



ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ОБОЛОЧЕК ВРАЩЕНИЯ ПРИ ОГРАНИЧЕНИЯХ НА ФЛАТТЕР

М. В. Чугунов, Н. Д. Кузьмичёв, И. Н. Полунина
ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (г. Саранск, Россия)

Теория и практика оптимизации занимает важное место в естествознании и технике. При этом алгоритмы решения оптимизационных задач требуют многократного обращения к процедуре вычисления функций оптимизации (прямой расчет). Эти функции, как правило, заданы алгоритмически в пространстве высокой размерности и трудновычислимы. В связи с этим актуальной является задача построения упрощенных метамоделей (аппроксимаций) для объекта оптимизации, адекватных исходной «точной» модели в некоторой подобласти пространства и не требующих для своего анализа больших вычислительных затрат. Целью данной работы является количественная оценка вычислительной эффективности решения оптимизационных задач, основанных на аппроксимациях разного типа. В качестве объекта оптимизации рассматривается оболочка вращения, подверженная флаттеру. Исходной моделью является конечно-элементная модель оболочки, для которой образующая и распределение толщины вдоль меридиана заданы Безье-функциями. Определение критического параметра флаттера в алгебраической части сводится к решению несимметричной обобщенной задачи на собственные значения, которая реализована программно в виде AddIn-приложения SolidWorks. Для построения упрощенных метамоделей используются аппроксимации двух видов: локальные и промежуточные. В первом случае решение задачи сводится к применению метода Хана и Пауэлла, во втором – к поэтапной замене исходной модели метамоделями в подобластях пространства оптимизации конечных размеров, анализу адекватности аппроксимаций и определению на этой основе стратегии поиска. Нами была решена задача весовой оптимизации оболочки, подверженной сверхзвуковому флаттеру с использованием локальных и промежуточных многоточечных аппроксимаций. В качестве управляемых параметров в статье рассматриваются координаты ключевых точек Безье; проводится сравнительный анализ вычислительной эффективности решения в каждом из этих двух случаев. В качестве критерия вычислительной эффективности рассматривается количество обращений к процедуре прямого расчета.

Ключевые слова: оптимизация, нелинейное математическое программирование, флаттер, метамоделю оптимизации, локальная многоточечная аппроксимация, промежуточная многоточечная аппроксимация

COMPUTATIONAL EFFICIENCY FOR OPTIMIZATION PROBLEMS OF REVOLUTION SHELLS WITH FLUTTER CONSTRAINTS

M. V. Chugunov, N. D. Kuzmichev, I. N. Polunina
Ogarev Mordovia State University (Saransk, Russia)

The theory and practice of optimization takes an important place in natural sciences and engineering. Thus, algorithms of solving the optimization problems require repeated reference to the evaluation procedure of the optimization functions (direct computing). As a rule, these functions are algorithmically specified in the high-dimensional space and computationally expensive. In this context, the relevant problem is to create the simplified metamodels (approximations) for the optimization object. The said metamodels must be adequate for an initial "exact" model in a subarea of the space and computationally not expensive. The purpose of this work is the quantitative assessment of computational efficiency for solving the optimization problems based on different approximations types. The revolution shell subjected to flutter is considered as the object of optimization. The Finite Element Model (FEM) for the revolution shell, which meridian and thickness distribution along a meridian are set by Bezier functions is considered as the



initial model. Determination of the critical parameter of flutter in the algebraic part is reduced to the solution of the asymmetric eigenvalue problem, which is realized programmatically in the form of SolidWorks AddIn-application. To create the simplified metamodels, the approximations of two types are used: local and mid-range. In the first case, the solution of the problem is consolidated to application of the Han - Powell method, in the second case – to stage-by-stage replacement of initial model by metamodels in the subareas of the optimization space in the finite sizes, to the analysis of adequacy of approximations and to definition on this basis of the strategy of the search. The problem of weight optimization for the revolution shell, subjected to a supersonic flutter with local and mid-range multipoint approximations is solved. The coordinates of the Bezier-key points are considered as the control parameters, and their values corresponding to an optimum, coincide for the first and the second of used approaches to approximation. The comparative analysis of computing efficiency of the results is provided in each of these two cases. A number of the calling to procedure of direct computing is considered as the computational efficiency.

Keywords: optimization, nonlinear mathematical programming, flutter, optimization metamodel, local multipoint approximation, mid-range multipoint approximation

Рассматриваемая в статье задача относится к классу задач анализа и оптимизации панелей (пластин и оболочек) с точки зрения устойчивости к флаттеру. В настоящее время известны два типа панельного флаттера: первый – связанный, возникающий при взаимодействии двух собственных мод панели; второй – одномодовый, высокочастотный [1; 6]. В данной работе рассматривается первый тип флаттера при высоких сверхзвуковых скоростях с использованием поршневой (квазистатической) аэродинамической теории.

Для получения флаттерных характеристик в качестве базовой используется конечноэлементная модель, что дает возможность рассматривать геометрию оболочки в наиболее общем виде. Однако обращение к процедуре анализа состояния объекта оптимизации (прямой расчет) в оптимизационных алгоритмах реализуется многократно и связан со значительными вычислительными затратами. Одним из подходов, обеспечивающих их снижение является подход, основанный на поэтапной замене исходной «точной» модели упрощенной метамоделью.

В теории оптимизации указанный подход хорошо известен, и при его реализации, как правило, рассматривают аппроксимации трех видов: локальную, глобальную и промежуточную [8; 10] (последняя в англоязычной литературе именуется как *mid-range*).

Целью данной работы является исследование вычислительной эффективности решения задачи указанно-

го типа с использованием локальных и промежуточных аппроксимаций.

1. Конечноэлементная модель оболочки

Осесимметричная оболочка рассматривается как подконструкция составной тонкостенной конструкции вращения. При этом формируется ее параметрическая модель, описываемая Безье-функциями и определяемая координатами ключевых точек в двух подпространствах. В двумерном подпространстве, совпадающем с плоскостью осевого сечения оболочки, определяется меридиан, а в одномерном – распределение толщины вдоль меридиана (рис. 1).

$$\begin{aligned}
 x(t_b) &= \sum_{i=0}^{N_g-1} \Phi_{N_g,i}(t_b)x_i, \\
 y(t_b) &= \sum_{i=0}^{N_g-1} \Phi_{N_g,i}(t_b)y_i, \\
 h(t_b) &= \sum_{j=0}^{N_t-1} \Phi_{N_t,j}(t_b)h_j, \\
 \Phi_{N_g,i}(t_b) &= C_{N_g}^{(i)} t_b^i (1-t_b)^{N_g-i}, \\
 C_{N_g}^{(i)} &= \frac{N_g!}{i!(N_g-1)!}, \\
 \Phi_{N_t,j}(t_b) &= C_{N_t}^{(j)} t_b^j (1-t_b)^{N_t-j}, \\
 C_{N_t}^{(j)} &= \frac{N_t!}{j!(N_t-1)!}, 0 \leq t_b \leq 1.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

В этих формулах $x(t_b), y(t_b), h(t_b)$ – искомые функции, x_i и y_i – координаты ключевых точек сплайна; $i = 0, N_g - 1$, где N_g – количество ключевых точек, задающих образующую оболочки; h_j – координаты ключевых

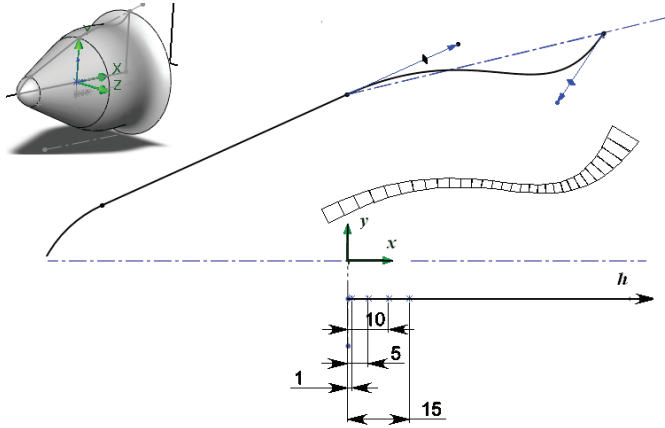


точек на числовой оси; $j = \overline{0, N_t - 1}$, где N_t – количество ключевых точек, задающих распределение толщины вдоль образующей. На рис. 1 показан вариант оболочки при некотором фиксированном наборе значений координат всех ключевых точек. В качестве конечного элемента используется тонкостенный усеченный конус [4]. На основе принципа Гамильтона

получаем уравнение колебаний консервативной системы как ансамбля конечных элементов:

$$(K - \omega^2 M)u_A = 0, \quad (2)$$

где K – матрица жесткости; M – матрица масс; u_A – вектор амплитуд перемещений для узловых точек; ω – частота собственных колебаний.



Р и с. 1. Геометрическая модель оболочки
F i g. 1. Geometric model of shell

Аэродинамическое давление определяется в соответствии с известным выражением [2]:

$$p_a = \frac{2q}{\sqrt{M^2 - 1}} \left(\frac{\partial w}{\partial s} + \frac{1}{U} \frac{M^2 - 2}{M^2 - 1} \frac{\partial w}{\partial t} \right), \quad (3)$$

где $q = \frac{\rho_a U^2}{2}$ – динамическое давление потока; ρ_a – плотность газа; U – скорость потока; M – число Маха. В этом случае уравнение колебаний оболочки как неконсервативной системы приобретает следующий вид [3; 5]:

$$(K + p^2 M + p \rho_a D + \rho_a A)u_A = 0, \quad (4)$$

где A и D – матрицы ансамбля конечных элементов (аэродинамической жесткости и аэродинамического демпфирования соответственно); p – комплексная собственная частота. Если собственные вектора задачи (2) используются в качестве нового базиса, то уравнение флаттера приобретает следующую форму:

$$\tilde{G}u + p \rho_a \tilde{D}u + p^2 E u = 0, \quad (5)$$

где $\tilde{G} = \Omega + \rho_a \tilde{A}$; Ω – диагональная матрица, содержащая собственные значения, т. е. квадраты частот, соответствующих колебаниям в вакууме $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2$, и т. д. на главной диаго-



нали; $\tilde{A} = R^T A R$, $\tilde{D} = R^T D R$; u – собственный вектор в новом базисе; E – единичная матрица.

Дальнейшее решение сводится к анализу изменения комплексных собственных частот P при возрастании параметра потока. В качестве критерия наступления флаттера рассматривается появление в спектре кратных собственных значений с последующим выходом одного из них на положительную полуплоскость, что и соответствует колебаниям с возрастающей амплитудой, т. е. флаттеру. Детали построения и тестирования данной конечноэлементной модели подробно изложены в работе [4].

2. Постановка и решение оптимизационной задачи

Оптимизационная задача ставится и решается как задача нелинейного математического программирования (НМП) в следующем виде:

найти $\min_{x \in R^n} C(x)$ при ограничениях

$$A_i \leq x_i \leq B_i, i = \overline{1, n}, \phi_k(x) \geq 0, k = \overline{1, m}, \quad (6)$$

где x – вектор управляемых параметров; $C(x)$ – целевая функция, выражающая собой критерий качества объекта проектирования (массу оболочки); n – количество управляемых параметров и, соответственно, количество геометрических ограничений (размерность пространства оптимизации); A_i и B_i , – геометрические ограничения снизу и сверху на управляемые параметры соответственно; m – количество функциональных ограничений. В качестве управляемых параметров рассматриваются координаты ключевых точек Безье (1).

При этом оптимизационная задача (6) решается с использованием аппроксимаций как последовательность оптимизационных задач с поэтапной заменой функций оптимизации упро-

щенными аналитическими моделями (метамоделями), сформированными на основе анализа результатов экспериментов с исходной конечноэлементной моделью.

Промежуточные аппроксимации

В этом случае метамодели строятся поэтапно в отдельных подобластях пространства оптимизации конечных размеров, определенных движущимися границами на каждом этапе итерационного процесса. Таким образом, вместо исходной оптимизационной задачи (6) имеем серию оптимизационных задач следующего вида:

найти $\min_{x \in R^n} \tilde{C}^{(r)}(x)$ при ограничениях

$$\tilde{A}_i^{(r)} \leq x_i^{(r)} \leq \tilde{B}_i^{(r)}, \quad i = \overline{1, n}, \phi_k^{(r)}(x) \geq 0, k = \overline{1, m}, r = \overline{1, N}, \quad (7)$$

где $\tilde{C}^{(r)}(x)$ – аппроксимация целевой функции; $\tilde{\phi}_k^{(r)}(x)$ – аппроксимации функциональных ограничений; $\tilde{A}_i^{(r)}$ и $\tilde{B}_i^{(r)}$ – геометрические ограничения снизу и сверху соответственно; индекс r соответствует номеру этапа оптимизационного процесса; N – количество этапов, необходимое для достижения заданной точности.

Структура метамodelей такова, что включают в себя свободные параметры a_i , $i = \overline{0, n}$, определяемые по результатам экспериментов, проведенных с конечноэлементной моделью объекта в P точках, назначенных в пространстве R^n согласно некоторому плану эксперимента. Для определения свободных параметров используется метод взвешенных наименьших квадратов [8; 10], а в качестве аппроксимирующих функций – мультипликативная модель следующего вида:

$$\tilde{C}(a) = a_0 \prod_{i=1}^n x_i^{a_i} a_i. \quad (8)$$



Локальная аппроксимация

В качестве метода, предусматривающего локальные аппроксимации, в данной работе используется метод Пауэлла [9] как последовательность задач квадратичного программирования:

$$\min_{d \in R^n} \frac{1}{2} d^T H_r d + \nabla C(x_r)^T d \quad (9)$$

при ограничениях

$$\nabla \phi_k(x_r)^T d + \phi_k(x_r) \geq 0, k = \overline{1, m}.$$

Матрица H_r представляет собой положительно определенную аппроксимацию Гесса функции Лагранжа $L(x, \lambda) = C(x) - \lambda^T \varphi(x)$, $\varphi(x) = (\phi_1(x), \phi_2(x), \dots, \phi_m(x))^T$, r – номер итерации. При этом положительная определенность матрицы H_r обеспечивается итерационной BFGS-процедурой, использующей только градиенты функций и не требующей явного вычисления вторых производных. Компоненты вектора множителей Лагранжа λ , соответствующие неактивным ограничениям, автоматически обращаются в нуль. Существенной особенностью метода является также то, что задача минимизации (1) формулируется в терминах шага d из некоторой исходной точки в направлении к оптимальной. Таким образом, $x_{r+1} = x_r + \alpha_r d_r$. Параметр α_r определяется как результат минимизации одномерной функции, исходя из предложенного Пауэллом критерия оптимального выигрыша по следующей схеме:

найти $\min_{\alpha > 0} \Theta(\alpha)$, где

$$\Theta(\alpha) = C(x + \alpha d) + \sum_{i=1}^m \mu_i |\min(0, \phi_i(x + \alpha d))|;$$

$$\mu_i = \max(|\lambda_i|, \frac{1}{2}(\mu_i^* + |\lambda_i|)), \text{ где } \mu_i^* -$$

значение параметра μ_i на предыдущей итерации (на первой итерации $\mu_i = |\lambda_i|$). Самой важной причиной для выбора нами этого алгоритма оптимизации являлся тот факт, что он относится к классу квазиньютоновских методов и требует для своей реализации только первые производные функций, т. е. анализ чувствительности первого порядка.

3. Анализ чувствительности

Функциональные ограничения $\phi_k^{(r)}(x)$ задачи (1) формулируются в виде $\phi_k^{(r)}(x) = \frac{\rho_f^{(k)}}{\rho_0^{\min}} - 1$, где $\rho_f^{(k)}$ – плотность потока, соответствующая наступлению флаттера с формой колебаний, соответствующей волновому числу $k = n_g$, $n_g = \overline{n_1, n_2}$ (n_1 и n_2 – начальное и конечное значение волнового числа в спектре учитываемых собственных значений задачи (4)) – минимальная плотность флаттера, соответствующая исходному проектному решению. Таким образом, в части анализа чувствительности актуальной является задача определения частных производных $\phi_k^{(r)}(x)_i = \frac{1}{\rho_0^{\min}} \frac{\partial \rho_f^{(k)}}{\partial x_i}$. В соответствии с работой [3] производные от плотности должны определяться следующим образом:

$$\frac{\partial \rho_f^{(k)}}{\partial x_i} = \frac{\operatorname{Re}[(v^T T_{,x_i} u) / (v^T T_p u)]}{\operatorname{Re}[(v^T T_{,A} u) / (v^T T_p u)]}, \quad (10)$$

где матрица $T = \Omega + p \tilde{A} + \tilde{G} + p p_a \tilde{D} + p^2 E$, $T_{,x_i}, T_{,p_i}, T_{,p_{ai}}$ – частные производные от $x(t_b)$ по x_i , p и p_a соответственно; v – собственный вектор сопряженной по отношению к (5) задачи. В работе [12] представлены детали численной реализации формулы (10) и результаты

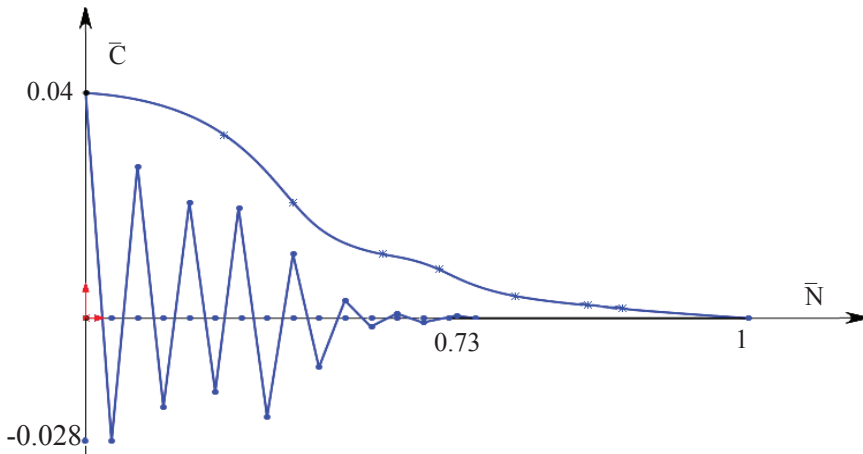
в отношении анализа чувствительности к флаттеру оболочек различного вида.

4. Программная реализация

Высокий уровень развития программных средств в виде САЕ-систем делает бессмысленной разработку программного обеспечения «с нуля», при этом проблема расширения функционала этих систем является достаточно актуальной. Одним из примеров решения задач рассматриваемого класса на подобной основе может служить, в частности, подход, представленный в работе [7]. В данной работе программная реализация представляет собой два dll-модуля, являющиеся AddIn-приложениями к системе SolidWorks и в полной мере использующими функционал SolidWorks на основе API и COM-интерфейсов [4–5]. В частности, SolidWorks используется в качестве пост- и препроцессорного средства; кроме этого, используется функционал SolidWorks Flow Simulation для решения аэродинамической задачи. В остальном изложенные в данной работе методы и алгоритмы расширяют штатный функционал SolidWorks.

5. Результаты и выводы

В работе [11] представлены результаты решения задачи оптимизации по массе оболочки вращения, геометрия которой и распределение толщины заданы согласно (1), $N_g = 2$, $N_t = 2$, а в качестве метода решения частных задач (7) использовался метод Бокса (нулевого порядка), будем условно этот подход идентифицировать символом А. В данной работе указанная задача была решена двумя методами: 1) на основе многоточечных промежуточных аппроксимаций и с использованием метода Хана и Пауэлла для решения задач (7); 2) на основе локальных аппроксимаций в виде (11), т. е. метод Хана и Пауэлла был использован напрямую без построения промежуточных метамоделей (10). Будем идентифицировать два последних подхода как В и С соответственно. Результаты решения задачи А, В и С полностью совпали, при этом с точки зрения вычислительной эффективности подходы А и В друг от друга практически не отличаются, поскольку анализ метамоделей (8) не требует значительных вычислительных затрат.



Р и с. 2. Анализ вычислительной эффективности
F i g. 2. Analysis of computational efficiency



Одним из важных критериев вычислительной эффективности оптимизационного алгоритма является количество обращений к процедуре прямого расчета. Поэтому сравнение вычислительной эффективности подходов В и С представлен на рис. 2 в следующих безразмерных координатах: по оси абсцисс откладывается параметр $\bar{N} = N_0 / N_{Amax}$, где N_0 – количество совершенных обращений к процедуре прямого расчета; N_{Amax} – общее количество обращений к процедуре прямого расчета в подходе В, $\bar{C} = \frac{C - C_{opt}}{C_{opt}}$, где C – значение целевой функции при N_0 -ном обращении; C_{opt} – оптимальное значение целевой функции.

В заключение отметим, что метод промежуточных аппроксимаций обеспечивает значительное снижение вычислительных затрат (до 30 %) по сравнению с аппроксимациями локального типа. При этом выбор метода решения частной оптимизационной задачи с точки зрения трудоемкости не имеет существенного значения.

Практический опыт работы, полученный в процессе решения оптимизационных задач разного рода, позволяет также утверждать, что метод промежуточных аппроксимаций наиболее эффективен на начальных стадиях оптимизации в режиме интерактивного вариантного проектирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Алгазин, С. Д. Флаттер пластин и оболочек / С. Д. Алгазин, И. А. Кийко. – Москва : Наука, 2006. – 247 с.
2. Вольмир, А. С. Оболочки в потоке жидкости и газа : Задачи гидроупругости / А. С. Вольмир – Москва : Наука, 1979. – 387 с.
3. Сейранян, А. П. Оптимизации флаттерных характеристик / А. П. Сейранян, А. В. Шаранюк // Труды Армянской Академии Наук. – 1984. – Т. XXXVII, № 5. – С. 38–50.
4. Чугунов, М. В. Анализ сверхзвукового флаттера осесимметричной оболочки с меридианом в виде сплайна в среде SolidWorks на базе API [Электронный ресурс] / М. В. Чугунов // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. – 2012. – № 4. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/348787.html>.
В статье решается задача о сверхзвуковом флаттере осесимметричной оболочки при числах Маха, больших 1.7. Рассматриваемая оболочка является элементом составной конструкции вращения, и образующая ее задана Безье-сплайном. В качестве метода решения используется МКЭ. Приводится решение тестовых задач.
5. Чугунов, М. В. Программный модуль для решения задач оптимального проектирования в среде SolidWorks на базе API [Электронный ресурс] / М. В. Чугунов, Ю. А. Небайкина // Наука и образование : электронное научно-техническое издание. – 2011. – № 9. – URL: <http://technomag.edu.ru/doc/206217.html>.
В работе представлена методика и ее программная реализация для решения задач оптимального проектирования на базе API SolidWorks. В процессе решения задачи функции оптимизации поэтапно аппроксимируются упрощенными аналитическими зависимостями, анализ которых не требует больших вычислительных затрат. Приложение реализовано в виде AddIn DLL-модуля, функционирующего в адресном пространстве SolidWorks и использующего COM-интерфейс.
6. Экспериментальное наблюдение одномодового панельного флаттера в сверхзвуковом потоке газа / В. В. Веденеев [и др.] // Доклады академии наук. – 2009. – Т. 427, № 6. – С. 768–770.
7. Vedeneev, V. V. Numerical analysis of single mode panel flutter in a viscous gas Flow / V. V. Vedeneev // Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels FEDSM-ICNMM2010. – pp. 1–6.



8. **Polynkin, A.** Mid-range metamodel assembly building based on linear regression for large scale optimization problems. / A. Polynkin, V. V. Toropov // Structural and Multidisciplinary Optimization. – 2011. – № 4. – pp. 1–13.
9. **Powell, M. J. D.** A fast algorithm for nonlinear constrained optimization calculations / M. J. D. Powell // Report DAMTP 77/NA 2, University of Cambridge. – 1977.
10. **Toropov, V. V.** Multipoint approximation method in optimization problems with expensive function values / V. V. Toropov // In: Sydow, A. (ed.) Computational Systems Analysis, Elsevier. – 1992. – pp. 207–212.
11. **Chugunov, M. V.** Optimization of axisymmetric shells for flutter / M. V. Chugunov, V. P. Malkov, E. N. Batrakov, V. V. Toropov // Proc. of 1st ASMO UK / ISSMO Conf. on Engineering Design Optimization. Pkley, MCB University Press. – 1999. – pp. 119–125.
12. **Chugunov, M. V.** Optimization of axisymmetric thin-walled shells with flutter constraints by simulation approach method and sensitivity analysis / M. V. Chugunov, V. P. Malkov // Transaction of St-Petersburg academy of sciences for strength problems. – 1997. – Vol. 1. – pp. 93–100.

Поступила 19.01.2015 г.

Об авторах:

Чугунов Михаил Владимирович, заведующий кафедрой общетехнических дисциплин Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат технических наук, доцент, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5318-5684>**, m.v.chugunov@mail.ru

Кузьмичёв Николай Дмитриевич, заведующий кафедрой общенаучных дисциплин Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), доктор физико-математических наук, профессор, kuzmichevnd@rambler.ru

Полунина Ирина Николаевна, доцент кафедры общетехнических дисциплин Рузавского института машиностроения ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарёва» (Россия, г. Рузаевка, ул. Ленина, д. 93), кандидат педагогических наук, **ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1093-8401>**, my_pk@mail.ru

Для цитирования: Чугунов, М. В. Вычислительная эффективность для решения задачи оптимизации оболочек вращения при ограничениях на флаттер / М. В. Чугунов, Н. Д. Кузьмичёв, И. Н. Полунина // Вестник Мордовского университета. – 2015. – Т. 25, № 4. – С. 63–71. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.063

REFERENCES

1. Algazin S. D., Kiyko I. A. Flutter plastin i obolochek [Flutter of plates and coverings]. Moscow: Nauka Publ., 2006, 247 p.
 2. Volmir A. S. Obolochki v potoke zhidkosti i gaza: Zadachi gidrouprugosti [Coverings in streams of fluids and gases: problems of hydroelasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 387 p.
 3. Seranyan A. P., Sharanyuk A. V. Optimizatsiya flatternykh kharakteristik [Optimization of flutter properties]. *Trudy Armyanskoy Akademii Nauk* [Proceedings of Academy of Sciences of Armenia], 1984, vol. XXXVII, no. 5, pp. 38–50.
 4. Chugunov M. V. Analiz sverkhzvukovogo flattera osesimmetrichnoy obolochki s meridianom v vide splayna v srede SolidWorks na baze API [Analysis of supersonic flutter of axis-symmetrical covering with spline meridian by means of SolidWorks API]. *Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye* [Science and education: electronic academic and technical publication]. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/348787.html>.
- The problem of supersonic flutter of an axisymmetric shell for Mach number greater than 1.7 is solved in the article. This shell is an element of a complex structure of rotation, and its meridian is formed with Bezier-spline. FEM is used for the analysis. Solutions of test tasks are provided.*



5. Chugunov M. V., Nebaykina Yu. A. Programmnyy modul dlya resheniya zadach optimalnogo proyektirovaniya v srede SolidWorks na baze API [Optimization of designing with a programme unit by means of SolidWorks API]. *Nauka i obrazovaniye: elektronnoye nauchno-tekhnicheskoye izdaniye* [Science and education: electronic academic and technical publication]. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/206217.html>.

The method and its program realization for the solution of optimal design problems on the basis of API SolidWorks are presented in this paper. In the course of the solution of this problem the functions are approximated step by step by the simplified analytical dependences, which do not demand big computing expenses for the analysis. The appendix is realized in the form of AddIn of the DLL module functioning in address space of SolidWorks with usage of the COM-interface.

6. Vedeneyev V. V. [et al.]. Eksperimentalnoye nablyudeniye odnomodovogo panelnogo flattera v sverkhzvukovom potoke gaza [Experimental observation of single-mode panel flutter in supersonic stream of gas]. *Doklady akademii nauk* [Proceedings of Academy of Sciences]. 2009, vol. 427, no. 6, pp. 768–770.

7. Vedeneyev V. V. Numerical analysis of single mode panel flutter in a viscous gas Flow. Proceedings of the ASME 2010 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting and 8th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels FEDSM-ICNMM2010, pp. 1–6.

8. Polynkin A., Toropov V. V. Mid-range metamodel assembly building based on linear regression for large scale optimization problems. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2011, no. 4, pp. 1–13.

9. Powell M. J. D. A fast algorithm for nonlinear constrained optimization calculations. Report DAMTP 77/NA 2, University of Cambridge. 1977.

10. Toropov V. V. Multipoint approximation method in optimization problems with expensive function values. In: Sydow, A. (ed.) *Computational Systems Analysis*, Elsevier. 1992, pp. 207–212.

11. Chugunov M. V., Malkov V. P., Batrakov Ye. N., Toropov V. V. Optimization of axisymmetric shells for flutter. Proc. of 1st ASMO UK. ISSMO Conf. on Engineering Design Optimization. Ilkley: MCB University Press Publ., 1999, pp. 119–125.

12. Chugunov M. V., Malkov V. P. Optimization of axisymmetric thin-walled shells with flutter constraints by simulation approach method and sensitivity analysis. *Transaction of St-Petersburg academy of sciences for strength problems*. 1997, vol. 1, pp. 93–100.

Submitted 19.01.2015

About the authors:

Chugunov Mikhail Vladimirovich, head of chair of General Technical Subjects of Ruzayevka Machinery Institute of Ogarev Mordovia State University (93, Lenina str., Ruzayevka, Russia), Ph.D. (Engineering), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0001-5318-5684>, m.v.chugunov@mail.ru

Kuzmichev Nikolay Dmitriyevich, head of chair of General Scientific Subjects of Ruzayevka Machinery Institute of Ogarev Mordovia State University (93, Lenina str., Ruzayevka, Russia), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor, kuzmichevnd@rambler.ru

Polunina Irina Nikolayevna, associate professor of chair of General Technical Subjects of Ruzayevka Machinery Institute of Ogarev Mordovia State University (93, Lenina str., Ruzayevka, Russia), Ph.D. (Pedagogy), **ORCID:** <http://orcid.org/0000-0002-1093-8401>, my_pk@mail.ru

For citation: Chugunov M. V., Kuzmichev N. D., Polunina I. N. Computational efficiency for optimization problems of revolution shells with flutter constraints. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin]. 2015, vol. 25, no. 4, pp. 63–71. DOI: 10.15507/0236-2910.025.201504.063