

# Зависимость предела выносливости от эксплуатационных факторов

Р.А. Заляев

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия

**Обоснование.** На стадии технического проектирования хвостовых отсеков тяжеловооруженных ракет-носителей актуализируется проблема учета влияния различных эксплуатационных факторов (к примеру, степени разреженности атмосферы либо кислотности топлива при работе конструкции внутри бака) на сопротивление элементов силовой схемы динамическому нагружению. При этом в научно-технической литературе практически отсутствуют результаты усталостных испытаний, в которых исследовалось бы влияние более двух-трех указанных факторов на конструкционную выносливость, что не позволяет сделать достоверный вывод о реальном характере искомой зависимости.

**Цель** — предложить подход к анализу результатов циклических испытаний, позволяющий получить описание зависимости предела выносливости от исследуемого фактора на интересующем отрезке значений данного фактора.

**Методы.** На основе метода наименьших квадратов разработан алгоритм, суть которого заключается в трехмерной аппроксимации [1] эмпирических данных, представляемых в пространстве координатами «десятичный логарифм количества циклов нагружения  $\lg N$ », «максимальное напряжение  $\sigma_{\max}$ » и «рассматриваемый фактор  $X$ » на основе линейной комбинации элементарных функций  $F_i(X, \lg N)$ , задаваемых оператором:

$$\sigma_{\max}(X, \lg N) = \sum_{i=1}^n A_i F_i(X, \lg N). \quad (1)$$

При этом поиск вектор-столбца коэффициентов  $A_i$  осуществляется оптимизацией ошибки аппроксимации методом градиентного спуска [2].

**Результаты.** Проведена проверка работоспособности предложенного метода, условно названного методом получения «поверхности усталости». Для анализа выбраны опытные данные источника [3], касающиеся испытаний титановых образцов, в которых в качестве фактора  $X$  принималась степень окружающего вакуума, количественно выраженная соотношением давления воздуха на уровне моря  $p_0$  к давлению окружающей объект атмосферы  $p$ . Составляющие функции в выражении (1) соответствуют поверхности, представляющей собой лоскут гиперболического параболоида (рис. 1).

Можно видеть, что на интересующей области отсутствуют какие-либо аномальные колебания и экстремумы, а с возрастанием степени вакуума предел выносливости (в каждом сечении по определенной базе) асимптотически стремится к фиксированной величине, что отражает физический смысл протекающих динамических процессов. В настоящей работе произведена сверка с известными результатами подобных

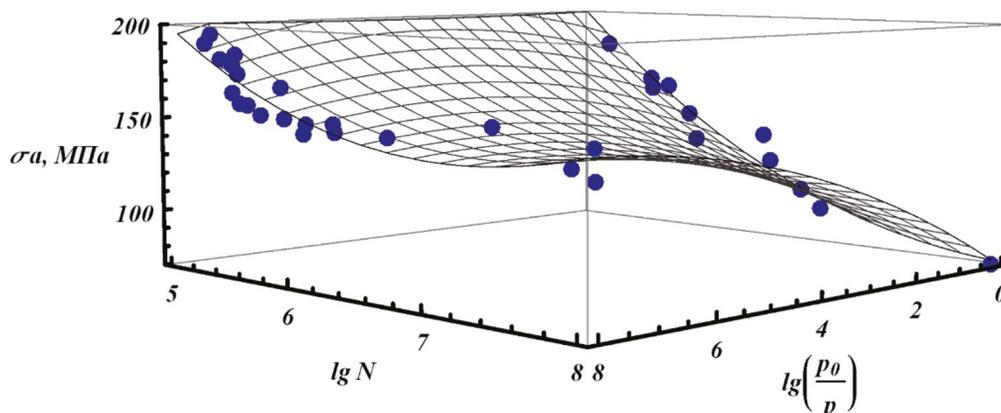


Рис. 1. Поверхность усталости

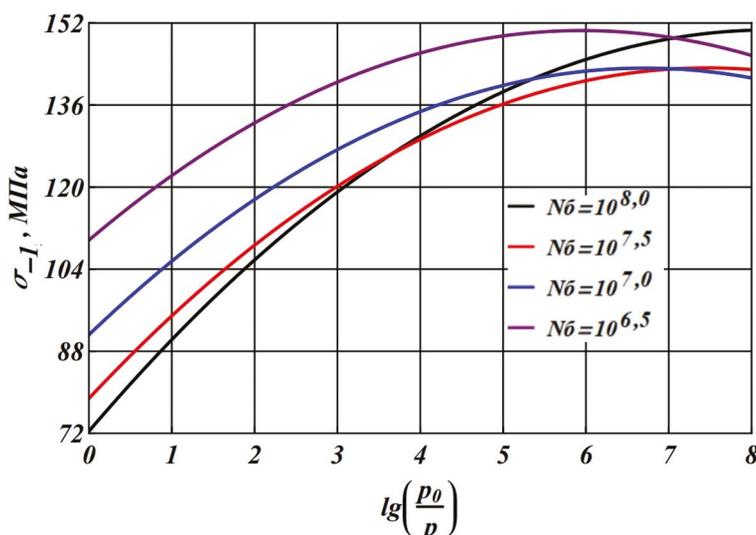


Рис. 2. Сечения поверхности усталости по различным базам испытаний

исследований. На рис. 2 приведены срезы поверхности усталости по нескольким базам испытаний. Для базы в 100 миллионов циклов и низкого вакуума значение предела выносливости хорошо соотносится с экспериментальными данными других авторов [4]. Характерно, что до среднего вакуума модель полностью отвечает физическому смыслу, охватывая области полета авиационной техники и верхних ступеней ракет, а отклонения в более разреженной зоне объясняются наличием допустимой ошибки величиной в 5 %.

**Выводы.** Метод получения поверхности усталости может быть потенциально использован при расчете на прочность силового каркаса тяжеловооруженных хвостовых отсеков ракет космического назначения с учетом степени вакуума. Совершенствование разработанного алгоритма предполагает исследование точности аппроксимации при применении отличных от классического градиентного метода подходов, а при его автоматизации основной перспективой является использование современных алгоритмических средств с целью решения задачи выбора элементарных функций для описания конфигурации поверхности усталости непосредственно самой программой.

**Ключевые слова:** пространственная аппроксимация; фактор выносливости; поверхность усталости; циклические испытания; знакопеременное нагружение.

## Список литературы

1. Daras N.J., Rassias T.M. Approximation and computation in science and engineering. Cham: Springer Nature Switzerland AG, 2022. 944 p. doi: 10.1007/978-3-030-84122-5
2. Черноуцкий И.Г. Градиентные методы оптимизации больших систем // Информатика, телекоммуникации и управление. 2014. № 4. С. 47–56. EDN: SUFIAX
3. Ismarubbie Z.N., Yussof H., Sugano M. Fatigue damage mechanism of titanium in vacuum and in air // Procedia Eng. 2012. Vol. 41. P. 1559–1565. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.350
4. Smarubbie Z.N., Sugano M. Environmental effects on fatigue failure micromechanisms in titanium // Mater Sci Eng A – Struct Mater: Prop Microstruct Process. 2004. Vol. 386, N 1-2. P. 222–233. doi: 10.1016/j.msea.2004.08.031

*Сведения об авторе:*

**Руслан Ансарович Заляев** — аспирант, группа A01\_02.05.13, Институт авиационной и ракетно-космической техники; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: zalyaefruslann@gmail.com

*Сведения о научном руководителе:*

**Виктор Алексеевич Кирпичёв** — доктор технических наук, профессор; профессор кафедры космического машиностроения имени генерального конструктора Д.И. Козлова; Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, Самара, Россия. E-mail: dean\_fla@mail.ru