact Processes in Bumper Beams and Truck Cabins

R.B. Goncharov

Bauman Moscow State Technical University

Рассмотрены и исследованы различные алгоритмы параметрической оптимизации (реализованные в программе LS-OPT) для решения быстропротекающих и высоконелинейных задач ударного характера на примере оптимизации бампера автотранспортного средства и кабины перспективного грузового автомобиля. Анализ результатов позволил определить, какие из этих алгоритмов обладают наибольшей эффективностью по критериям точности и расчетного времени. Применение метамоделей, построенной на основе нейросети RBF, и способа выбора опытов space-filling для оптимизации конструкции бампера обеспечило уменьшение его массы на 16 % при сохранении исходных параметров жесткости и энергоемкости. Для оптимизации сложных конструкций типа кабины грузового автомобиля применительно к задачам пассивной безопасности наиболее эффективной признана метамодел на базе нейросети RBF. В связи с этим ее рекомендовано использовать как основную, а линейную полиномиальную метамодел — только для предварительных расчетов.

**Ключевые слова:** параметрическая оптимизация, метамодел, поверхность отклика, кабина грузового автомобиля, бампер автомобиля

This article compares various parametric optimization algorithms implemented in LS-OPT for solving high-speed and highly nonlinear impact problems using a bumper beam and a truck cabin as examples. The analysis of the results showed which algorithms were the most effective according to the criteria of accuracy and time. The metamodel based on the RBF neuron network and the space-filling point selection for optimizing the design of the bumper beam allowed reducing the mass of the structure by 16 % while maintaining the same parameters of rigidity and power consumption. To solve optimization problems concerning passive safety of complex structures such as truck cabins, the RBF neuron network model proved to be the most effective. It is therefore recommended as the primary model, while the linear polynomial model should be used only for preliminary analysis.

**Keywords:** parametric optimization, metamodel, response surface, truck cabin, bumper beam

Развитие автомобилестроения достигло такого уровня, что невозможно представить дальнейшее совершенствование конструкций без использования оптимизации, особенно в области пассивной безопасности.

Методы параметрической оптимизации (ПО) принципиально подразделяют на прямые (direct optimization) и основанные на построении метамоделей (metamodel-based). Первые применяют для решения однокритериальных задач с относительно малым количеством переменных, вторые — для решения сложных многокритериальных задач с большим количеством варьируемых параметров.

Структурная схема алгоритма ПО приведена на рис. 1, где видно, что алгоритм создания метамоделей (рис. 1) включает в себя три основных этапа: выбор параметров опытов, построение поверхностей отклика для критериев и ограничений и поиск оптимального решения (минимума целевой функции).

Рассмотрим и сравним разные алгоритмы ПО, основанные на построении метамоделей (реализованные в программе LS-OPT), для решения быстропротекающих высоконелинейных задач ударного характера на примере бампера

автотранспортного средства и кабины перспективного грузового автомобиля.

Цель работы — выбор предпочтительного алгоритма ПО, основанного на построении поверхности отклика — метамоделей, применительно к процессам ударного воздействия на несущие конструкции автомобилей для снижения их массы и удовлетворения требованиям пассивной безопасности при приемлемых значениях точности и времени решения задачи ПО.

**Методика решения задачи ПО.** На первом этапе решения задачи ПО необходимо выбрать модель построения поверхности отклика, которую можно получить разными способами. Рассмотрим следующие типы аппроксимаций: линейную полиномиальную (ЛП), квадратичную полиномиальную (КП), искусственные нейросети (ИНС) Feedforward (FF) и Radial Basis Function (RBF), интерполяционный метод Kriging и регрессионный метод Support Vector Regression (SVR).

Модель ЛП является наиболее простой и наименее затратной с точки зрения машинного времени. Ее строят путем аппроксимации  $n$ -го

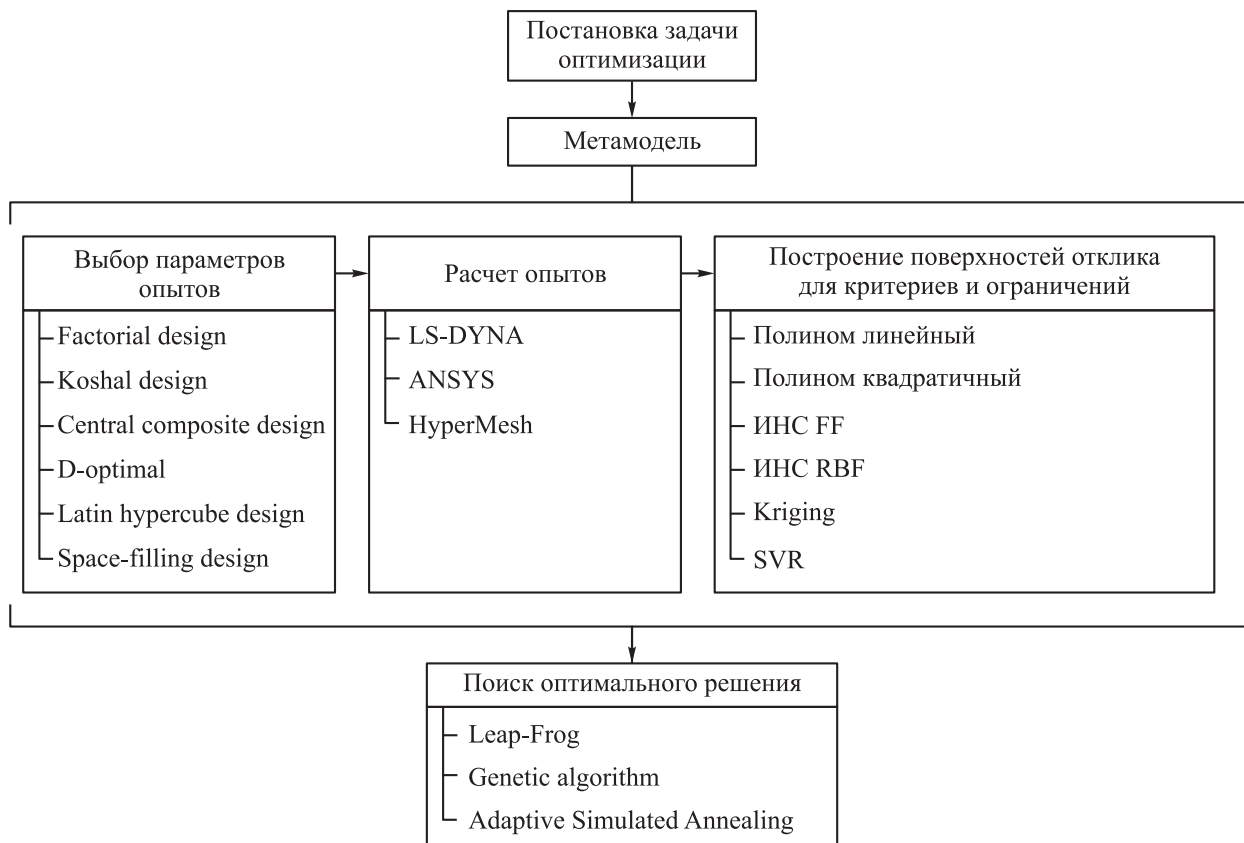


Рис. 1. Структурная схема алгоритма ПО

количества результатов индивидуальных опытов. Как показывают расчеты, точность такой модели удовлетворительна только для проведения предварительных оценок.

*Модели FF и RBF* базируются на принципах построения ИНС. ИНС прямого распространения (FF) имеют четкую многоуровневую топологию [1]. Каждый нейрон усредняет сумму параметров своих входов с помощью весовых коэффициентов и передает полученное значение через функцию передачи (активации) на выход. Выходы каждого слоя нейронов являются входами на следующий уровень. RBF использует радиальные базисные функции как функции активации [2]. Выходом ИНС служит линейная комбинация радиальных базисных функций входов и параметров нейрона.

*Модель Kriging* [3] базируется на методе интерполяции, для которого интерполированные значения моделируются гауссовским процессом, определяемым предыдущими ковариациями.

*Модель SVR*, представляющая собой вариацию метода опорных векторов, обладает достаточно хорошими свойствами обобщения [4]. Вместо минимизации эмпирической невязки модель основана на структурной минимизации невязок.

**На втором этапе решения задачи ПО** необходимо выбрать количество и параметры индивидуальных опытов, которые зависят от рассматриваемого типа модели отклика. Совокупность опытов и типов поверхности отклика определяет метамодель для последующей оптимизации. Существует много способов выбора параметров опытов. Из теории планирования эксперимента известны следующие способы: factorial design (факторный эксперимент), Koshal design, central composite design, D-optimal, Latin hypercube design, space-filling design.

*Способ полного факторного эксперимента* предполагает расчет количества опытов по формуле  $N = m^n$ , где  $m$  — число уровней каждого фактора,  $n$  — число факторов. К недостаткам этого способа можно отнести его избыточность в отношении количества опытов, что ведет к нерациональным затратам времени.

*Способ D-optimal*, чаще всего применяемый для полиномиальных моделей, использует подмножество всех возможных опытов полного факторного эксперимента [5]. Для линейных полиномов минимальное количество опытов определяется по формуле  $1,5(n+1)+1$ ,

для квадратичных — по выражению  $0,75(n+1)(n+2)+1$ . Этот способ является компромиссным с позиции достижения высокой точности прогнозирования и малых затрат расчетного времени.

*Способ space-filling design* оптимизирует минимальное расстояние между экспериментальными точками проектирования для заданного количества опытов [6]. Данный способ удобно сочетать с моделями FF, RBF и Kriging. Недостатком способа является то, что он «не дает рекомендаций» о количестве необходимых опытов.

**На третьем этапе решения задачи ПО** следует выбрать алгоритм поиска минимума целевой функции. Программа предусматривает три варианта поиска минимума: Leap-Frog [7] (алгоритм, применяемый в случае, когда минимум целевой функции ищут только по одному критерию), генетический алгоритм genetic algorithm (многокритериальный и многопараметрический алгоритм) [8, 9] и Adaptive Simulated Annealing (алгоритм имитации отжига) [10, 11] с возможностью переключения на Leap-Frog для поиска локального минимума.

В данной работе для полиномиальных метамodelей использован способ D-optimal, для остальных — space-filling design, как наиболее подходящие для решения поставленных задач [12]. При этом количество опытов для получения точного решения в общем случае неизвестно. Для определения этого параметра применен метод последовательных приближений (sequential RSM). В результате количество опытов зависело от сходимости трех критериев: точности метамодели, точности критерия оптимизации и точности ограничений (причем минимальное количество опытов для одной итерации не может быть меньше, чем  $1,5(n+1)+1$ ). Все критерии задаются инженером-расчетчиком и зависят от решаемой задачи.

**Постановка и решение задачи ПО автомобильного бампера.** Основное предназначение бампера — защита от ударного воздействия путем максимального поглощения энергии. В процессе удара в конструкции бампера возникают многочисленные зоны с пластическими деформациями, наступает потеря устойчивости и смятие [13]. Такой тип задачи удачно подходит для анализа алгоритмов оптимизации, потому что он описывает основные нюансы деформирования, возникающие в элементах кон-

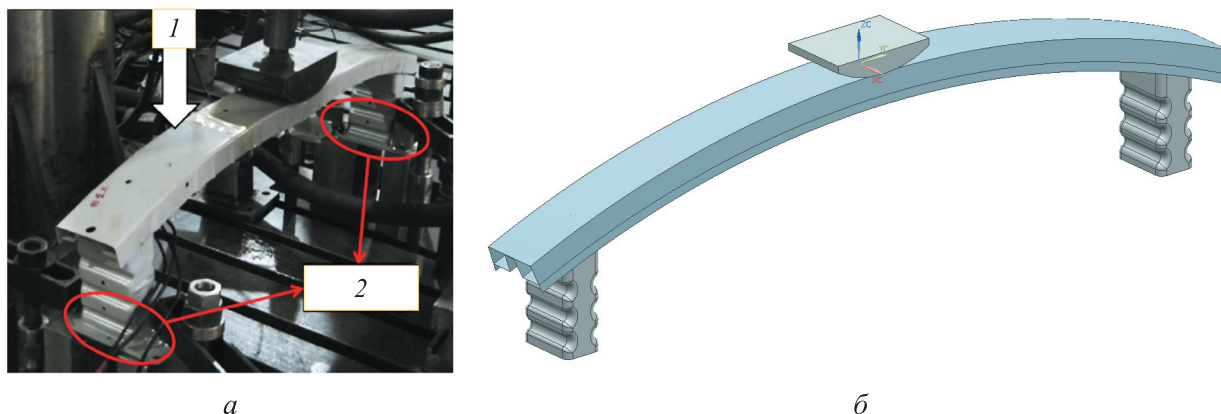


Рис. 2. Схема испытания (а) и твердотельная модель (б) бампера автомобиля:  
1 — испытательный стенд; 2 — крепления

струкции автомобилей при дорожно-транспортных происшествиях.

Схема испытания и твердотельная модель бампера автомобиля показаны на рис. 2.

Геометрические размеры, свойства материалов, условия взаимодействия бампера и ударника подробно рассмотрены в статье [14].

Схема нагружения и результаты моделирования, полученные с помощью программы LS-DYNA, показаны на рис. 3. Масса ударника составляла 25 кг, скорость — 10 м/с, время расчета ограничивалось 0,025 с. Максимальное перемещение ударника составило 100 мм.

Цель оптимизации заключалась в создании конструкции, аналогичной по жесткости и энергоемкости базовой модели при минимальной массе. Целевая функция (критерий) — масса бампера. В качестве ограничения выступало

максимальное перемещение ударника, которое должно соответствовать экспериментальным данным [15].

Конструкцию бампера, состоящую из внешнего (наружного) и внутреннего силовых элементов, разбили на фрагменты. Каждый из них имел независимую переменную — толщину внутреннего  $t_{vi}$  и наружного  $t_{nj}$  элемента соответственно ( $i = 1, \dots, 5, j = 1, \dots, 5$ ). Диапазон изменения переменной 0,5...1,5 мм. На рис. 4 показаны конечно-элементные модели силовых элементов бампера, разбитые на фрагменты.

Для решения задачи ПО бампера применен алгоритм Adaptive Simulated Annealing как наиболее эффективный среди связанных с ударным воздействием [16, 17].

Важно отметить, что все алгоритмы очень чувствительны по точности и продолжительности решения к назначению критериев сходимости задачи оптимизации. В данном случае использован метод sequential RSM, т. е. изначально неизвестное количество опытов определялось в процессе итерационного решения. Конечный результат получали в том случае, когда критерии сходимости не превышали 0,01. Задание слишком больших значений (для сокращения затрат машинного времени) может привести к неадекватным результатам из-за возникающих погрешностей решения.

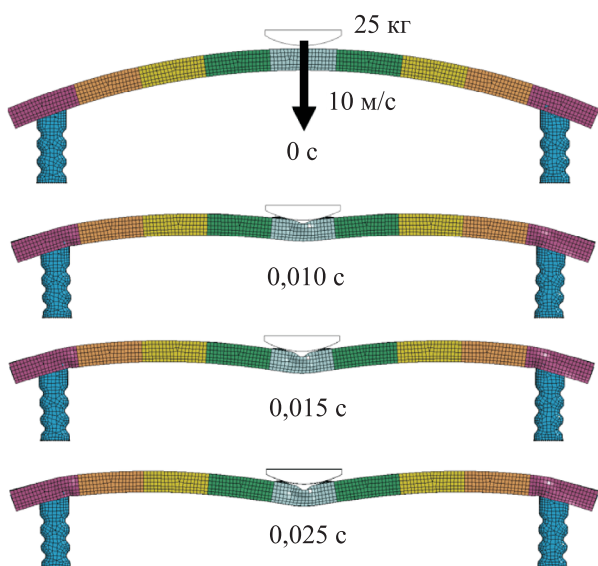


Рис. 3. Схема нагружения и результаты моделирования

**Анализ результатов применения различных метамоделей для ПО бампера автомобиля.** Результаты ПО бампера для исследуемых метамоделей приведены в табл. 1.

Анализ результатов показал, что сходимость решения задачи оптимизации достигнута только для метамоделей RBF (221 опыт, 13 итера-

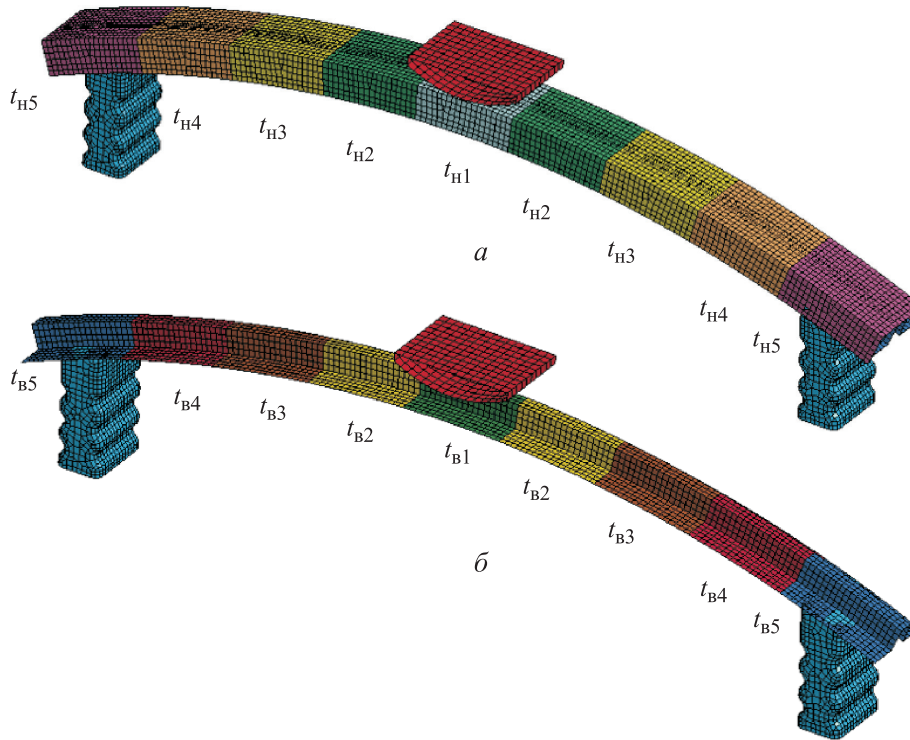


Рис. 4. Конечно-элементные модели внешнего (а) и внутреннего (б) силовых элементов бампера, разбитые на фрагменты

ций). Для остальных случаев в табл. 1 представлены результаты наилучших промежуточных итераций.

На рис. 5 показаны поверхности отклика [18], полученные с помощью рассматриваемых метамоделей, где  $L$  — перемещение ударника;  $t_{в1}$  — толщина внутреннего фрагмента;  $t_{н1}$  — толщина наружного фрагмента. На рис. 6 и 7 изображены зависимости массы и перемещения ударника от толщины фрагментов конструкции бампера.

Поверхности отклика, построенные с использованием метамоделей КП и SVR, внешне

похожи, но различаются диапазоном значений переменных (см. рис. 5, б, е).

Диаграммы зависимостей массы бампера от толщины его фрагментов, полученные с помощью ЛП- и КП-метамоделей, близки по своим значениям, но отличаются от таковых для метамоделей RBF, FF, Kriging и SVR. Особенно это заметно для толщин наружных фрагментов  $t_{н2}$ ,  $t_{н3}$  и  $t_{н4}$ .

На диаграммах зависимостей перемещения ударника от толщин его фрагментов общей закономерности не прослеживается, но наблюдается некоторое сходство между результатами,

Таблица 1

Результаты ПО бампера для исследуемых метамоделей

Тип метамоделей	Масса бампера		Перемещение ударника		Сходимость решения (количество опытов)
	Значение, кг	Изменение, %	Значение, мм	Погрешность, %	
Базовая модель	3,14	–	100	–	–
ЛП	2,68	14,6	115	15	Нет (391)
КП	2,25	28,0	162	62	Нет (391)
FF	2,46	22,0	158	58	Нет (391)
RBF	2,64	16,0	101	1,0	Да (221)
Kriging	2,39	24,0	148	48	Нет (391)
SVR	2,46	22,0	128	28	Нет (391)

полученными с использованием метамоделей RBF, FF и Kriging.

Для метамоделей всех типов погрешность перемещения ударника (для наилучших промежуточных итераций) варьировалась от 15 (ЛП) до 62 % (FF), кроме RBF, для которой выполнены

все условия сходимости, и перемещение ударника составило 101 мм. Следовательно, для решения оптимизационных задач, связанных с ударными воздействиями, характерными для бамперов, кузовов и кабин автотранспортных средств, применима только метамоделю RBF.

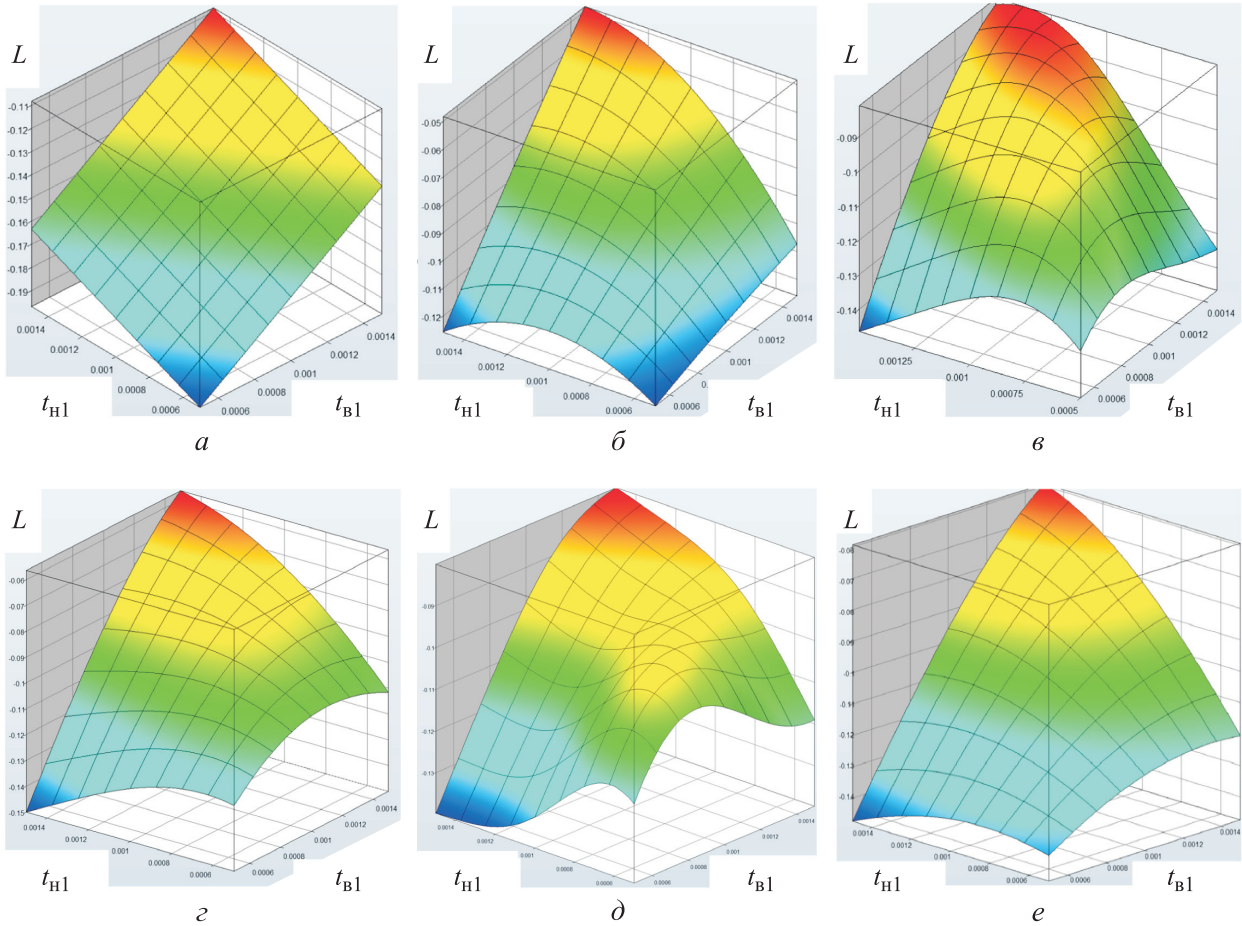


Рис. 5. Поверхности отклика, полученные с помощью разных метамоделей: а — ЛП; б — КП; в — FF; з — RBF; д — Kriging; е — SVR

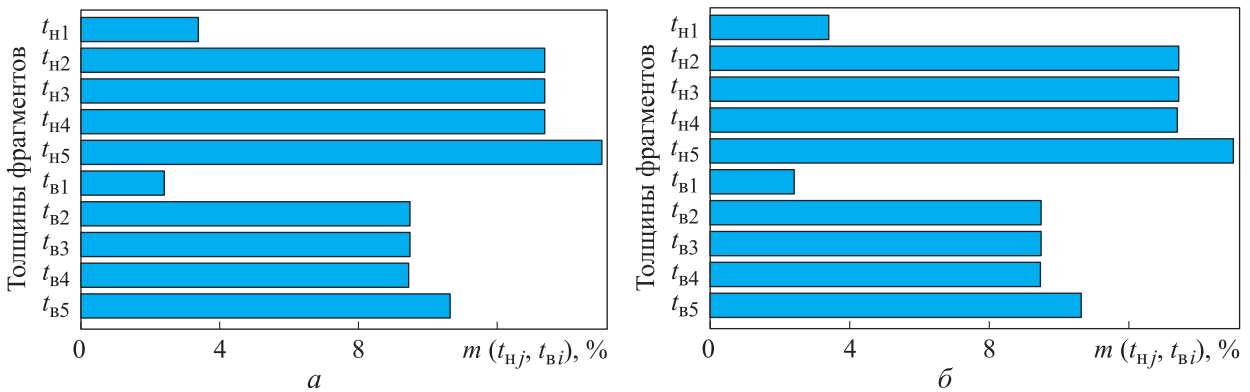


Рис. 6 (начало). Зависимости массы бампера от толщин его фрагментов, полученные с помощью разных метамоделей: а — ЛП; б — КП

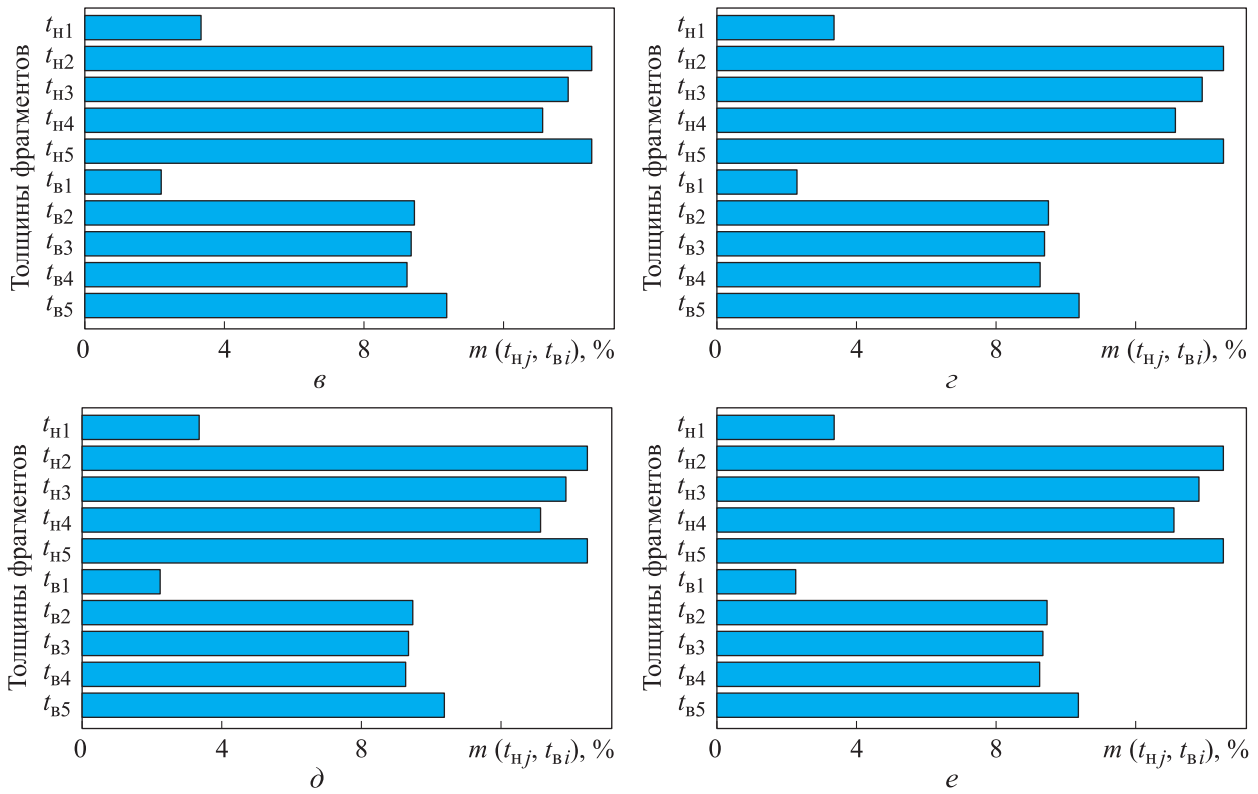


Рис. 6 (окончание). Зависимости массы бампера от толщин его фрагментов, полученные с помощью разных метамоделей:  $v$  – FF;  $z$  – RBF;  $d$  – Kriging;  $e$  – SVR

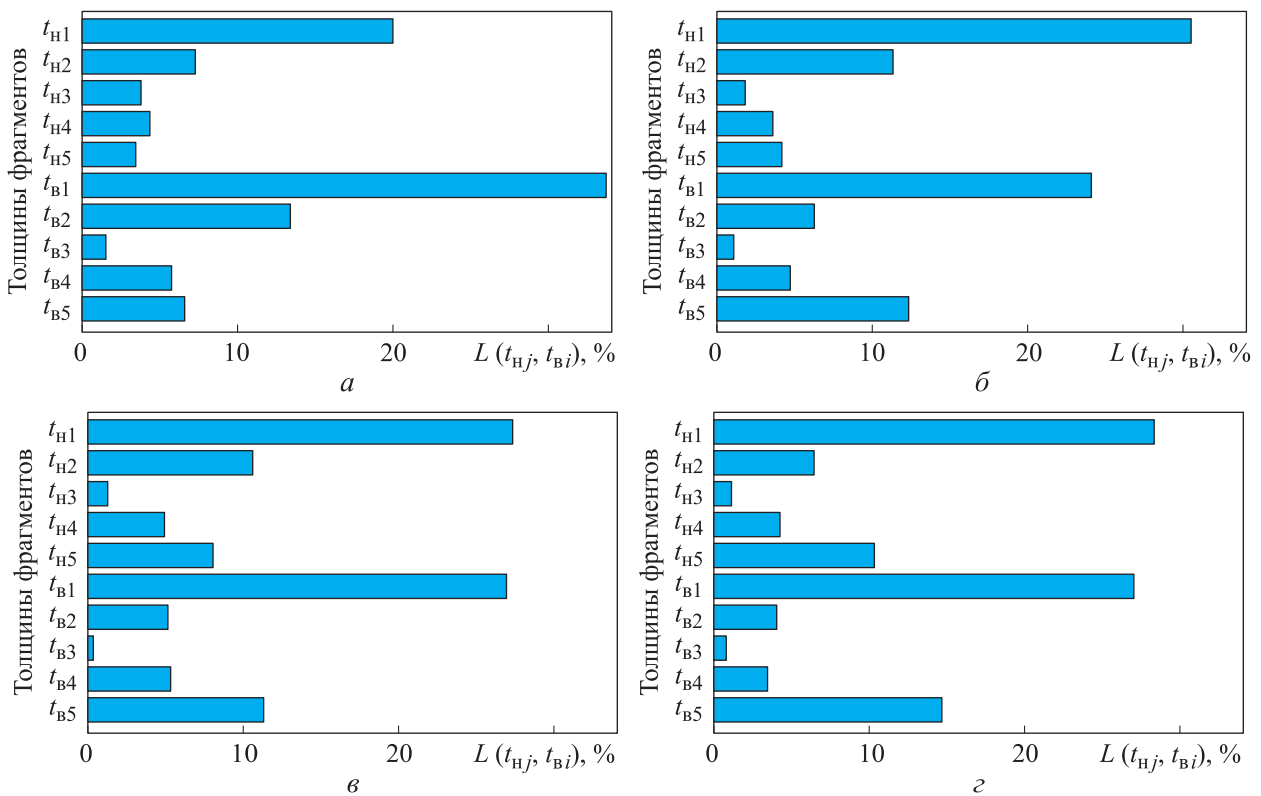


Рис. 7 (начало). Зависимости перемещения ударника от толщин фрагментов бампера, полученные с помощью разных метамоделей:  $a$  – ЛП;  $б$  – КП;  $в$  – FF;  $г$  – RBF

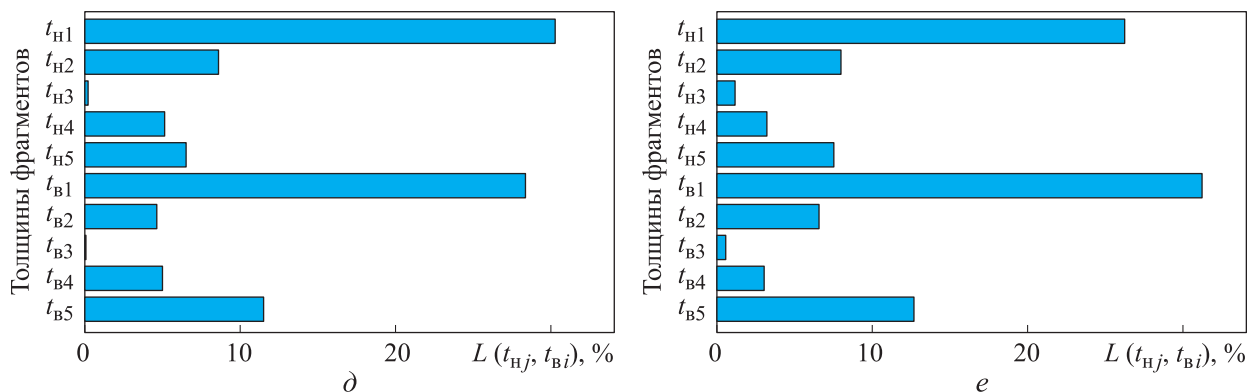


Рис. 7 (окончание). Зависимости перемещения ударника от толщин фрагментов бампера, полученные с помощью разных метамоделей:  $\delta$  — Kriging;  $\epsilon$  — SVR

Для рассматриваемой задачи ударного воздействия на автомобильный бампер использование ПО позволило уменьшить массу на 16 % (с 3,14 до 2,64 кг) при сохранении параметров жесткости и энергоемкости базовой модели.

**Анализ применения метамоделей для решения задач ПО, связанных с пассивной безопасностью кабин грузовых автомобилей.** В качестве объекта исследования выбрана перспективная кабина грузового автомобиля. На рис. 8 показаны твердотельная и конечно-элементная модели этой кабины. Режим нагружения соответствует шведским нормам пассивной безопасности (VVFS 2003:29): удар маятником по передней стойке под углом 15° [19]. Ре-

зультаты расчета базовой модели показали, что кабина не удовлетворяет установленным требованиям пассивной безопасности [20].

Цель оптимизации — обеспечение жизненного пространства при достижении минимальной массы кабины. Для ее достижения конструкцию кабины разделили на фрагменты (подзоны), а элементы каркасного типа заполнили пеноалюминием, как показано на рис. 9. Разбиение на подзоны позволило ограничить количество переменных и тем самым сократить количество опытов, необходимых для ПО.

В качестве варьируемых параметров выступали плотность пеноалюминия  $\rho_j$ , изменяемая в пределах 100...800 кг/м<sup>3</sup>, и толщина эле-

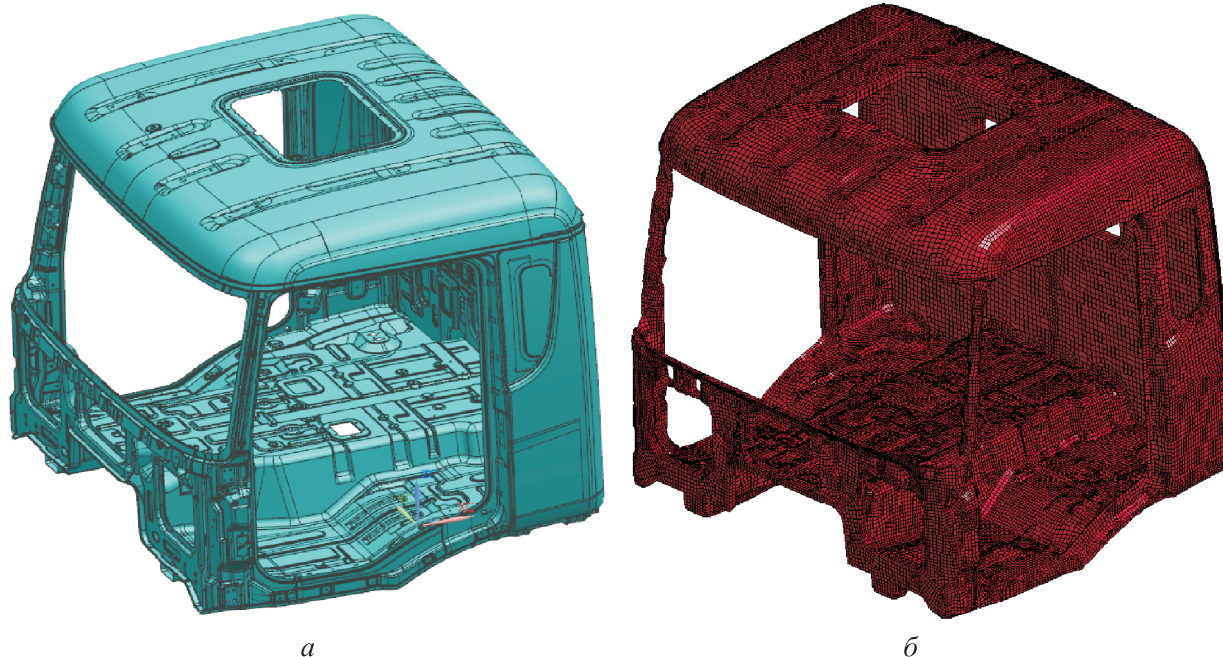


Рис. 8. Твердотельная (а) и конечно-элементная (б) модели перспективной кабины грузового автомобиля



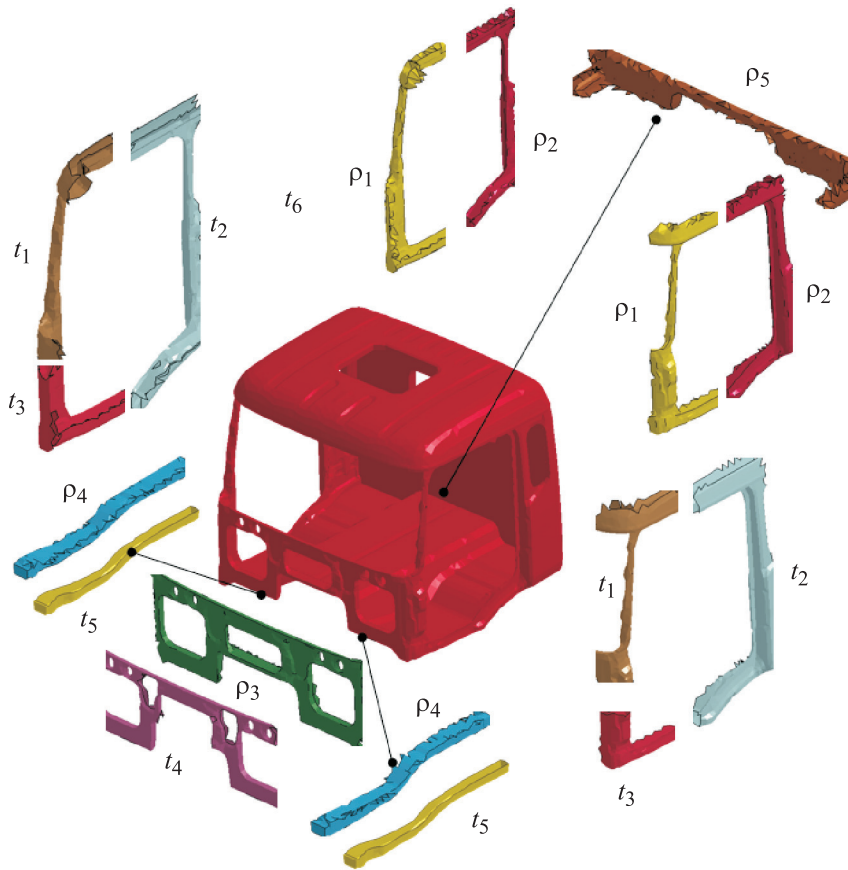


Рис. 9. Конечно-элементная модель кабины, разбитая на подзоны

ментов каркасного типа  $t_j = 0,1; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0$  мм. На основании предварительных исследований [20] было принято решение выделить подзоны вокруг дверного проема, лобового стекла, лонжеронов, задней стенки кабины и заполнить их пеноалюминием. Помимо наполнителя, дверные проемы и передняя часть кабины усиливались накладками. Ограничением при

оптимизации являлось максимальное перемещение маятника, которое не должно превышать 350 мм. При выполнении этого условия жизненное пространство в кабине сохраняется.

Для решения задачи оптимизации сравнивали две метамоделей ЛП и RBF, используя метод sequential RSM (значения критериев сходимости меньше 0,01).

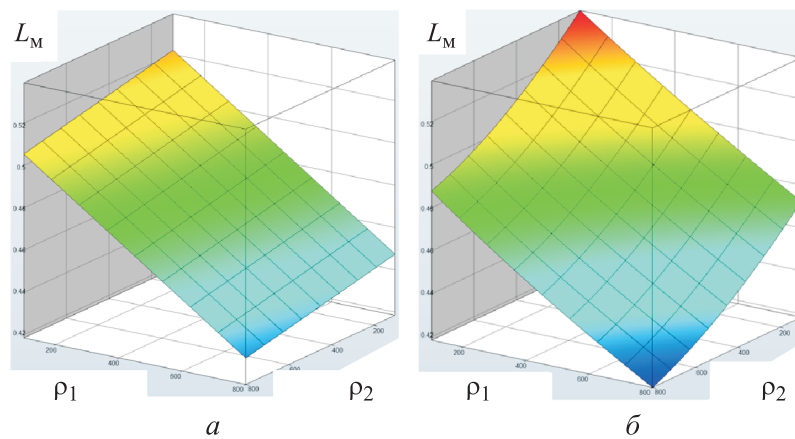


Рис. 10. Поверхности отклика, построенные с помощью метамоделей ЛП (а) и RBF (б)

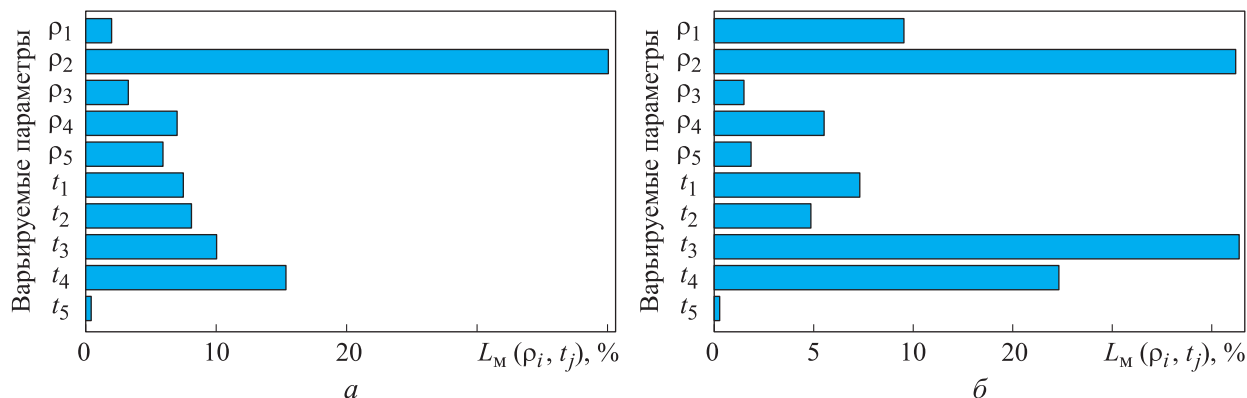


Рис. 11. Зависимости перемещения маятника от варьируемых параметров, полученные с помощью метамоделей ЛП (а) и RBF (б)

Таблица 2

**Результаты ПО для кабины грузового автомобиля**

Тип метамоделли	Масса кабины		Перемещение маятника			Количество опытов
	Значение, кг	Изменение, %	Значение, мм	Ограничение, мм	Погрешность, %	
Базовая	250	–	850	–	–	–
ЛП	360	44	353	350	0,9	34
RBF	347	38	349	350	0,3	85

На рис. 10 показаны поверхности отклика, построенные с помощью этих метамоделей, где  $L_m$  — перемещение маятника;  $\rho_1$  — плотность пеноалюминия в подзоне 1;  $\rho_2$  — плотность пеноалюминия в подзоне 2. На рис. 11 приведены зависимости перемещения маятника от варьируемых параметров.

Результаты ПО для перспективной кабины грузового автомобиля приведены в табл. 2. Оба решения достигли сходимости.

Сравнивая полученные результаты, можно заключить, что поверхности отклика, построенные с помощью метамоделей ЛП и RBF, внешне похожи, но значения данных расчета лежат в разных диапазонах. При этом, как и в случае задачи о бампере, диаграммы зависимостей перемещения маятника от варьируемых параметров не совпадают.

Анализ результатов показал, что при ПО с применением ЛП-метамоделли масса кабины больше (360 кг) на 4 %, чем при оптимизации, проведенной с помощью метамоделли RBF (347 кг). Погрешности перемещения маятника составили 0,9 и 0,3 % соответственно. При этом затраты машинного времени для ЛП-метамоделли значительно меньше, чем для RBF. Следовательно, линейную модель целесообразно использовать для проведения предварительных

расчетов для выявления общих закономерностей поведения параметров задачи оптимизации.

Таким образом, для решения поставленной ударной задачи применима только метамоделль RBF со способом выбора количества и параметров опытов space-filling design (для достижения сходимости оптимизационной задачи потребовалось 85 опытов).

**Выводы**

1. Использование метамоделей КП, FF, Kriging или SVR не позволяет получить окончательный результат для решения оптимизационной задачи. Погрешность перемещения ударника для промежуточных итераций превышает 28 %, т. е. она слишком велика.

2. ЛП-метамоделль со способом выбора количества опытов D-optimal целесообразно применять только при проведении предварительных многовариантных расчетов для задач ударного воздействия, так как она является рациональной с точки зрения точности и затрат машинного времени.

3. В качестве основной метамоделли для ПО кабин грузовых автомобилей предложено использовать RBF с методом выбора количества

опытов space-filling design. Эта метамодель позволяет получить наилучшие результаты по точности.

4. Применение ПО на базе метамодели RBF позволило уменьшить массу бампера автомобиля на 16 % (с 3,14 до 2,64 кг) при сохранении исходных параметров жесткости и энергоемкости.

5. Использование метамодели RBF для решения задачи ПО кабины грузового автомобиля с целью удовлетворения требованиям пассивной безопасности позволило добиться обеспечения жизненного пространства при рациональном увеличении массы конструкции на 38 %.

## Литература

- [1] Hornik K., Stinchcombe M., White H. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural networks*, 1990, vol. 3, pp. 551–560, doi: 10.1016/0893-6080(90)90005-6
- [2] Buhmann M.D. *Radial basis functions: theory and implementations*. Cambridge University, 2003. URL: <http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2002034983.pdf> (дата обращения 15 декабря 2018).
- [3] Krige D.G. *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*. Master's thesis, University of the Witwatersrand, 1951.
- [4] Jin R., Chen W., Sudjianto A. On sequential sampling for global metamodeling in engineering design. *DETC-DAC34092, ASME Design Automation Conference*, 2002, doi: 10.1115/DETC2002/DAC-34092. URL: [https://www.researchgate.net/publication/216300850\\_On\\_Sequential\\_Sampling\\_for\\_Global\\_Metamodeling\\_in\\_Engineering\\_Design/download](https://www.researchgate.net/publication/216300850_On_Sequential_Sampling_for_Global_Metamodeling_in_Engineering_Design/download) (дата обращения 15 декабря 2018).
- [5] Roux W.J., Stander N., Haftka R. Response Surface Approximations for Structural Optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 1998, no. 42(3), pp. 517–534, doi: 10.1002/(SICI)1097-0207(19980615)42:3<517::AID-NME370>3.0.CO;2-L
- [6] Wilson B., Cappelleri D.J., Frecker M.I., Simpson T.W. Efficient Pareto frontier exploration using surrogate approximations. *Optimization and Engineering*, 2001, no. 2(1), pp. 31–50.
- [7] Snyman J.A. LFOPC leap-frog algorithm for constrained optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 2000, vol. 40, iss. 8, pp. 1085–1096, doi: 10.1016/S0898-1221(00)85018-X
- [8] Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge, MIT Press, 1992. 225 p.
- [9] Goldberg D.E. *Genetic algorithms in search. Optimization and machine learning*. MA, USA, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, 1989. 432 p.
- [10] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, iss. 4598, pp. 671–680, doi: 10.1126/science.220.4598.671
- [11] Pincus M. A Monte Carlo method for the approximate solution of certain types of constrained optimization problems. *Operations research*, 1970, no. 18, pp. 1225–1228, doi: 10.1287/opre.18.6.1225
- [12] Oman M., Nilsson L. Structural optimization of product families subjected to multiple crash load cases. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, no. 41, pp. 797–815, doi: 10.1007/s00158-009-0471-4
- [13] Шабан Б.А., Зузов В.Н. Особенности моделирования каркасных элементов кузовов и кабин автомобилей при исследовании пассивной безопасности. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, no. 11. URL: <http://technomag.edu.ru/en/doc/486675.html> (дата обращения 15 декабря 2018), doi: 10.7463/1112.0486675
- [14] Xiao Z., Fang J., Sun G., Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Advances in Engineering Software*, 2015, vol. 85, no. 2132, pp. 81–95, doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.005
- [15] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Топологическая оптимизация конструкции бампера автомобиля при ударном воздействии с позиций пассивной безопасности. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2018, № 2(36), с. 2–9.
- [16] Ingber L. Adaptive simulated annealing (ASA). *Lester Ingber Research*, 1993. URL: [https://www.ingber.com/asa96\\_lessons.pdf](https://www.ingber.com/asa96_lessons.pdf) (дата обращения 15 сентября 2018).

- [17] Schuur P.C. Classification of acceptance criteria for the simulated annealing algorithm. *Mathematics of Operations Research*, 1997, no. 22(2), pp. 266–275, doi: 10.1287/moor.22.2.266
- [18] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response Surface Methodology*. Process and Product Optimization using Designed Experiments, Wiley, 1995. 856 p.
- [19] Шабан Б., Зузов В.Н. Совершенствование кабин грузовых автомобилей на стадии проектирования для удовлетворения требованиям пассивной безопасности. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 12. URL: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (дата обращения 10 ноября 2018), doi: 10.18698/2308-6033-2013-12-1130
- [20] Гончаров Р.Б., Зузов В.Н. Проблемы поиска оптимальных решений для обеспечения пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при минимальной массе. *Известия Московского государственного технического университета МАМИ*, 2019, № 1, с. 2–14.

## References

- [1] Hornik K., Stinchcombe M., White H. Universal approximation of an unknown mapping and its derivatives using multilayer feedforward networks. *Neural networks*, 1990, vol. 3, pp. 551–560, doi: 10.1016/0893-6080(90)90005-6
- [2] Buhmann M.D. *Radial basis functions: theory and implementations*. Cambridge University, 2003. Available at: <http://catdir.loc.gov/catdir/samples/cam033/2002034983.pdf> (accessed 15 December 2018).
- [3] Krige D.G. *A statistical approach to some mine valuation and allied problems on the Witwatersrand*. Master's thesis, University of the Witwatersrand, 1951.
- [4] Jin R., Chen W., Sudjianto A. On sequential sampling for global metamodeling in engineering design. *DETC-DAC34092, ASME Design Automation Conference*, 2002, doi: 10.1115/DETC2002/DAC-34092. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/216300850\\_On\\_Sequential\\_Sampling\\_for\\_Global\\_Metamodeling\\_in\\_Engineering\\_Design/download](https://www.researchgate.net/publication/216300850_On_Sequential_Sampling_for_Global_Metamodeling_in_Engineering_Design/download) (accessed 15 December 2018).
- [5] Roux W.J., Stander N., Haftka R. Response Surface Approximations for Structural Optimization. *International journal for numerical methods in engineering*, 1998, no. 42(3), pp. 517–534, doi: 10.1002/(SICI)1097-0207(19980615)42:3<517::AID-NME370>3.0.CO;2-L
- [6] Wilson B., Cappelleri D.J., Frecker M.I., Simpson T.W. Efficient Pareto frontier exploration using surrogate approximations. *Optimization and Engineering*, 2001, no. 2(1), pp. 31–50.
- [7] Snyman J.A. LFOPC leap-frog algorithm for constrained optimization. *Computers and Mathematics with Applications*, 2000, vol. 40, iss. 8, pp. 1085–1096, doi: 10.1016/S0898-1221(00)85018-X
- [8] Holland J.H. *Adaptation in natural and artificial systems*. Cambridge, MIT Press, 1992. 225 p.
- [9] Goldberg D.E. *Genetic algorithms in search. Optimization and machine learning*. MA, USA, Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, 1989. 432 p.
- [10] Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, iss. 4598, pp. 671–680, doi: 10.1126/science.220.4598.671
- [11] Pincus M. A Monte Carlo method for the approximate solution of certain types of constrained optimization problems. *Operations research*, 1970, no. 18, pp. 1225–1228, doi: 10.1287/opre.18.6.1225
- [12] Oman M., Nilsson L. Structural optimization of product families subjected to multiple crash load cases. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2010, no. 41, pp. 797–815, doi: 10.1007/s00158-009-0471-4
- [13] Shaban B.A., Zuzov V.N. Features of wireframe modeling bodies and cabs of cars while investigating passive safety. *Science and Education of Bauman MSTU*, 2012, no. 11 (in Russ.). Available at: <http://technomag.edu.ru/en/doc/486675.html> (accessed 15 December 2018), doi: 10.7463/1112.0486675
- [14] Xiao Z., Fang J., Sun G., Li Q. Crashworthiness design for functionally graded foam-filled bumper beam. *Advances in Engineering Software*, 2015, vol. 85, no. 2132, pp. 81–95, doi: 10.1016/j.advengsoft.2015.03.005

- [15] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Topological optimization of the automobile bumper design under impact from the passive safety standpoint. *Izvestiya MGTU "MAMI"*, 2018, no. 2(36), pp. 2–9 (in Russ.).
- [16] Ingber L. *Adaptive simulated annealing (ASA)*. 1993. Available at: [https://www.ingber.com/asa96\\_lessons.pdf](https://www.ingber.com/asa96_lessons.pdf) (accessed 15 September 2018).
- [17] Schuur P.C. Classification of acceptance criteria for the simulated annealing algorithm. *Mathematics of Operations Research*, 1997, no. 22(2), pp. 266–275, doi: 10.1287/moor.22.2.266
- [18] Myers R.H., Montgomery D.C., Anderson-Cook C.M. *Response Surface Methodology*. Process and Product Optimization using Designed Experiments, Wiley, 1995. 856 p.
- [19] Shaban B., Zuzov V.N. Improving of construction cabs truck at the designing stage to satisfy passive safety requirements at frontal impact. *Engineering Journal: Science and Innovation*, 2013, no. 12 (in Russ.). Available at: <http://engjournal.ru/articles/1130/1130.pdf> (accessed 10 November 2018), doi: 10.18698/2308-6033-2013-12-1130
- [20] Goncharov R.B., Zuzov V.N. Problemy poiska optimal'nykh resheniy dlya obespecheniya passivnoy bezopasnosti kabin gruzovykh avtomobiley pri minimal'noy masse [Problems of finding the best solutions to ensure the passive safety of the cabins of trucks at a minimum weight]. *Izvestiia Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI* [Proceedings of the Moscow State Technical University MAMI], 2019, no. 1, pp. 2–14 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.01.2019

## Информация об авторе

**ГОНЧАРОВ Роман Борисович** — аспирант кафедры «Колесные машины». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: [goncharov.roman@bmstu.ru](mailto:goncharov.roman@bmstu.ru)).

## Information about the author

**GONCHAROV Roman Borisovich** — Postgraduate, Department of Wheeled Vehicles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [goncharov.roman@bmstu.ru](mailto:goncharov.roman@bmstu.ru)).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гончаров Р.Б. Исследование эффективности алгоритмов параметрической оптимизации применительно к процессам ударного воздействия на примере бампера и кабины автомобиля. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 4, с. 28–40, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-28-40

### Please cite this article in English as:

Goncharov R.B. A Study of the Effectiveness of Parametric Optimization Algorithms: Collision Impact Processes in Bumper Beams and Truck Cabins. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 4, pp. 28–40, doi: 10.18698/0536-1044-2019-4-28-40