

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
Электромеханический факультет
Кафедра теоретической и прикладной механики

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема: «Разработка системы комплексной оценки усталостной
прочности элементов авиационных конструкций»

Выполнил: студент: гр. 2-33м

Корепов Д. В.

Научный руководитель: к.т.н., доц.

Ноздрин М.А.

Иваново 2017

Постановка задачи

Разработать инструмент комплексной оценки ресурса элемента авиационной конструкции с учетом анализа полной совокупности зон расчетной модели.

Этапы выполнения работы

- 1) Изучение методик расчета сопротивления усталости
- 2) Разработка процедуры обработки НДС конечных элементов моделей
- 3) Разработка процедуры комплексной оценки сопротивления усталости
- 4) Сравнительный анализ результатов, полученных при помощи инструмента комплексной оценки усталостной прочности, с результатами, полученными по традиционным методикам

Методика расчетов на усталость элементов авиационных конструкций с использованием рейтингов усталости (методика Стрижиуса В.Е.)

Для оценки усталостной долговечности используется соотношение

$$N = 10^5 \times \left(\frac{\sigma_R}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^m$$

- Формируется спектр усталостных нагрузок, соответствующий нагруженности рассматриваемого элемента в типовом полете.
- Преобразование спектра усталостных нагрузок в спектр напряжений
- Обработка спектра усталостных напряжений в элементе методом «дождевого потока» и представление спектра напряжений в виде последовательности циклов различного уровня

Формирование спектра усталостных нагрузок:

Значения компонент силовых потоков q_{xx} , q_{yy} , q_{xy} и компоненты погонных моментов m_{xx} , m_{yy} умножаются на коэффициенты перегрузки

Преобразование спектра усталостных нагрузок в спектр напряжений:

Компоненты главных напряжений:

$$\sigma_{xx} = \sigma_{xx}^{\text{раст}} + K \cdot |\sigma_{xx}^{\text{изг}}|$$

$$\sigma_{yy} = \sigma_{yy}^{\text{раст}} + K \cdot |\sigma_{yy}^{\text{изг}}|$$

$$\tau_{xy} = \tau_{xy}^{\text{сдв}}$$

Обработка спектра напряжений методом «ДОЖДЯ»

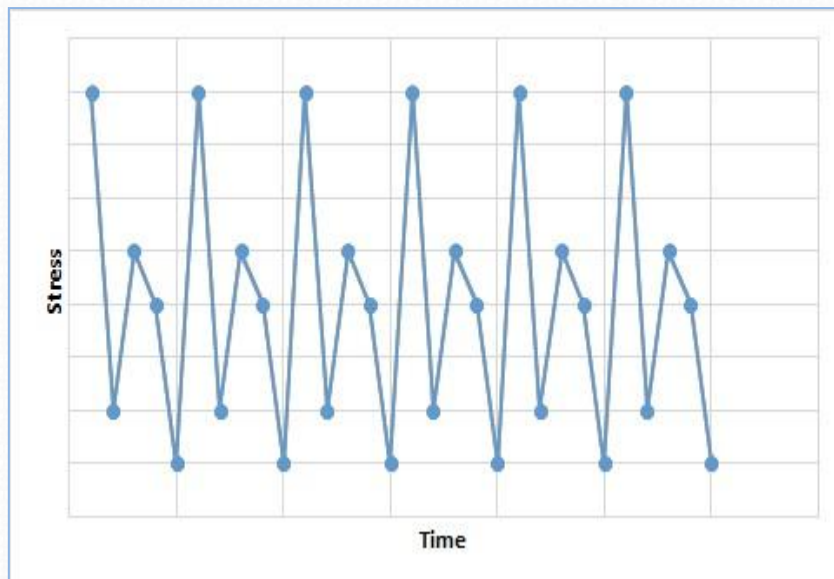


Рис.1. Периодическая нагрузка во времени

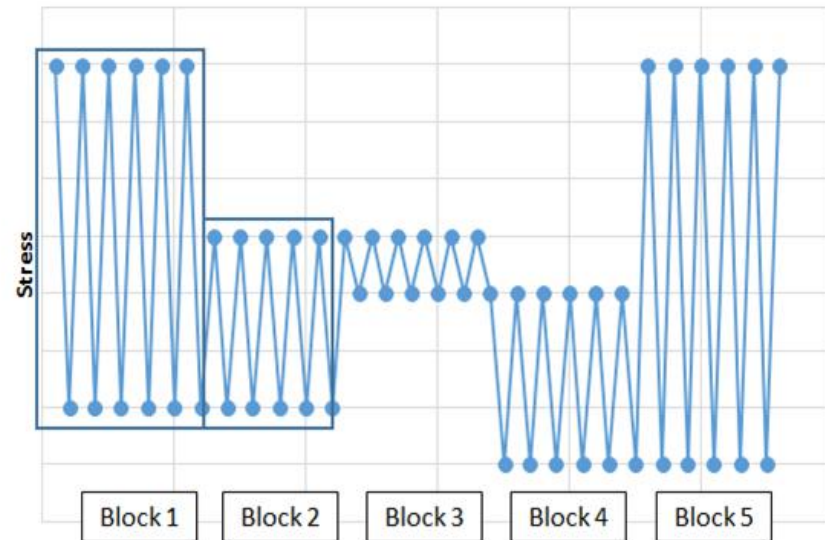


Рис.2. Периодическая нагрузка, сгруппированная в блоки

Оценка уровня эквивалентных напряжений

Для оценки уровня эквивалентных напряжений типового полета используется гипотеза линейного суммирования усталостных повреждений (гипотезы Пальмгрена—Майнера):

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[m]{\sum (n_j \cdot \sigma_{oj}^m)}$$

Приведение каждого единичного j -го цикла, характеризующегося амплитудой и средним σ_{aj} значением σ_{mj} , к эквивалентному отнулевому циклу с использованием соотношений, полученных в ЦАГИ на основе формулы Одингга:

$$\sigma_{oj} = \begin{cases} \sqrt{2\sigma_{aj} \cdot \sigma_{\max j}} & \text{при } \sigma_{mj} \geq 0; \\ \sqrt{2} \cdot (\sigma_{aj} + 0.2\sigma_{mj}) & \text{при } \sigma_{mj} = 0 \text{ и } \sigma_{\max j} = 0 \\ 0 & \text{при } \sigma_{\max j} \leq 0 \end{cases}$$

Реализованные программные процедуры

- Обработка сессионных файлов программного комплекса Patran
- Обработка спектра напряжений методом «ДОЖДЯ»
- Запись результатов

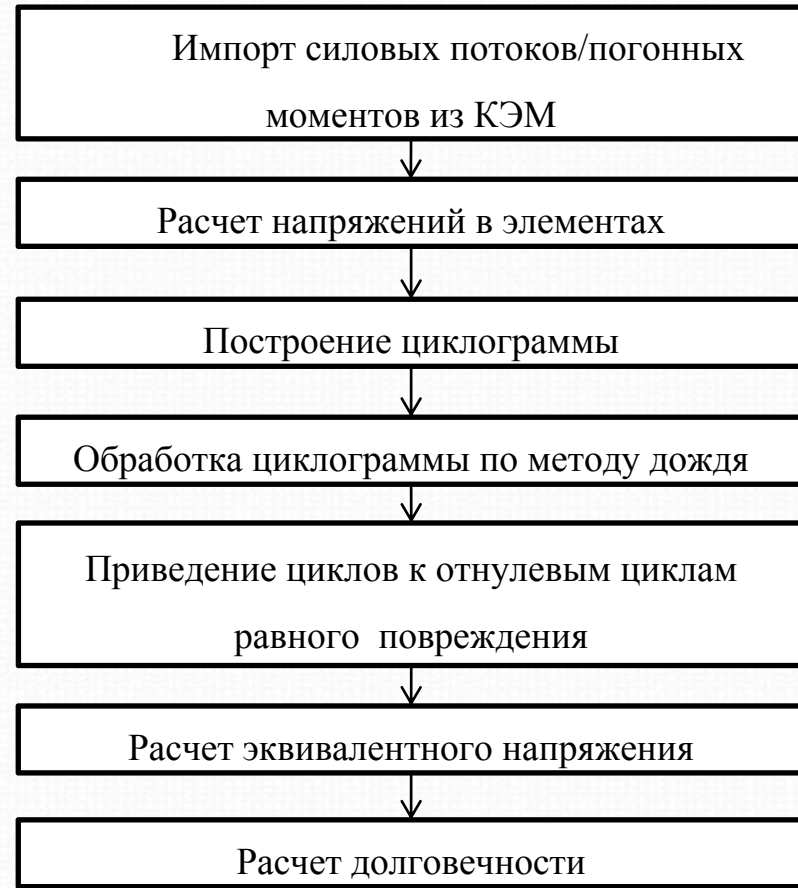


Рис.3. Алгоритм расчета усталостной долговечности

Используемая среда разработки

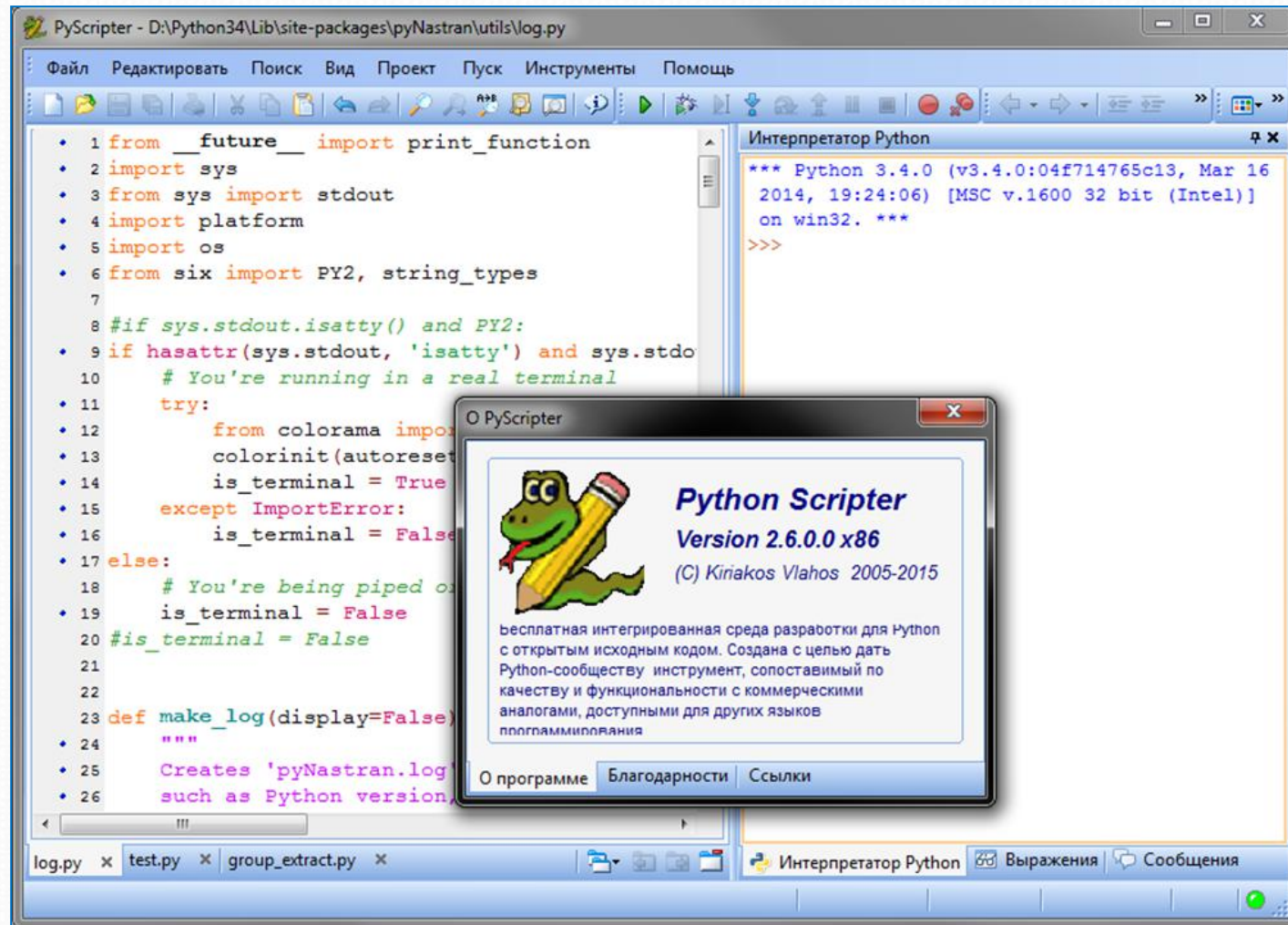


Рис.4. Среда разработки PyScripter

Комплексный расчет усталостной прочности с помощью разработанной программы

В качестве расчетной модели использована конечно-элементная модель выреза люка балки багажно-грузового отделения

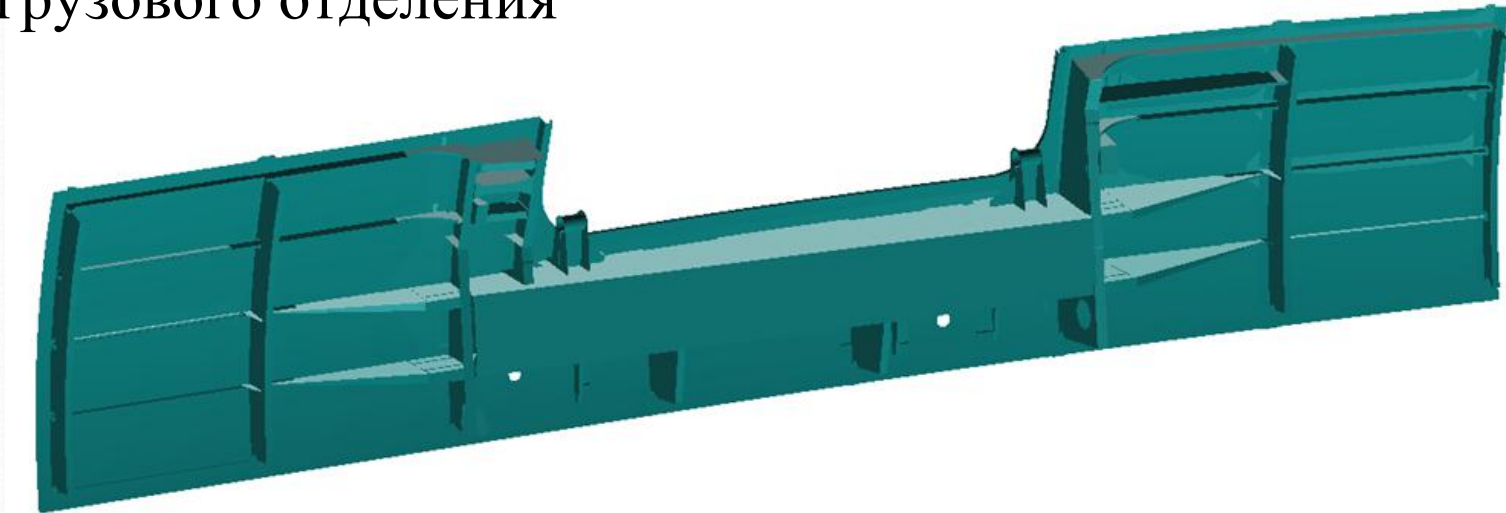


Рис.5. Внешний вид расчетной модели

Конечный элемент CQUAD4

Плоский четырехугольный линейный элемент CQUAD4 - наиболее часто используемый элемент при моделировании пластин, оболочек и мембран.

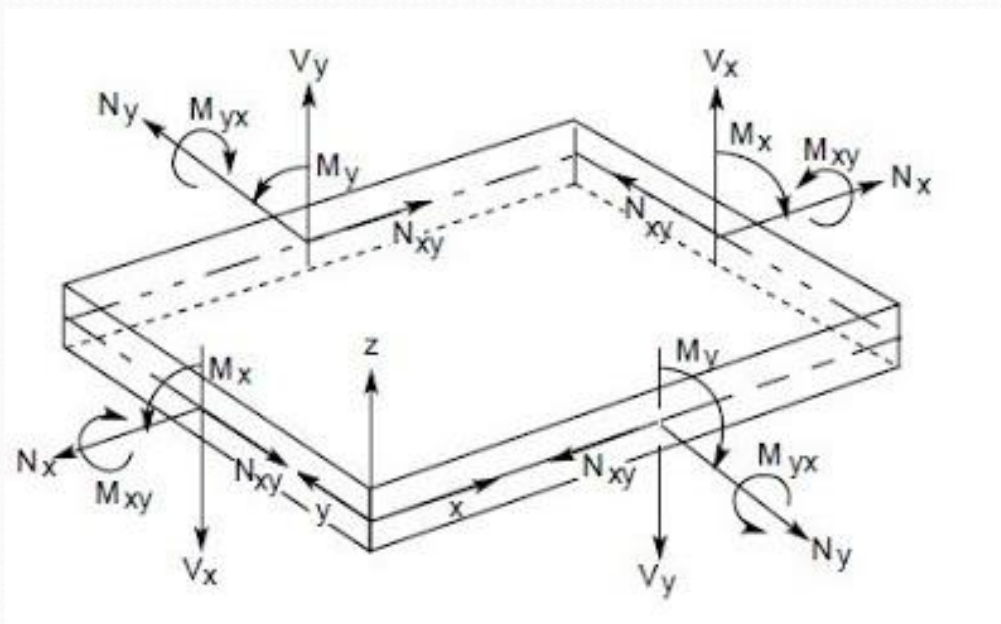


Рис. 6. Распределение силовых потоков плоского конечного элемента

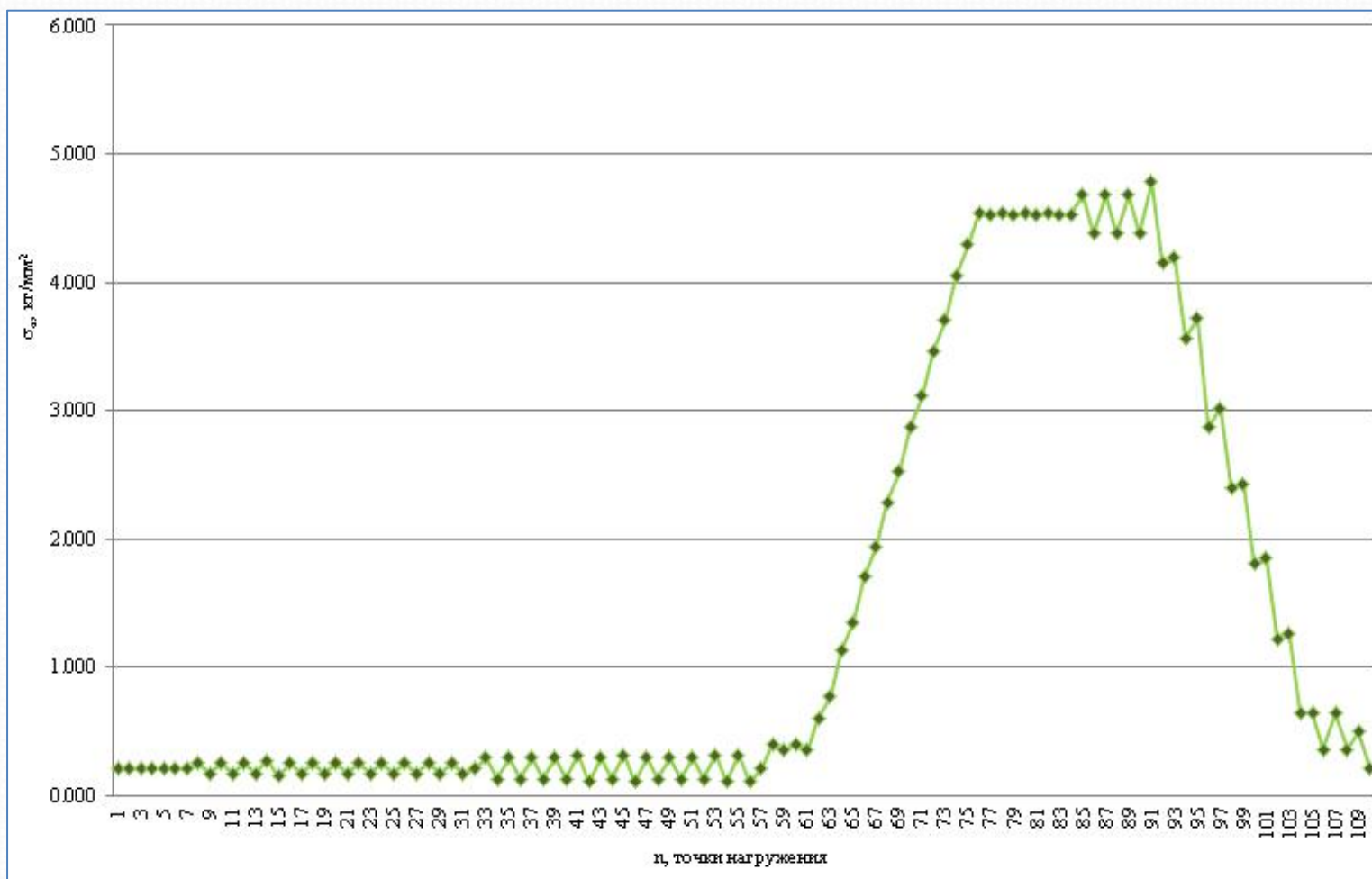


Рис. 7. Циклограмма напряжений конечного элемента регулярной зоны при типовом полете

Исходные данные для расчета

- рейтинг усталости для ненадрезанных конструктивных элементов

$$\sigma_{R0} = 37.5$$

- теоретический коэффициент концентрации напряжений, определяемый по номинальным напряжениям в сечении «брутто»

$$K_t = 1$$

- проектный ресурс (в полетах)

$$T = 54000$$

- показатель степени $m = 4$, принимаемый для всех конструктивных элементов (сплав Al и Ti: 4 / сталь: 3.5)
- коэффициент надежности для оценки по данной методике

$$\eta = 4$$

Вывод результатов

ELID	T	η	Параметры цикла «ЗВЗ»				$\sigma_{\text{ЗВЗ}}$, МПа	$D_{\text{ЗВЗ}}$	ЗВЗ $N_{\text{ЗВЗ}}$	$\sigma_{\text{Контр.}}$, МПа	σ_R , МПа	ЗВЗ $\sigma_{\text{доп.}}$, МПа	FM	$\sigma_{\text{расч. доп.}}$, МПа	N	$T_{\text{БР}}$	FLM
			σ_{max} , МПа	σ_{min} , МПа	$R = \sigma_{\text{min}} / \sigma_{\text{max}}$	ЗВЗ $\sigma_{\text{ЗВЗ}}$, МПа											
318502	54000	4	1.2965908	-1.2236043	-0.943709	1.8086675	1.9064496	0.8100909	266636.75	2.3112066	326.25	183.12807	140.23813	39	8.57632E+13	2.144E+13	397051744
318503	54000	4	2.5523906	-1.0187312	-0.3991283	3.0200889	3.1036177	0.8966151	240906.05	3.7625446	326.25	221.39093	85.738655	39	1.22104E+13	3.053E+12	56529540
318504	54000	4	3.6475568	-0.8048059	-0.2206425	4.0309186	4.0972176	0.9368285	230565.14	4.9670949	326.25	239.63921	64.698555	39	4.02018E+12	1.005E+12	18611966
318505	54000	4	4.7859797	-0.5550773	-0.1159799	5.0569067	5.1096344	0.9593574	225150.7	6.1944575	326.25	252.11809	51.678471	39	1.66204E+12	4.155E+11	7694652.5
318506	54000	4	5.8703232	-0.4596941	-0.0783081	6.0968385	6.1390848	0.9727566	222049.38	7.4424696	326.25	257.37518	42.843449	39	7.97604E+11	1.994E+11	3692613
318507	54000	4	6.3544898	-0.3555239	-0.0559485	6.5308328	6.5674624	0.9778761	220886.88	7.9617958	326.25	260.4274	39.983212	39	6.08992E+11	1.522E+11	2819408.3
318508	54000	4	7.2919078	-0.1014731	-0.0139159	7.3434691	7.3749037	0.9830592	219722.27	8.9406643	326.25	266.12216	35.495544	39	3.8298E+11	9.575E+10	1773057.8
318509	54000	4	8.3778181	0.0126676	0.001512	8.3724823	8.3982801	0.9877689	218674.63	10.181314	326.25	268.49084	31.047827	39	2.27741E+11	5.694E+10	1054354.9
318510	54000	4	9.4437914	0.095308	0.0100921	9.3970165	9.4204121	0.9901033	218159.06	11.420453	326.25	269.8111	27.57021	39	1.43854E+11	3.596E+10	665991.69
318511	54000	4	10.640975	0.1769416	0.0166283	10.553134	10.576444	0.9912133	217914.75	12.821921	326.25	270.78214	24.447117	39	90540613632	2.264E+10	419169.53
318512	54000	4	12.542495	0.2575887	0.0205373	12.414033	12.435432	0.9931342	217493.27	15.07559	326.25	271.45328	20.642687	39	47376015360	1.184E+10	219333.39
318513	54000	4	14.547509	0.3839695	0.0263942	14.355241	14.380993	0.9928564	217554.13	17.434212	326.25	272.24951	17.71451	39	26487842816	6.622E+09	122628.9
318514	54000	4	17.509823	0.5468585	0.0312315	17.235224	17.279421	0.9898081	218224.13	20.948002	326.25	272.71866	14.575181	39	12708238336	3.177E+09	58834.438
318515	54000	4	20.718325	0.5223494	0.025212	20.456482	20.531208	0.9855206	219173.5	24.890175	326.25	271.58038	12.108222	39	6375936512	1.594E+09	29518.225
318516	54000	4	23.832361	0.4595805	0.0192839	23.602453	23.709656	0.9820363	219951.14	28.743437	326.25	270.51871	10.350898	39	3585098240	896274560	16597.678
318517	54000	4	27.436733	0.4986762	0.0181755	27.18725	27.322971	0.9802784	220345.58	33.123894	326.25	270.2449	8.8497477	39	2032779648	508194912	9411.0176
318518	54000	4	30.805159	0.5625023	0.01826	30.523613	30.688192	0.9787201	220696.41	37.203579	326.25	270.14905	7.7696047	39	1277370496	319342624	5913.752
318519	54000	4	33.680756	0.5745273	0.017058	33.393253	33.579666	0.9779789	220863.67	40.708942	326.25	269.93271	7.0144496	39	891038656	222759664	4125.1792
318520	54000	4	36.060707	0.5757524	0.0159662	35.772671	35.985828	0.9765162	221194.47	43.625954	326.25	269.68198	6.4785557	39	675578880	168894720	3127.6799
318521	54000	4	37.74091	0.5529515	0.0146512	37.464413	37.704105	0.9748129	221580.98	45.709034	326.25	269.38437	6.1377292	39	560592896	140148224	2595.3376
318522	54000	4	39.039703	0.4751977	0.0121722	38.802376	39.071835	0.972698	222062.77	47.367149	326.25	268.90009	5.8878627	39	486123776	121530944	2250.573
318523	54000	4	39.878075	0.3697079	0.009271	39.693379	39.9897	0.9707283	222513.34	48.479885	326.25	268.37006	5.7297645	39	443005824	110751456	2050.9529
318524	54000	4	39.879982	0.2696174	0.0067607	39.745945	40.079811	0.967094	223349.55	48.589127	326.25	267.77948	5.7146339	39	439035296	109758824	2032.5708
318525	54000	4	39.447887	0.1730014	0.0043856	39.362289	39.758602	0.9607204	224831.28	48.199722	326.25	267.01813	5.7688832	39	453396000	113349000	2099.0554
318526	54000	4	38.472988	0.0859421	0.0022338	38.430992	38.920425	0.9506401	227215.34	47.183594	326.25	266.02762	5.91466	39	493732640	123433160	2285.7993
318527	54000	4	37.263454	0.0032375	8.688E-05	37.262836	37.875572	0.9368429	230561.61	45.916908	326.25	264.77237	6.1054163	39	550510016	137627504	2548.6575
318528	54000	4	35.736015	-0.0678076	-0.0018975	35.770905	36.537216	0.9187087	235112.59	44.294407	326.25	263.22061	6.3656955	39	635711744	158927936	2943.1099
318529	54000	4	33.653919	-0.1795638	-0.0053356	33.744583	34.694599	0.8948883	241370.89	42.060585	326.25	261.05005	6.7568984	39	781906176	195476544	3619.936
318530	54000	4	30.931919	-0.3922477	-0.012681	31.128426	32.32729	0.8597087	251247.89	39.190674	326.25	257.50674	7.3249516	39	1037348864	259337216	4802.541
318531	54000	4	28.227732	-0.5555164	-0.0196798	28.505136	29.952686	0.8202561	263332.41	36.31192	326.25	253.62527	7.9849682	39	1407534336	351883584	6516.3628

Рис. 8. Вывод результатов расчета усталостной прочности в табличном виде

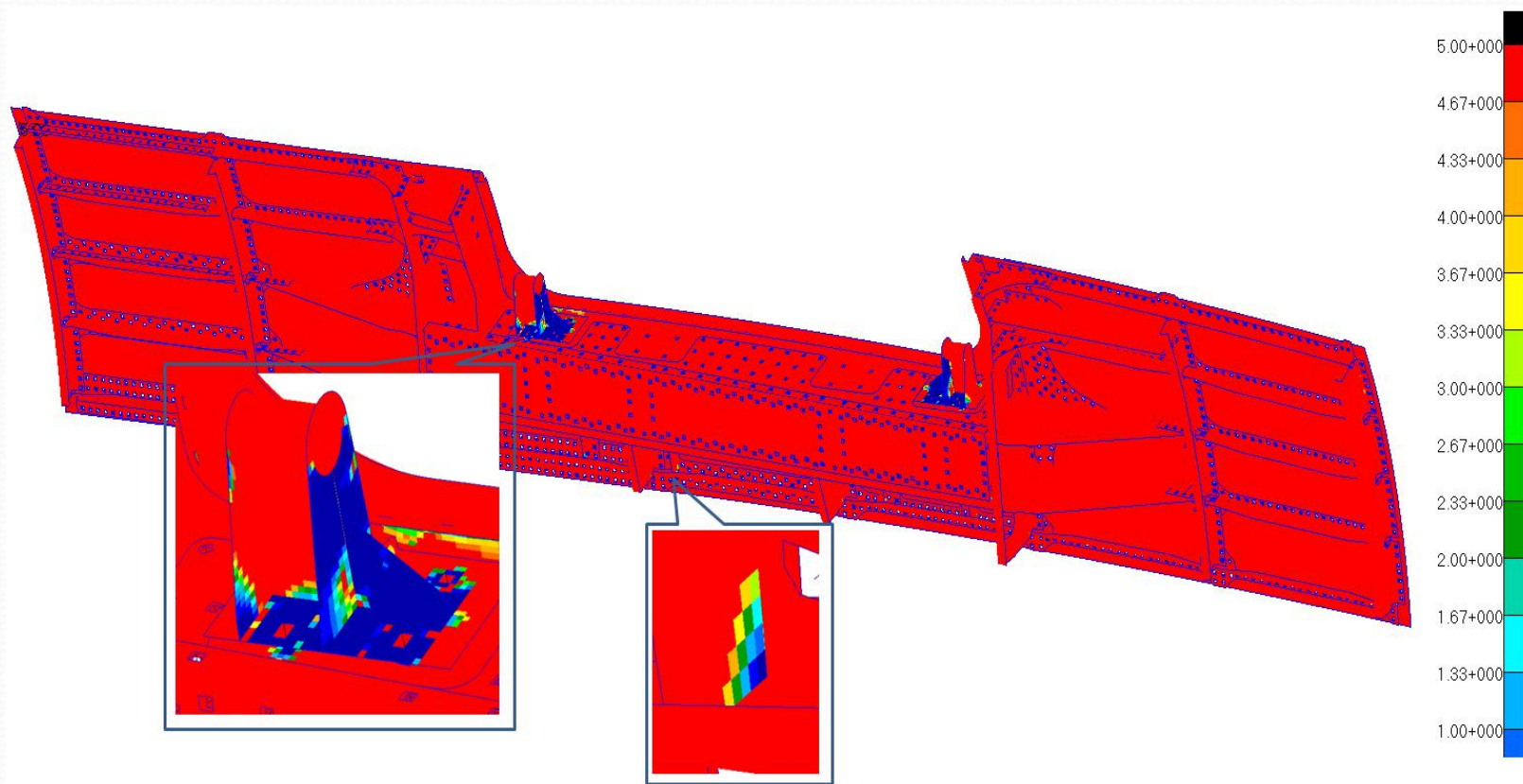


Рис. 9 Диаграмма запаса усталостной долговечности (FLM)

Выводы

- Разработаны и реализованы алгоритмы комплексной оценки усталостной прочности элементов авиационных конструкций с учетом анализа полной совокупности зон расчетной модели.
- С помощью разработанной программы проведен комплексный расчет усталостной прочности выреза люка багажно-грузового отсека самолета Super Jet 100.