

УДК 621.0, 621.8

doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-27-38

# Анализ методов расчета конструкций на выносливость при стационарных эксплуатационных режимах переменного нагружения с целью валидации отечественной CAE-системы APM StructFEM

В.В. Шелофаст<sup>1</sup>, М.Ю. Ростовцев<sup>2</sup>, А.И. Абдурашитов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> ООО НТЦ «АПМ»

## Analysis of Fatigue Calculation Methods for Variable Loading Stationary Operating Modes to Validate Domestic CAE Software — APM StructFEM

V.V. Shelofast<sup>1</sup>, M.Yu. Rostovtsev<sup>2</sup>, A.I. Abdurashitov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup> Research and Software Development Centre APM

Приведены результаты исследования точности расчета сопротивления усталости, полученные в отечественном APM StructFEM и зарубежном ANSYS программных комплексах, а также при аналитических вычислениях. Анализ точности расчета выполнен для участка трубопровода при различных нагрузках и их комбинации. Определены области наиболее эффективных решений для разных методов приведения переменных режимов к синусоидальному нагружению. Актуальность исследования продиктована реализацией в Российской Федерации программы импортозамещения в области стратегических технологий, к которым можно отнести и компьютерные решения инженерного анализа.

**Ключевые слова:** CAE-система, сопротивление усталости, усталостная долговечность, симметричное нагружение, несимметричное нагружение, методы приведения

The paper introduces the results of studying the possibilities and accuracy of numerical solutions of fatigue strength in the domestic software product APM StructFEM and in the well-known ANSYS software, as well as the results of analytical calculations for similar cases. The analysis of the accuracy of the obtained solutions is carried out on the example of the analysis of a section of the pipeline, for different variants of loadings and for a combination of these loadings. The areas of the most effective solutions obtained for various methods of reducing the operating variable modes to sinusoidal loading are determined. The study is caused by the implementation in the Russian Federation of an import substitution program in the field of strategic technologies, which can rightfully include computer solutions for engineering analysis.

**Keywords:** CAE-analysis, fatigue strength, durability, symmetric loading, asymmetric loading, reduction methods

При создании программного обеспечения для САЕ-систем крайне важно получать корректные результаты, определяющие суть изучаемых явлений. По этой причине обязательной процедурой инженерного анализа нового продукта является его валидация, под которой понимают числовую адекватность решений исследуемым процессам. Валидацию можно проводить сравнением с аналитическим решением или числовым, полученным в других системах, которые прошли аттестацию в надзорных органах и могут быть приняты в качестве эталона.

Программа импортозамещения, проводимая в РФ, предполагает разработку отечественных САЕ-систем, используемых при проектировании конструкций в России и за рубежом. Созданная в РФ система комплексного инженерного анализа АРМ Multiphysics адекватно описывает достаточно большое количество разнообразных мультифизических явлений. Заявленные возможности АРМ Multiphysics указывают на значительный вклад этого отечественного продукта в программу импортозамещения.

В состав системы АРМ Multiphysics входит программный комплекс (ПК) АРМ StructFEM, предназначенный для анализа динамики и прочности изделий.

С помощью этого ПК рассчитаны параметры сопротивления усталости, результаты моделирования проверены на адекватность реальным процессам усталостного разрушения.

Цель работы — описание численного расчета на выносливость конструкций при гармоническом нагружении, предложенного в отечественном ПК АРМ StructFEM, а также определение точности получаемых решений в зависимости от гипотез приведения асимметричной нагрузки к симметричной.

В качестве эталонного использован ПК ANSYS, который наиболее широко представлен на отечественном рынке и имеет все необходимые сертификаты, подтверждающие достаточную точность получаемых решений.

**Моделирование и исходные параметры исследования.** Объектом исследования являлся участок трубопровода круглого поперечного сечения (рис. 1), который последовательно нагружался собственным весом, изгибом в вертикальной плоскости, центральным растяжением, внутренним давлением и комбинацией перечисленных нагрузок.

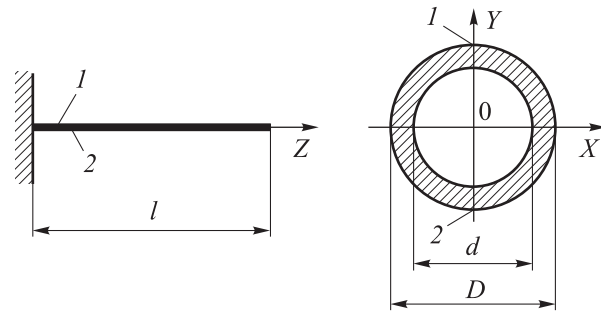


Рис. 1. Схема участка трубопровода и точек верификации

Так как валидацию усталостного расчета выполняют на базе статических вычислений, сначала необходимо определить напряженно-деформированное состояние объекта. Простота выбранной конструкции обусловлена наличием точных аналитических решений, пригодных для сравнения.

#### Исходные данные для расчета

Внешний диаметр трубы $D$ , мм	52
Внутренний диаметр трубы $d$ , мм	44
Толщина стенки трубопровода $t$ , мм	4
Средний диаметр пластинчатой модели $D_m$ , мм	48
Длина участка трубопровода $L$ , м	2
Модуль упругости материала трубопровода $E$ , ГПа	200
Коэффициент Пуассона $\mu$	0,3
Плотность материала трубопровода $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Вертикальная сила на свободном краю трубы $F_y$ , Н	-50
Растягивающая сила на свободном краю трубы $F_z$ , кН	10
Избыточное внутреннее давление в трубе $p$ , ГПа	3
Предел прочности/текучести материала трубы $\sigma_b/\sigma_t$ , МПа	410/235

Статический расчет выполнен методом конечных элементов (КЭ) [1–4] в ПК АРМ StructFEM v18 и ANSYS v.17.2 (аттестационный паспорт № 145 от 31.10.2002 для версии 5.2–5.7) [5]. В качестве эталонного принят ПК ANSYS. Сравнительные вычисления проведены на единой для обоих ПК сетке КЭ.

При моделировании участка трубопровода использованы трех- (треугольные, Triang) и четырехузловые (четырёхугольные, Quad) пластинчатые КЭ, а также твердотельные тетра- (десятиузловые, Tetra) и гексаэдрические (восьмиузловые, Hexa) КЭ. Параметры разбиения модели различными КЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Параметры разбиения модели различными КЭ

Тип КЭ	Количество узлов	Количество элементов
<i>Пластинчатые КЭ</i>		
Треугольные	5704	11 370
Четырехугольные	4752	4731
<i>Твердотельные КЭ</i>		
Тетраэдрические	35 193	105 314
Гексаэдрические	68 160	54 400

**Результаты статических вычислений.** Верификация выполнена для каждой нагрузки в отдельности и их комбинации в двух точках (см. рис. 1) на внешней поверхности трубопровода  $[X, Y, Z]$ . Точка 1 с координатами  $(0; 2,4 \cdot 10^{-2}; 0,2)$  м и точка 2 с координатами  $(0; -2,4 \cdot 10^{-2}; 0,4)$  рас-

положены соответственно сверху и снизу на расстоянии 10 % длины трубы от заделки.

Для моделей с КЭ разного типа проведены статические расчеты в точках 1 и 2 при каждой из четырех нагрузок и их комбинации, результаты которых использованы для анализа многоциклового усталости.

Значения напряжений по Мизесу (эквивалентных напряжений  $\sigma_{\text{экв}}$ ) для моделей с КЭ разного типа в точках 1 и 2, полученные при моделировании в ПК ANSYS и APM StructFEM, а также при аналитических вычислениях, выполненных для толстостенной трубы, приведены в табл. 2. Здесь введены следующие обозначения: АВ — аналитические вычисления;  $\varepsilon$  — относительная разность результатов численного и аналитического расчетов;  $\Delta$  — относительная разность результатов численных расчетов, выполненных в ПК ANSYS и APM StructFEM.

Таблица 2

## Значения эквивалентных напряжений для моделей с КЭ разного типа в точках 1 и 2

Вид нагрузки	АВ	Тип КЭ	ANSYS		APM StructFEM		$\Delta$ , %
	$\sigma_{\text{экв}}$ , МПа		$\sigma_{\text{экв}}$ , МПа	$\varepsilon$ , %	$\sigma_{\text{экв}}$ , МПа	$\varepsilon$ , %	
<i>Для точки 1</i>							
Собственный вес	11,1020	Triang	11,0430	-0,53	11,5800	4,31	4,86
		Quad	11,4230	2,89	11,3704	2,42	-0,46
		Tetra	10,9150	-1,68	10,9156	-1,68	0,01
		Hexa	11,2670	1,49	11,2193	1,06	-0,42
Изгиб в вертикальной плоскости	13,3770	Triang	13,2330	-1,08	14,4304	7,87	9,05
		Quad	13,7260	2,61	13,6491	2,03	-0,56
		Tetra	13,0620	-2,35	13,0622	-2,35	0,00
		Hexa	13,5590	1,36	13,5009	0,93	-0,43
Центральное растяжение	16,5790	Triang	16,8720	1,77	17,4700	5,37	3,54
		Quad	16,6550	0,46	16,6797	0,61	0,15
		Tetra	16,5580	-0,13	16,5764	-0,02	0,11
		Hexa	16,6860	0,65	16,6895	0,67	0,02
Внутреннее давление	19,5000	Triang	17,8450	-8,49	18,2381	-6,47	2,20
		Quad	17,7540	-8,95	18,0418	-7,48	1,62
	15,1250	Tetra	15,8440	4,75	15,8441	4,75	0,00
		Hexa	15,1940	0,46	15,2293	0,69	0,23
Комбинация нагрузок	35,5720	Triang	35,1210	-1,27	37,0039	4,03	5,36
		Quad	36,3520	2,19	35,7105	0,39	-1,76
	35,9660	Tetra	36,4540	2,48	36,4746	2,54	0,06
		Hexa	36,5090	2,63	36,5104	2,64	0,00

Окончание таблицы 2

Вид нагрузки	AB	Тип КЭ	ANSYS		APM StructFEM		$\Delta$ , %
	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа		$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\epsilon$ , %	$\sigma_{\text{ЭКВ}}$ , МПа	$\epsilon$ , %	
<i>Для точки 2</i>							
Собственный вес	8,7721	Triang	8,9687	2,24	9,4668	7,92	5,55
		Quad	9,0525	3,20	8,9804	2,37	-0,80
		Tetra	8,5692	-2,31	8,5722	-2,28	0,04
		Hexa	8,9293	1,79	8,8799	1,23	-0,55
Изгиб в вертикальной плоскости	11,8910	Triang	12,0730	1,53	12,7419	7,16	5,54
		Quad	11,8930	0,02	12,1296	2,01	1,99
		Tetra	11,5380	-2,97	11,5377	-2,97	0,00
		Hexa	12,0710	1,51	12,0108	1,01	-0,50
Центральное растяжение	16,5790	Triang	16,7490	1,03	17,8199	7,48	6,39
		Quad	16,6520	0,44	16,6135	0,21	-0,23
		Tetra	16,5820	0,02	16,5538	-0,15	-0,17
		Hexa	16,6860	0,65	16,6825	0,62	-0,02
Внутреннее давление	19,5000	Triang	17,9100	-8,15	18,3116	-6,09	2,24
		Quad	17,7550	-8,95	17,8283	-8,57	0,41
	15,1250	Tetra	15,4500	2,15	15,4505	2,15	0,00
		Hexa	15,1920	0,44	15,2919	1,10	0,66
Комбинация нагрузок	21,8310	Triang	20,2510	-7,24	20,7800	-4,81	2,61
		Quad	20,0580	-8,12	20,3385	-6,84	1,40
	17,5280	Tetra	17,5160	-0,07	17,5355	0,04	0,11
		Hexa	17,7010	0,99	17,7498	1,27	0,28

Следует отметить, что при определении эквивалентных напряжений, возникающих под действием внутреннего давления, помимо расчета толстостенных труб проведено ее моделирование пластинчатыми элементами.

Из табл. 2 следует, что наибольшее расхождение результатов наблюдается при моделировании трубы пластинчатыми элементами. При пластинчатом моделировании отклонения полученных результатов от данных аналитических вычислений не превышают 9 %, при твердотельном — 4 %. Расхождение результатов моделирования в ПК ANSYS и APM StructFEM составляет не более 1 %.

Разброс расчетных значений перемещений исследуемого объекта обычно значительно меньше, чем у напряжений. Это объясняется тем, что при расчете напряжений и выводе карт обычно используют разные методы аппроксимации. Если оценивать результаты статических вычислений в целом, то можно однозначно

утверждать, что расчеты, выполненные в ПК ANSYS и APM StructFEM, оказались адекватными.

Кроме того, несущественные различия результатов статических вычислений могут быть связаны с тем, что для оценки перемещений конструкции необходимо решать системы уравнений в частных производных, которые заменяются системами линейных алгебраических уравнений. Решение последних в каждом случае проводится с различной точностью, что приводит к расхождениям получаемых данных.

**Прогнозирование многоциклового сопротивления усталости.** Известно, что для решения задач усталостного расчета используют уравнения Велера [6, 7]. Кривую усталости (Велера) строят для синусоидального нагружения при постоянном значении среднего напряжения цикла или коэффициента асимметрии в виде зависимости допустимой амплитуды нагруже-

ния от числа циклов с вероятностью разрушения 50 % [8].

Для малоуглеродистых сталей наклонная часть кривой Велера на многоцикловом участке представляет собой прямую в двойных логарифмических координатах. Уравнение наклонного участка кривой Велера имеет вид

$$\sigma^m N = \text{const},$$

где  $\sigma$  — напряжение, при котором происходит циклическое испытание до разрушения;  $m$  — показатель степени,  $m = 5 + \sigma_b/80$ ;  $N$  — число циклов до разрушения.

Значение напряжения, ниже которого не происходит разрушения, является пределом выносливости  $\sigma_{-1}$  и обычно указывается для симметричного цикла. Симметричным называют нагружение, при котором максимальные напряжения растяжения и сжатия равны.

Под эквивалентным напряжением для произвольного случая усталостного разрушения понимают симметричное нагружение, вызывающее такое же усталостное повреждение, что и повреждение, возникающее вследствие произвольного переменного нагружения. Па-

раметр  $R$  (коэффициент асимметрии), определяющий асимметрию синусоидального нагружения, определяется как отношение наибольшего напряжения цикла к наименьшему:  $R = \sigma_{\max}/\sigma_{\min}$ .

Задача валидации методов и средств расчета сведена к сравнительному анализу результатов, полученных с помощью разных методов приведения асимметричных нагрузок к симметричным (далее МП). Для сравнительного анализа использованы комплексы ANSYS и APM StructFEM.

Для расчета усталостной долговечности конструкции в режиме регулярного нагружения применяют метод эквивалентного приведения к симметричной нагрузке. В работах [9–11] для приведения напряжений при несимметричном нагружении использованы методы Зодерберга, Гудмана и Гербера, а также метод SN-none, который игнорирует среднее значение напряжений цикла регулярного нагружения.

Принятый в Российской Федерации МП Серенсена — Кинасошвили не участвовал в анализе, так как он не реализован ни в одном из зарубежных расчетных комплексов. В ПК APM

Таблица 3

Значения эквивалентных напряжений при регулярном усталостном нагружении, полученные разными МП

Номер нагружения	Коэффициент асимметрии $R$	Метод приведения	Эквивалентные напряжения, МПа		Расхождение, %
			ANSYS	APM StructFEM	
1	-1	–	425,40	421,30	-0,96
2	0	SN-none	144,20	144,40	0,14
		Зодерберга	373,23	375,00	0,47
		Гудмана	222,44	231,10	3,89
		Гербера	164,56	165,00	0,27
		Серенсена — Кинасошвили	–	157,38	–
3	$\infty$	SN-none	234,33	234,80	0,20
		Зодерберга			
		Гудмана	348,01	349,30	0,37
		Гербера			
		Серенсена — Кинасошвили			
4	-1/2	SN-none	324,46	325,00	0,17
		Зодерберга	601,10	603,20	0,35
		Гудмана	440,71	441,90	0,27
		Гербера	348,72	349,40	0,19
		Серенсена — Кинасошвили	–	332,15	–

StructFEM этот МП представлен, так как на его основе разработан отечественный стандарт (ГОСТ 25.504–82) [8]. Это важно отметить, поскольку при проведении экспертиз в России использование зарубежных методов недопустимо.

Результаты расчетов с использованием различных МП и коэффициентов асимметрии указаны в табл. 3. Вычисления выполнены только для точки 1 (см. рис. 1), так как рассмотрение точки 2 не содержит качественно новой информации. Расчеты допустимых усталостных напряжений выполнены на основе эквивалентных напряжений, определенных при статических вычислениях.

Из табл. 3 следует, что первое нагружение симметричное и не требует приведения. Третье нагружение характеризуется отрицательным средним значением напряжения в цикле, поэтому три МП дают одинаковое значение, и только параболическое приближение Герберга показывает иное значение. В целом расхождение эквивалентных напряжений не превышает 4 %.

Обращает на себя внимание не точность вычислений, а корректность получаемых значений сопротивления усталости разными МП. Значения, рассчитанные разными МП, отличаются друг от друга в 2 раза и более.

Чтобы оценить те или иные результаты, следует выполнить их комплексный анализ. Это

необходимо сделать, так как рассмотрен простейший вариант приведения, который в дальнейшем можно использовать для всех заявленных МП.

Для аналитического описания МП будем использовать амплитудное напряжение цикла  $\sigma_a$ , среднее напряжение цикла  $\sigma_m$ , пределы прочности  $\sigma_B$  и текучести  $\sigma_T$  материала.

При положительных средних значениях цикла его амплитудные напряжения определяются следующими выражениями [9–11]:

- для МП Гудмана

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right);$$

- для МП Герберга

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right)^2;$$

- для МП Зодерберга

$$\sigma_a = \sigma_{-1} \left( 1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_T} \right);$$

- для МП Серенсена — Кинасошвили

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \Psi_\sigma \sigma_m,$$

где  $\Psi_\sigma$  — коэффициент чувствительности к асимметрии цикла [8],

$$\Psi_\sigma = 0,02 + 2 \cdot 10^{-4} \sigma_B.$$

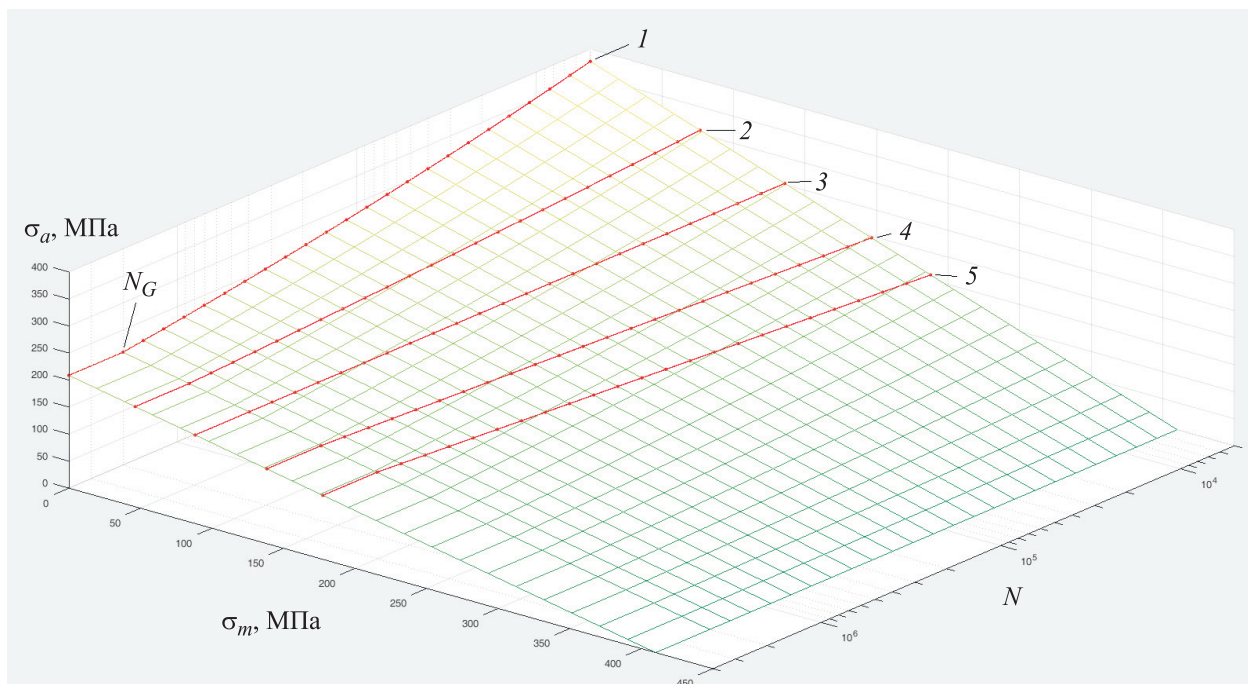


Рис. 2. Поверхность предельных амплитуд по Гудману и построенное на ней семейство кривых Велера при коэффициенте асимметрии  $R = -1,0$  (1),  $-0,6$  (2),  $-0,3$  (3),  $0,0$  (4) и  $0,2$  (5)

Согласно ГОСТ 25.504–82 [8], предел выносливости углеродистых и низколегированных сталей вычисляется по формуле

$$\sigma_{-1} = (0,55 - 0,0001\sigma_B) \sigma_B.$$

Анализ полученных результатов выполнен МП Гудмана для малоуглеродистой стали Ст3кп

с пределом прочности  $\sigma_B = 410$  МПа и пределом выносливости  $\sigma_{-1} = 209$  МПа.

Геометрическое место точек всей совокупности решений сначала можно продемонстрировать на примере предельных амплитудных напряжений по Гудману, что показано на рис. 2. Здесь  $N_G$  — базовое число циклов, до которого

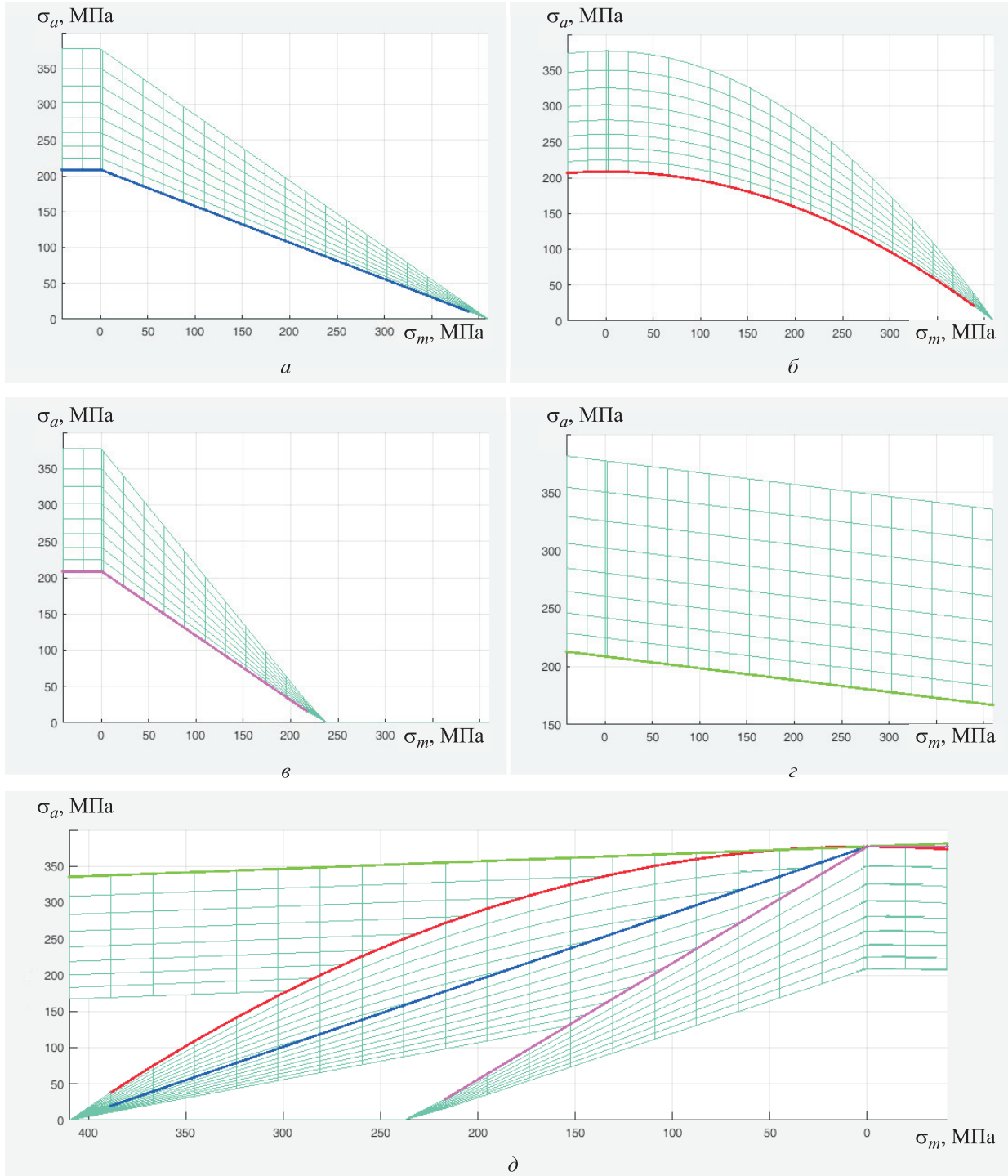


Рис. 3. Семейства кривых приведения в координатах средних и амплитудных напряжений: а-г — Гудмана, Гербера, Зодерберга, Серенсена — Кинашошвили соответственно при  $N = N_G$ ; д — совокупность всех семейств при  $N = 5000$

проведен наклонный участок кривой; значение  $\sigma_{-1}$  соответствует не пределу выносливости, а амплитуде напряжения симметричного цикла, при которой происходит разрушение с 50%-ной вероятностью, взятой для определенного числа циклов по кривой Велера. В частности, для числа циклов более  $N_G$  эти значения совпадают.

Линия, полученная при среднем напряжении цикла  $\sigma_m = 0$  соответствует кривой Велера для симметричного цикла, т. е. для  $R = -1$ . Поверхность предельных амплитуд по Гудману ограничивает сверху область, для которой коэффициент запаса по сопротивлению усталости меньше единицы.

Семейство кривых приведения Гудмана (см. рис. 2) обычно представляют в координатах средних и амплитудных напряжений (рис. 3, а). Аналогично представляют семейство кривых приведения Гербера (рис. 3, б), Зодерберга (рис. 3, в) и Серенсена — Кинасошвили (рис. 3, г).

Представленные номограммы позволяют определить по средним напряжениям предельно допустимые амплитудные значения, при которых коэффициент запаса сопротивления усталости окажется меньше единицы.

Для экспертной оценки результатов, полученных разными МП, удобно использовать их совместное представление (рис. 3, д), которое показывает существенное различие значений предельных амплитуд.

Качественный анализ выявил наличие существенного рассеяния результатов расчета усталостной долговечности разными МП. Из пред-

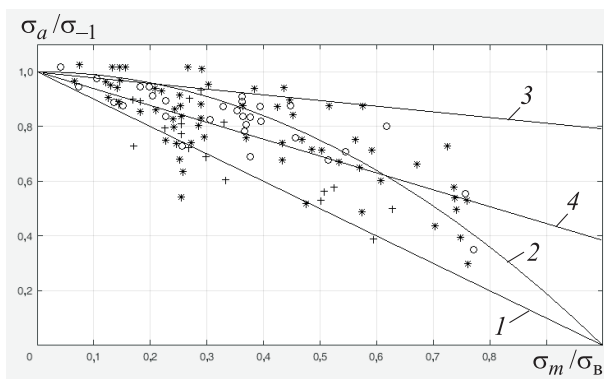


Рис. 4. Экспериментальные данные по усталостному разрушению стали (о), титана, магния (+) и алюминия (\*) в нормированных координатах среднего и амплитудного значений напряжения, полученные разными МП:

1 — Гудмана; 2 — Гербера; 3 и 4 — Серенсена — Кинасошвили при коэффициенте чувствительности к асимметрии цикла  $\psi_\sigma = 0,1$  и  $0,3$  соответственно

ставленных номограмм следует, что граница наибольших значений усталостной долговечности ограничена при использовании МП Серенсена — Кинасошвили, а наименьших — МП Зодерберга. Решения Гудмана и Гербера находятся внутри заявленного интервала. Для детального анализа корректности получаемых решений можно воспользоваться экспериментальными данными (рис. 4) [12].

Анализ результатов эксперимента по определению предельных амплитуд показал, что с увеличением средних напряжений точность определения усталостной долговечности падает, а рассеивание возрастает.

Для корректной оценки МП Серенсена — Кинасошвили необходимо учитывать, что сопротивление усталости зависит от предела прочности материала. Для углеродистых и низкоуглеродистых сталей его определяют при коэффициенте чувствительности к асимметрии цикла  $\psi_\sigma = 0,1 \dots 0,2$ , для легированных сталей — при  $\psi_\sigma = 0,15 \dots 0,30$ . Используя верхние и нижние границы указанных диапазонов, можно найти область возможного существования решений по МП Серенсена — Кинасошвили (см. рис. 4).

При отношении  $\sigma_m / \sigma_B < 0,3$  результаты приведения по теориям Гудмана, Гербера и Серенсена — Кинасошвили относительно близки к расчетным данным. При  $\sigma_m / \sigma_B > 0,3$  точность расчета предельных амплитуд усталостного разрушения падает, и прогноз времени до разрушения становится менее очевидным.

Для малоуглеродистых и низколегированных сталей напряжения, обычно не превышающие предел текучести материала, ограничены условием  $\sigma_m / \sigma_B > 0,6$ . При таком варианте нагружения МП Гербера дает наилучшее приближение, которое наряду с МП Серенсена — Кинасошвили можно считать удовлетворительным.

Для высокоуглеродистых сталей и чугунов область допустимых значений сопротивления усталости находится внутри зоны, ограниченной прямой Гудмана и параболой Гербера, ближе к последней. Поэтому для этих целей можно использовать МП Серенсена — Кинасошвили.

Для медных и магниевых сплавов большинство результатов можно описать приведением Гудмана. Диапазон средних значений  $\sigma_m / \sigma_B > 0,8$  можно исключить из анализа, так как он характеризуется малыми амплитудами напряжений, а режим нагружения имеет статический характер.



Таблица 4

Вероятность разрушения, %	Поправочный множитель
50,000	1,000
90,000	0,897
99,000	0,814
99,900	0,753
99,990	0,702
99,999	0,659

Наличие существенного разброса и степени неопределенности оценки параметров усталостного разрушения вынуждают компенсировать погрешности расчета увеличением коэффициента запаса сопротивления усталости, значения которого согласно отечественным нормативным документам рекомендовано принимать равными 2,0...2,5. Такие значения коэффициента запаса гарантируют сохранение длительного сопротивления усталости независимо от числа циклов нагружения.

Здесь необходимо учитывать, что изначально усталостная долговечность определяется с 50%-ной вероятностью разрушения. Для вычислений с большей вероятностью неразрушения можно воспользоваться данными, указанными в табл. 4 [9].

Как показали эксперименты, разброс времени до разрушения случаен и подчиняется закону нормального распределения с принятыми для этого случая параметрами распределения [13–15].

Результаты, приведенные в табл. 4, можно использовать при необходимости пересчета вероятности неразрушения в ПК APM StructFEM.

**Пример расчета усталостного разрушения, выполненный в ПК APM StructFEM.** Для демонстрации возможностей этого ПК в части выполнения усталостного расчета приведем пример анализа коэффициентов запаса сопротивления усталости шпильки и гайки крепления крышки турбины на момент аварийной ситуации, произошедшей на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции. Компания НТЦ «АПМ» выполняла официальную экспертизу этого аварийного случая по заказу Следственного комитета РФ.

Установлено, что разрушение элементов крепления вызвано дополнительной вибрацией крышки, которая привела к появлению до-

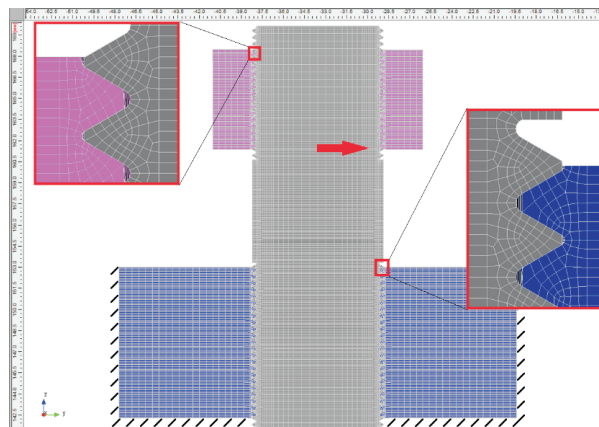


Рис. 5. Твёрдотельная модель соединения шпильки с гайкой, созданная графическими средствами ПК APM StructFEM

полнительного переменного момента изгиба и возникновению значительных переменных концентраций напряжений в крайних витках резьбы. Твёрдотельная модель соединения шпильки с гайкой, созданная графическими средствами ПК APM StructFEM, приведена на рис. 5.

Резбовое соединение растягивается усилием затяжки, скручивается моментом трения в резьбе и нагружается постоянным рабочим усилием растяжения. Переменной составляющей является показанное на рис. 5 усилие сдвига, вызванное горизонтальной вибрацией.

Не акцентируя внимание на подробностях, приведем карту распределения эквивалентных напряжений в телах шпильки и гайки (рис. 6).

Из рис. 6 следует, что с точки зрения сопротивления усталости самыми опасными являются места возникновения концентрации напряжений, которые обусловлены наличием резкого изменения геометрии. Максимальные напряжения наблюдаются в начальных витках резьбового соединения. При этом в местах наибольшей концентрации начинаются процессы зарождения трещин и разрушения.

Наличие или отсутствие сопротивления усталости можно прогнозировать, используя возможности программного обеспечения, входящего в состав ПК APM StructFEM.

В качестве финального результата на рис. 7 приведена карта распределения коэффициента запаса сопротивления усталости в модели шпилька — гайка. Как видно из рисунка, минимальное значение коэффициента запаса составляет 0,671, что приведет к потере сопротивления усталости и разрушению.

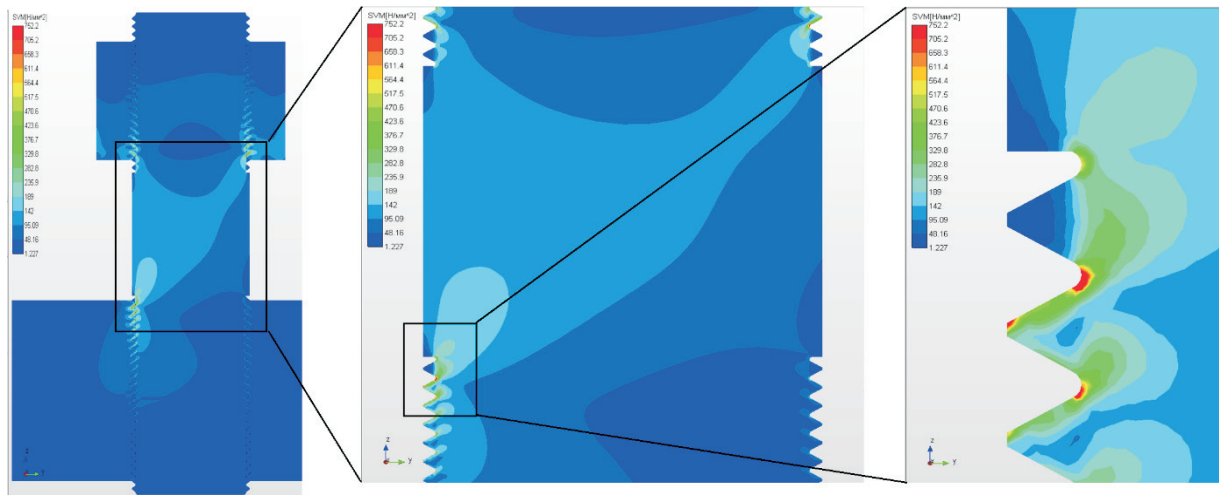


Рис. 6. Карта распределения эквивалентных напряжений, Н/мм<sup>2</sup>, в телах шпильки и гайки

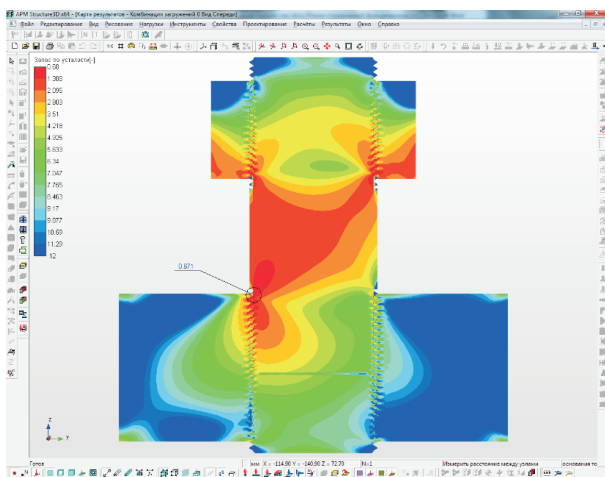


Рис. 7. Карта распределения коэффициента запаса сопротивления усталости в модели шпилька — гайка

Представленное программное обеспечение позволяет рассчитывать регулярные режимы нагружения. В дальнейшем будут рассмотрены инструменты анализа сопротивления усталости для случайных переменных режимов нагружения.

## Выводы

1. Приведены результаты оценки точности расчета сопротивления усталости конструкции при стационарных эксплуатационных режимах

переменного нагружения с использованием комплексов ANSYS и APM StructFEM.

2. Результаты сравнительного анализа в ПК ANSYS и APM StructFEM показали, что эти комплексы удовлетворительно описывают статическую прочность конструкции, применяемую для прогнозирования выносливости.

3. Расчет усталостной долговечности проведен с использованием уравнения Велера и разных МП ассиметричных нагрузок к симметричным. Рассмотрены МП Гудмана, Гербера и Зодерберга, а также МП Серенсена — Кинашовили, рекомендованный отечественным государственным стандартом [8].

4. Для подтверждения адекватности МП и областей их эффективного применения построены семейства предельных амплитуд. По результатам сравнительного анализа численных решений и экспериментальных исследований сформулированы рекомендации наиболее приемлемых областей использования предлагаемых МП, которые, в полном объеме представлены в отечественной системе APM StructFEM.

5. Показано, что отечественный ПК APM StructFEM в части расчета сопротивления усталости способен заменить зарубежные аналоги, что крайне важно для отечественного рынка CAE-услуг с целью выполнения программы импортозамещения.

## Литература

- [1] Галлагер Р. *Метод конечных элементов. Основы*. Москва, Мир, 1984. 425 с.
- [2] Бате К., Вильсон Е. *Численные методы анализа и метод конечных элементов*. Москва, Стройиздат, 1982. 447 с.

- [3] Зенкевич О., Морган К. *Метод конечных элементы и аппроксимация*. Москва, Мир, 1986. 319 с.
- [4] Шелофаст В., Абдурашитов А., Ренев С. и др. Сравнительный анализ ANSYS Mechanical APDL и APM Structure3D при использовании различных объемных конечных элементов. *САПР и графика*, 2018, № 12, с. 54–59.
- [5] *ANSYS release 11.0. Documentation for ANSYS Workbench*. ANSYS Inc., 2007.
- [6] Берендеев Н.Н. *Сопrotivление усталости. Основы*. Нижний Новгород, Нижегородский госуниверситет, 2010. 65 с.
- [7] ГОСТ 23207–78. *Сопrotivление усталости. Основные термины, определения и обозначения*. Москва, Изд-во стандартов, 1981. 48 с.
- [8] ГОСТ 25.504–82. *Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопrotivления усталости*. Москва, Изд-во стандартов, 1982. 55 с.
- [9] Norton R.L. *Machine design. Integrated approach*. Prentice-Hall, 2000. 1078 p.
- [10] Lee Y.L., Pan J., Hathaway R., et al. *Fatigue testing and analysis. Theory and practice*. Butterworth-Heinemann, 2004. 416 p.
- [11] Берендеев Н.Н. *Применение системы ANSYS к оценке усталостной долговечности*. URL: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/4.pdf> (дата обращения: 15.05.2021).
- [12] Форрест П.Дж. *Усталость металлов*. Москва, Машиностроение, 1968. 352 с.
- [13] Когаев В.П. *Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени*. Москва, Машиностроение, 1977. 232 с.
- [14] Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. *Расчет на прочность деталей машин*. Москва, Машиностроение, 1993. 639 с.
- [15] Карзов Г.П., Марголин Б.З., Швецова В.А. *Физико-механическое моделирование процессов разрушения*. Санкт-Петербург, Политехника, 1993. 391 с.

## References

- [1] Gallagher R.H. *Finite element analysis. Fundamentals*. Prentice-Hall, 1975. 416 p. (Russ. ed.: *Metod konechnykh elementov. Osnovy*. Moscow, Mir Publ., 1984. 425 p.)
- [2] Bathe K.-J., Wilson E.L. *Numerical methods in finite element analysis*. Prentice-Hall, 1976. 528 p. (Russ. ed.: *Chislennyye metody analiza i metod konechnykh elementov*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 447 p.)
- [3] Zienkiewicz O.C., Morgan K. *Finite elements and approximation*. Dover Publications, 2006. 328 p. (Russ. ed.: *Metod konechnykh elementy i approksimatsiya*. Moscow, Mir Publ., 1986. 319 p.)
- [4] Shelofast V., Abdurashitov A., Renev S., et al. Comparative analysis of ANSYS Mechanical APDL and APM Structure3D at using different solid finite elements. *SAPR i grafika*, 2018, no. 12, pp. 54–59 (in Russ.).
- [5] *ANSYS release 11.0. Documentation for ANSYS Workbench*. ANSYS Inc., 2007.
- [6] Berendelev N.N. *Soprotivlenie ustalosti. Osnovy* [Fatigue strength. Fundamentals]. Nizhniy Novgorod, Nizhegorodskiy gosuniversitet Publ., 2010. 65 p.
- [7] GOST 23207–78. *Soprotivlenie ustalosti. Osnovnyye terminy, opredeleniya i oboznacheniya* [State standard 23207-78. Fatigue strength. Terms, definitions and symbols]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1981. 48 p.
- [8] GOST 25.504–82. *Raschety i ispytaniya na prochnost'. Metody rascheta kharakteristik soprotivleniya ustalosti* [State standard 25.504-82. Strength calculation and testing. Methods of fatigue strength behaviour calculation]. Moscow, Izd-vo standartov Publ., 1982. 55 p.
- [9] Norton R.L. *Machine design. Integrated approach*. Prentice-Hall, 2000. 1078 p.
- [10] Lee Y.L., Pan J., Hathaway R., et al. *Fatigue testing and analysis. Theory and practice*. Butterworth-Heinemann, 2004. 416 p.
- [11] Berendelev N.N. *Primenenie sistemy ANSYS k otsenke ustalostnoy dolgovechnosti* [Using ANSYS system for assessment of fatigue endurance]. URL: <http://www.unn.ru/pages/e-library/aids/2006/4.pdf> (accessed: 15.05.2021).
- [12] Forrest P.G. *Fatigue of metals*. Pergamon Press, 1962. 425 p. (Russ ed.: *Ustalost' metallov*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1968. 352 p.)

- [13] Kogaev V.P. *Raschety na prochnost' pri napryazheniyakh, peremennykh vo vremeni* [Strength calculations at time-variable stress]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 232 p.
- [14] Birger I.A., Shorr B.F., Iosilevich G.B. *Raschet na prochnost' detaley mashin* [Strength calculation of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1993. 639 p.
- [15] Karzov G.P., Margolin B.Z., Shvetsova V.A. *Fiziko-mekhanicheskoe modelirovanie protsessov razrusheniya* [Physical-mechanical modeling of destruction process]. Sankt-Petersburg, Politehnika Publ., 1993. 391 p.

Статья поступила в редакцию 14.06.2021

## Информация об авторах

**ШЕЛОФАСТ Владимир Васильевич** — доктор технических наук, профессор кафедры «Основы конструирования машин». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: vvshelofast@apm.ru).

**РОСТОВЦЕВ Михаил Юрьевич** — математик-программист. ООО НТЦ «АПМ» (141070, Московская область, Королев, Российская Федерация, Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6, e-mail: rostovcev@apm.ru).

**АБДУРАШИТОВ Артем Ирикович** — кандидат технических наук, руководитель отдела тестирования НТЦ «АПМ» (141070, Московская область, Королев, Российская Федерация, Октябрьский бульвар 14, оф. 6. e-mail: com@apm.ru).

## Information about the authors

**SHELOFAST Vladimir Vasilyevich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Machine Design Principles. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: vvshelofast@apm.ru).

**ROSTOVTSSEV Mikhail Yuryevich** — Mathematician-programmer. Research and Software Development Centre APM (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: rostovcev@apm.ru).

**ABDURASHITOV Artem Irikovich** — Head of Testing Department. Research and Software Development Centre APM (141070, Korolev, Moscow region, Russian Federation, Oktyabrsky Blvd., Bldg. 14, Office 6, e-mail: com@apm.ru).

### Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Шелофаст В.В., Ростовцев М.Ю., Абдурашитов А.И. Анализ методов расчета конструкций на выносливость при стационарных эксплуатационных режимах переменного нагружения с целью валидации отечественной CAE-системы APM StructFEM. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 8, с. 27–38, doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-27-38

### Please cite this article in English as:

Shelofast V.V., Rostovtsev M.Yu., Abdurashitov A.I. Analysis of Fatigue Calculation Methods for Variable Loading Stationary Operating Modes to Validate Domestic CAE Software — APM StructFEM. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2021, no. 8, pp. 27–38, doi: 10.18698/0536-1044-2021-8-27-38