

## **Автоматизация расчетов усталостной долговечности механических соединений элементов авиаконструкций**

**Полоник Е.Н.\*, Суренский Е.А.\*\*, Федотов А.А.\*\*\***

*Корпорация «Иркут», Ленинградский проспект, 68,*

*Москва, 125315, Россия*

*\*e-mail: Evgeniy.Polonik@irkut.com*

*\*\*e-mail: Evgeniy.Surenskiy@irkut.com*

*\*\*\*e-mail: Aleksandr.Fedotov02@irkut.com*

### **Аннотация**

В статье содержится описание компьютерной программы SNCalculator, предназначенной для расчета долговечности элементов конструкции с геометрическими концентраторами и механическими соединениями. SNCalculator интегрируется в программный комплекс конечно-элементных расчетов Femap. Предложена схема автоматизации расчетов усталости и приведено краткое описание разработанного сопутствующего программного обеспечения (CoeffCalculator, GFEMIntegrator, QuickGager, ResultProcessor, RivetCreator), применяемого на различных этапах работы. В статье основное внимание уделено описанию методологии расчета усталостной долговечности механических соединений (заклепочные и болтовые). Эта методология реализована в SNCalculator в виде четырех наиболее распространенных в авиационной отрасли методик: расчет по “качеству” конструкции (Лоим В.Б.), расчет по теории Стебенева В.Н., расчет по теории ЦАГИ для сложного напряженно-деформированного состояния и расчет по

теории рейтингов усталости (Стрижиус В.Е.). Данный функционал является новым в SNCalculator и значительно расширяет область применения программы при анализе усталостной долговечности авиаконструкций.

**Ключевые слова:** усталостная долговечность, концентрация напряжений, авиационные конструкции, автоматизация, заклепочные соединения, болтовые соединения.

## **Введение**

Обеспечение проектного ресурса является важной задачей при проектировании современных транспортных самолетов. Решение этой задачи позволяет уточнить выбор материалов и конструктивно-технологических решений, тем самым, создать более безопасную и экономически эффективную конструкцию.

Расчет усталостной долговечности является трудоемким процессом, так как при его выполнении расчетчик должен оперировать большим объемом данных, обусловленных историей нагружения (здесь и далее под историей нагружения понимается совокупность циклов нагружения) и поиском критических мест. Необходимость его автоматизации и интеграции с конечно-элементными комплексами очевидна (например, см. [1]) и подтверждается как наличием коммерческих программных продуктов, так и программных пакетов собственной разработки предприятий и КБ авиационной отрасли.

Известно, что в реальных элементах конструкций существенную роль в снижении усталостной долговечности играют концентраторы напряжений, наиболее

характерные из которых – различного рода вырезы и отверстия, а также заклепочные и болтовые соединения. Расчет долговечности элементов с геометрическими концентраторами напряжений с помощью программы SNCalculator, разработанной авторами, уже был подробно освещен [2]. Разработка программы была продолжена, в результате чего в SNCalculator был реализован новый функционал, позволяющий проводить расчет долговечности механических соединений. Также был создан набор сопутствующих программ (CoeffCalculator, GFEMIntegrator, QuickGager, ResultProcessor, RivetCreator), облегчающих конечно-элементное моделирование, подготовку и обработку результатов расчетов. Весь комплекс созданного программного обеспечения (ПО) позволяет в значительной мере автоматизировать расчет усталостной долговечности. Сформированная схема автоматизации представлена в статье.

Особое внимание уделено описанию программы SNCalculator, разработанной авторами и позволяющей проводить расчеты усталостной долговечности элементов конструкций как *без*, так и *с* концентраторами напряжений. В статье изложены методики расчета усталостной долговечности механических соединений и приведен алгоритм работы программы.

### **Схема автоматизации расчетов усталостной долговечности**

Расчет усталостной долговечности своим первым шагом подразумевает проведение статических конечно-элементных расчетов, которые в нашем случае выполняются в программном комплексе Femap. При этом используется два уровня

моделирования: глобальный и локальный (подробнее см. [3]). Глобальная модель (GFEM) – полностью описывает конструкцию самолета, но не позволяет оценить НДС вблизи концентраторов напряжений. Для уточнения напряженно-деформированного состояния (НДС) в GFEM встраивается локальная модель (LFEM) интересующего места конструкции. При помощи программы GFEMIntegrator автоматизируется перенос нагрузок с заменяемой области GFEM на LFEM. На стадии подготовки LFEM автоматизация обеспечивается в двух очень трудоемких операциях – расстановке крепежа (программа RivetCreator) и расстановке элементов-датчиков, служащих для уточнения НДС по краям концентраторов (программа QuickGager). Для анализа результатов статических расчетов применяется программа ResultProcessor, которая рассчитывает и создает в конечно-элементной модели (КЭМ) дополнительные векторы результатов суммарных перерезывающих сил элементов соединения (заклепок и болтов), а также напряжений в срединной поверхности Plate элементов. С помощью программы CoeffCalculator подготавливаются спектры нагружения в виде масок историй нагружения для интересующих сечений самолета. Расчет усталостной долговечности осуществляется программой SNCalculator на основе данных статического анализа и подготовленных масок историй. Схема автоматизации расчетов представлена на рисунке 1.

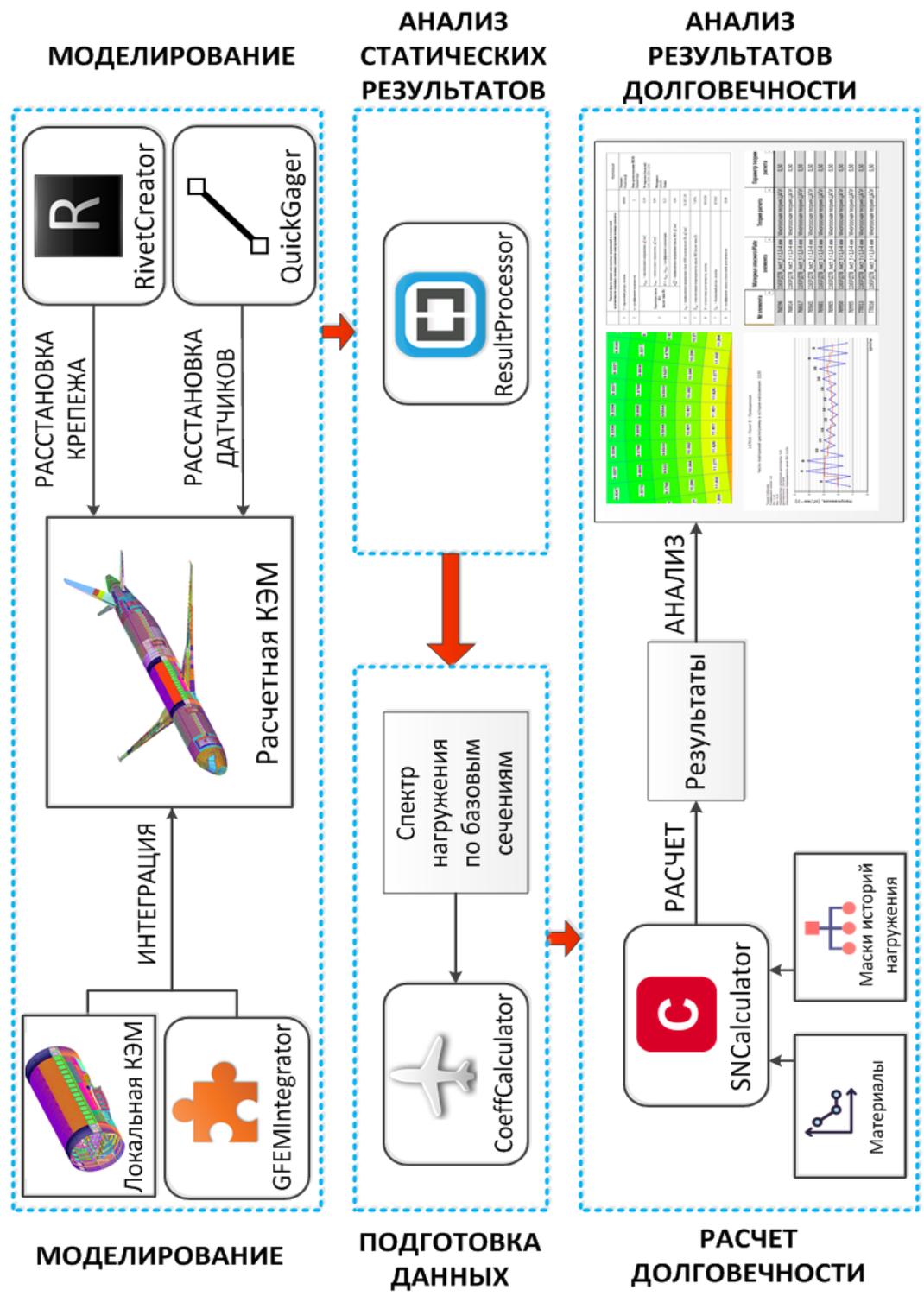


Рисунок 1 – Схема автоматизации расчетов усталостной долговечности

Дадим краткое описание программ, используемых при автоматизации расчетов усталостной долговечности.

CoeffCalculator – выполняет подготовку спектров нагружения в виде масок историй нагружения для нужного сечения самолета. На выходе имеется файл, который подгружается в SNCalculator и служит основой для формирования расчетных циклограмм.

GFEMIntegrator – выполняет перенос нагрузок с заменяемой части глобальной КЭМ на встраиваемую локальную КЭМ.

QuickGager – автоматизирует процесс расстановки элементов-датчиков по контурам геометрических концентраторов напряжений. “Датчики” позволяют уточнить напряженное состояние по краю концентраторов.

ResultProcessor – рассчитывает и создает в КЭМ дополнительные векторы результатов: суммарных перерезывающих сил (для Beam и Bar элементов), и напряжений в срединной поверхности Plate элементов.

RivetCreator – автоматизирует процесс расстановки крепежа в КЭМ. Входными данными являются твердотельные геометрические модели заклепок и болтов, либо их осевые линии.

SNCalculator – выполняет расчет усталостной долговечности. Подробное описание данной программы приведено ниже.

### **Программа SNCalculator**

Для выполнения оценки усталостной долговечности элементов конструкции с концентраторами напряжений (в первую очередь разнообразных вырезов и заклепочных/болтовых соединений) с высокой степенью автоматизации, на языке

программирования С# была разработана программа SNCalculator (интерфейс программы см. на рис. 2). Данное приложение интегрируется в программный комплекс конечно-элементных расчетов Femar. Это обеспечивает интерактивность взаимодействия с анализируемой конечно-элементной моделью, а также загрузку результатов статических расчетов в автоматическом режиме (при формировании циклограмм напряжений) посредством API Femar.

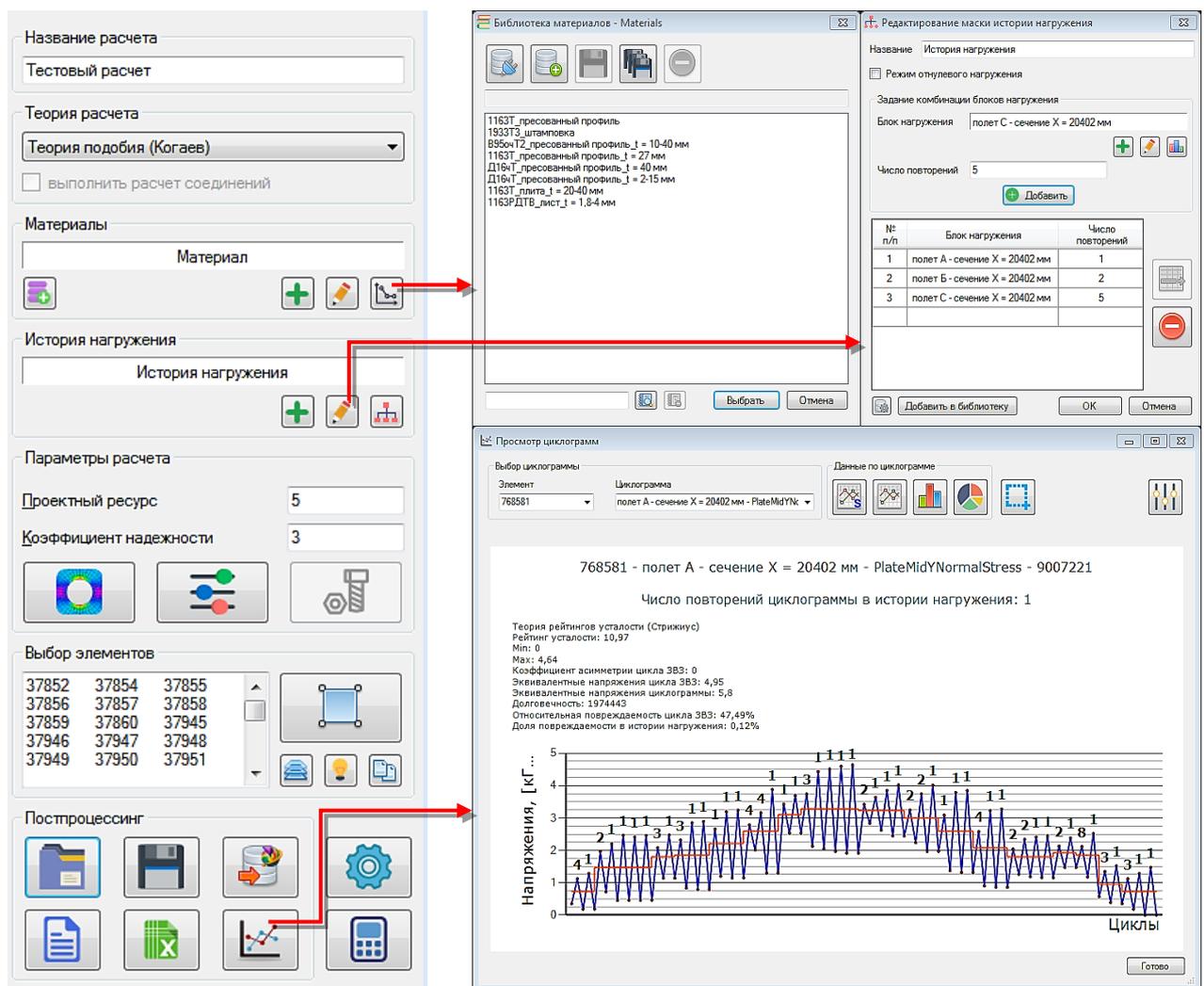


Рисунок 2 – Интерфейс программы SNCalculator

SNCalculator позволяет выполнять расчеты усталостной долговечности геометрических концентраторов по трем различным методикам (теориям): теории

подобия, теории “качества” конструкции и теории рейтингов усталости (описание этих методик см. [2]); а расчет усталостной прочности механических соединений – по четырем: теории “качества” конструкции, теории Стебенева, теории ЦАГИ для сложного НДС и теории рейтингов усталости.

Перед проведением усталостных расчетов пользователь должен выполнить статический анализ КЭМ на расчетные случаи, соответствующие различным режимам полета. Полученные наборы результатов (output set) затем используются при формировании маски истории нагружения. Маска представляет собой таблицу, в которой каждая строка обязательно содержит значение коэффициента пульсации, номер соответствующего набора результатов (output set) и число повторений цикла, который будет сформирован на основе текущей строки маски. Помимо этого в таблице имеются столбцы для статической подгрузки, которую можно задать при необходимости (например, учесть нагружение конструкции постоянным давлением). В процессе расчета происходит загрузка требуемых данных статических расчетов из КЭМ, а затем с их использованием и на основе маски истории нагружения формируются расчетные циклограммы нагружения.

Исходными данными для работы программы являются:

- параметры материала;
- маска истории нагружения;
- теоретический коэффициент концентрации напряжений детали (теория подобия и теория ЦАГИ для сложного НДС);
- параметры теории расчета;

- параметры соединения (при расчете крепежа);
- напряжения, полученные при статическом анализе конструкции (автоматически загружаются из модели Femap).

Для повторного использования материалов и масок истории нагружения в приложении имеется система библиотек.

Выполнив расчет, пользователь получает доступ к возможностям обработки результатов расчета (постпроцессингу) SNCalculator, которые позволяют производить следующие операции:

- сохранять результаты;
- открывать результаты;
- экспортировать результаты в модель Femap;
- создавать отчеты в виде документов Word (новая возможность по сравнению с версией программы представленной в [2]);
- экспортировать результаты в Excel таблицу;
- выполнять просмотр и анализ циклограмм напряжений.

В таблицу Excel экспортируются следующие данные:

- № конечного элемента;
- материал элемента, либо материал опасного Plate элемента (при расчете соединений);
- теория расчета;
- параметр теории расчета;
- проектный ресурс (в историях нагружений);

- коэффициент надежности;
- долговечность (за одну историю нагружения);
- безопасный ресурс (в историях нагружений);
- относительная повреждаемость цикла земля-воздух-земля (ЗВЗ);
- напряжение эквивалентного по вносимому повреждению отнулевого цикла (для одной истории нагружения);
- коэффициент запаса усталостной долговечности;
- № опасного Plate элемента (для расчета соединений).

При экспорте результатов в КЭМ создается новый набор данных (output set) с названием проведенного расчета долговечности, включающий в себя векторы результатов (output vectors):

- 9001001..DesignServiceLife – Проектный ресурс;
- 9001002..ReliabilityFactor – Коэффициент надежности;
- 9001003..Durability – Усталостная долговечность;
- 9001004..RelativeGAG Damageability – Относительная повреждаемость цикла ЗВЗ;
- 9001005..EqualStress – Эквивалентное напряжение;
- 9001006..SafeLife – Безопасный ресурс элемента;
- 9001007..FatigueLifeMargin – Коэффициент запаса усталостной долговечности;
- 9001008..CalculationTheory Parameter – Параметр теории расчета;

- 9001009..DangerousPlateID – Номер опасного Plate элемента (только для заклепок).

При просмотре циклограмм напряжений (см. рис. 2, правый нижний угол) отображаются циклы нагружения в виде кривой минимум-максимум напряжений с подписанным над каждым максимумом числом повторений цикла. Помимо этого, по сравнению с предыдущей версией программы, описанной в [2], был добавлен функционал, позволяющий выводить подробные данные о выбранной циклограмме в табличном виде (см. рис.3), а именно:

- точки экстремумов кривой минимум-максимум напряжений;
- выделенные по методу “дождя” полуциклы;
- относительные повреждаемости каждого цикла циклограммы;
- относительные повреждаемости каждого режима полета.

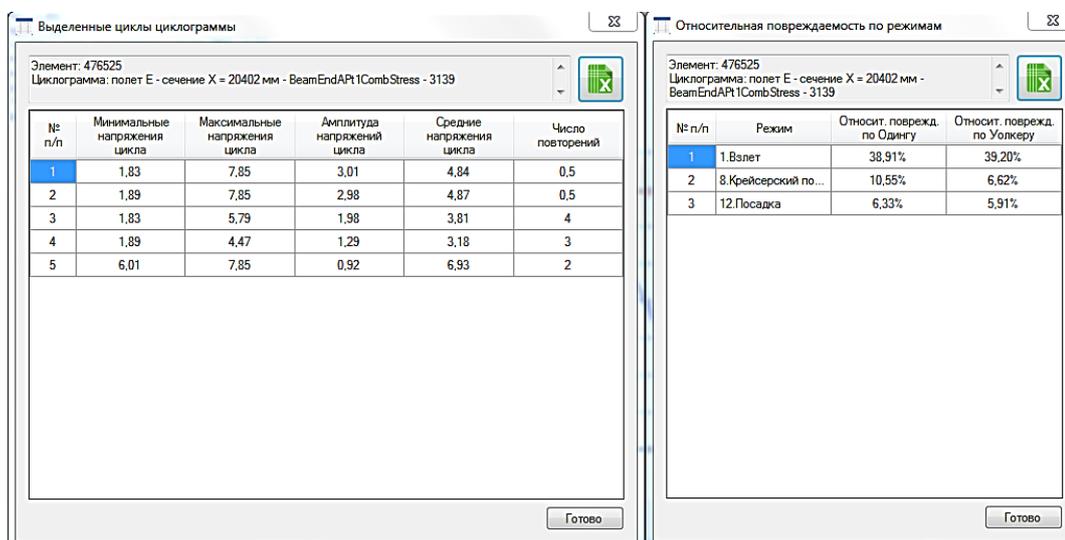


Рисунок 3 – Некоторые возможности просмотра данных о циклограмме.

Слева – выделенные по методу “дождя” полуциклы. Справа – относительные повреждаемости режимов полетов. Повреждаемость цикла ЗВЗ выводится в окне

циклограммы

Для получения более полной информации о расчете имеется возможность настройки вывода промежуточных файлов нескольких типов (циклограмма до обработки методом “дождя”, выделенные полуциклы и т.п.), запись которых осуществляется для каждого элемента в директорию, заданную пользователем.

### **Конечно-элементное моделирование заклепочных/болтовых соединений**

Для выполнения расчетов усталостной долговечности соединений с помощью SNCalculator необходимо следовать определенным правилам конечно-элементного моделирования (рис. 4), а именно моделирование соединений осуществляется Beam элементами, головки крепежа моделируются RBE3 элементами.

Для расчета жесткости элементов соединения на срез используются формулы Хьюта, Свифта, Тейта-Розенфельда и т.д. (подробнее смотри, например, [4]).

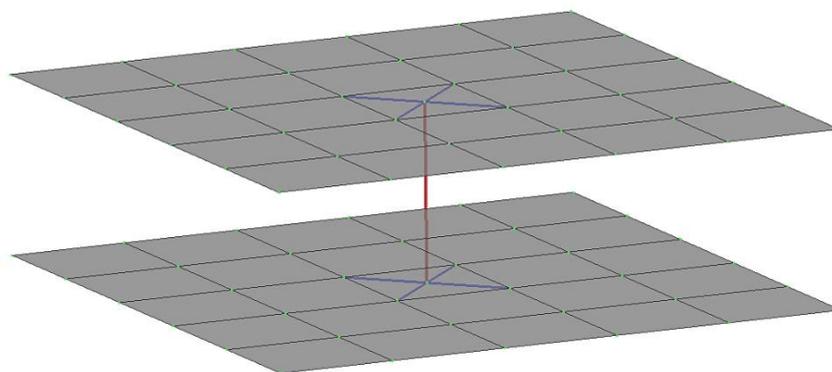


Рисунок 4 – Пример конечно-элементного моделирования соединения

### **Методики и алгоритм расчета, реализованные в программе SNCalculator**

SNCalculator позволяет выполнять расчеты усталостной долговечности по различным методикам. Методики расчета усталостной долговечности

геометрических концентраторов напряжений описаны в [2]. Здесь дадим описание четырех методик расчета усталостной долговечности механических соединений.

Первая из них – теория “качества” конструкции, предложенная Лоимом В.Б. [5], оперирует параметром “качество”. Этот параметр определяет уровень SN кривой рассматриваемого элемента конструкции. Данная характеристика назначается на основании анализа экспериментальных данных и накопленного опыта эксплуатации аналогичных конструкций.

Теория Стебенева В.Н. [6] и являющаяся ее обобщением теория ЦАГИ для сложного НДС, основываются на приведении сложного напряженного состояния элемента конструкции с нагруженным заклепкой или болтом отверстием к условию работы образца со свободным отверстием. Характерным для этих теорий является разделение потока сил на проходящий по соединяемой детали и приходящийся на заклепку/болт.

В четвертой теории, предложенной Стрижиусом В.Е. [7], используется понятие рейтинга усталости ( $\sigma_R$ ) – максимального нормального напряжения отнулевого цикла (номинальное напряжение в сечении “брутто”), при котором усталостная долговечность элемента в зоне рассматриваемого потенциально-критического места равна  $10^5$  циклов при 50%-ной вероятности с уровнем надежности 0,5.

Далее, для краткости, каждую методику (теорию) будем обозначать по фамилии автора, а теорию ЦАГИ для сложного НДС будем обозначать «теория ЦАГИ».

Отметим общие положения всех реализованных в SNCalculator методик:

- для схематизации циклограммы напряжений и выделения полуциклов используется метод “дождя” [8];
- для суммирования усталостных повреждений используется линейная теория Пальмгрена-Майнера.

Кратко опишем основные положения методик:

1) Для теорий Стебенева и ЦАГИ рассчитывается циклограмма приведенных напряжений.

Для Стебенева по формуле:

$$\sigma^* = \sigma_{\text{л}} + K_{\text{см}}\sigma_{\text{см}} + K_{\text{изг}}\sigma_{\text{изг}},$$

где  $\sigma_{\text{л}}$  – проходящие первые главные напряжения в листе;  $\sigma_{\text{см}}$  – напряжения смятия отверстия;  $\sigma_{\text{изг}}$  – напряжения вторичного изгиба листа;  $K_{\text{см}}$  – коэффициент смятия, учитывающий отличие повреждающего воздействия нагрузки на связь и “обтекающего” концентратор усилия;  $K_{\text{изг}}$  – коэффициент изгиба для расчета зоны соединения, учитывающий отличие повреждающего воздействия напряжений изгиба и “обтекающего” концентратор усилия.

Напряжения смятия определяются по формуле:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{\sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}}{td},$$

где  $Q_x$ ,  $Q_y$  – перерезывающая сила на заклепке вдоль осей X и Y соответственно;  $t$  – толщина листа;  $d$  – диаметр заклепки.

Для ЦАГИ по формуле:

$$\sigma^* = K_{\text{см}}f_1(\alpha + \beta)P_6 + f_2(\alpha)\sigma_1 + f_3(\alpha)\sigma_2,$$

где  $K_{см}$  – коэффициент смятия, учитывающий отличие повреждающего воздействия нагрузки на связь и “обтекающего” концентратор усилия;  $f_1, f_2, f_3$  – зависимости относительных кольцевых напряжений, вызванных болтовой нагрузкой, напряжений в направлении действия болтовой нагрузки и напряжений в перпендикулярном направлении, соответственно, от угла  $\alpha$ ;  $P_6$  – болтовая нагрузка;  $\sigma_1, \sigma_2$  – первые и вторые главные напряжения соответственно;  $\alpha$  – угол между направлением действия болтовой нагрузки и точкой на контуре отверстия, в которой определяется долговечность;  $\beta$  – угол между направлением площадки первого главного напряжения и направлением линии действия болтовой нагрузки.

Функции  $f_1, f_2$  и  $f_3$  определяются с использованием теоретических решений или расчетом методом конечных элементов.

Болтовая нагрузка рассчитывается по формуле:

$$P_6 = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2}.$$

2) Все циклы напряжений (первых главных для методики Лоима, приведенных для методик Стебенева и ЦАГИ, нормальных и касательных напряжений в листе для методики Стрижиуса) приводятся к отнулевым циклам равного повреждения. Для этого используется либо формула Одингга  $\sigma_0 = \sigma_{max}(1 - R)^{0,5}$  (для методик Лоима, Стебенева и ЦАГИ), либо формула Уолкера  $\sigma_0 = \sigma_{max}(1 - R)^\gamma$  с параметром  $\gamma = 0,6$  (для методики Стрижиуса). Параметр  $R$  в этих формулах – коэффициент асимметрии цикла.

3) Вычисляется напряжение эквивалентного по вносимому повреждению всей истории нагружения отнулевого цикла (эквивалент) по формуле:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}} = \sqrt[m]{\sum(n_i \sigma_{0i}^m)}.$$

4) Для методики Лоима перестраивается SN кривая образца (например, полосы с отверстием) по формуле:

$$\sigma_{\text{ЭКВ}}^* = \sigma_{\text{ЭКВ}} \frac{K}{K_{\text{обр}}},$$

5) Оценка долговечности осуществляется по формулам:

- теория Лоима, Стебенева и ЦАГИ:  $N = \frac{10^C}{\sigma_{\text{ЭКВ}}^* m}$ ;
- теория Стрижиуса:  $N = 10^5 \left( \frac{\sigma_R}{\sigma_{\text{ЭКВ}}} \right)^m$ .

В этих формулах  $m$  и  $C$  – параметры кривой усталости. Отметим, что для методик Стебенева и ЦАГИ должна использоваться SN кривая для образца типа “заполненное отверстие”, однако подобного рода образцы испытываются реже, поэтому “в запас” можно использовать SN кривую для образца типа “полоса со свободным отверстием” (которую используют в методике Лоима).

б) Параметры теорий (методик) расчета определяются следующим образом:

- “Качество” (параметр теории Лоима) обычно назначается расчетчиком, например, “качество” образца типа полоса с отверстием равно 3, качество контура крупномасштабного выреза с приклепанным усилением равно 2,8 и т.п. [3].
- Коэффициент смятия (теория Стебенева и ЦАГИ) определяется с использованием зависимости:

$$K_{\text{см}} = 0,5 \frac{t}{d} + 0,25,$$

где  $t$  – толщина листа,  $d$  – диаметр заклепки/болта.

Коэффициент изгиба (теория Стебенева) при отсутствии дополнительных данных принимается равным 0,5.

- Рейтинг усталости (параметр теории Стрижиуса) элемента конструкции определяется по формуле [7]:

$$\sigma_R = \sigma_{R0} k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 k_6 k_7,$$

где  $\sigma_{R0}$  – базовое значение рейтинга усталости;  $k_1$  – коэффициент эффективности местных утолщений;  $k_2$  – коэффициент поверхностной обработки;  $k_3$  – коэффициент заполнения отверстий крепежными элементами;  $k_4$  – коэффициент глубины зенковки отверстий под крепеж;  $k_5$  – коэффициент осевой затяжки болтов;  $k_6$  – коэффициент относительной толщины пакета;  $k_7$  – коэффициент числа однотипных концентраторов.

Базовое значение рейтинга усталости рассчитывается по формуле:

$$\sigma_{R0} = \sigma_{R0(\text{CHC})} LTF,$$

где  $\sigma_{R0(\text{CHC})}$  – базовое значение рейтинга усталости для слабонагруженных соединений при растяжении-сжатии;  $LTF$  – коэффициент передачи нагрузки.

Коэффициент передачи нагрузки определяется с использованием графических зависимостей  $LTF = f(LTP)$  для случая растяжения-сжатия или сдвига (см. [5]). При наличии экспериментальных данных эти зависимости нужно скорректировать.

Параметр  $LTP$  – параметр передачи нагрузки вычисляется в точке максимума цикла ЗВЗ по формулам

- для нормальных напряжений:

$$LTP = \frac{R_1}{\sigma_1 d^2};$$

- для касательных напряжений:

$$LTP = \frac{bt}{nd^2},$$

где  $b$  шаг крепежа;  $t$  – толщина анализируемого элемента соединения;  $n$  – число продольных рядов крепежа;  $d$  – диаметр крепежа;  $R_1$  - реакция в наиболее нагруженной крепежной точке в направлении главной площадки.

Реакция в наиболее нагруженной крепежной точке в направлении главной площадки рассчитывается по формуле:

$$R_1 = R_x \cos \phi + R_y \sin \phi,$$

где  $\phi$  – определяет критическое направление (направление главной площадки  $\sigma_1$  (угол в градусах) между осью  $X$  и направлением главной площадки), соответствующее максимуму цикла ЗВЗ по формуле:

$$\phi = 0,5 \arctg \left( \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \right) \frac{180}{\pi}.$$

Принципиальная схема алгоритма расчета усталостной долговечности механических соединений приведена на рисунке 5.

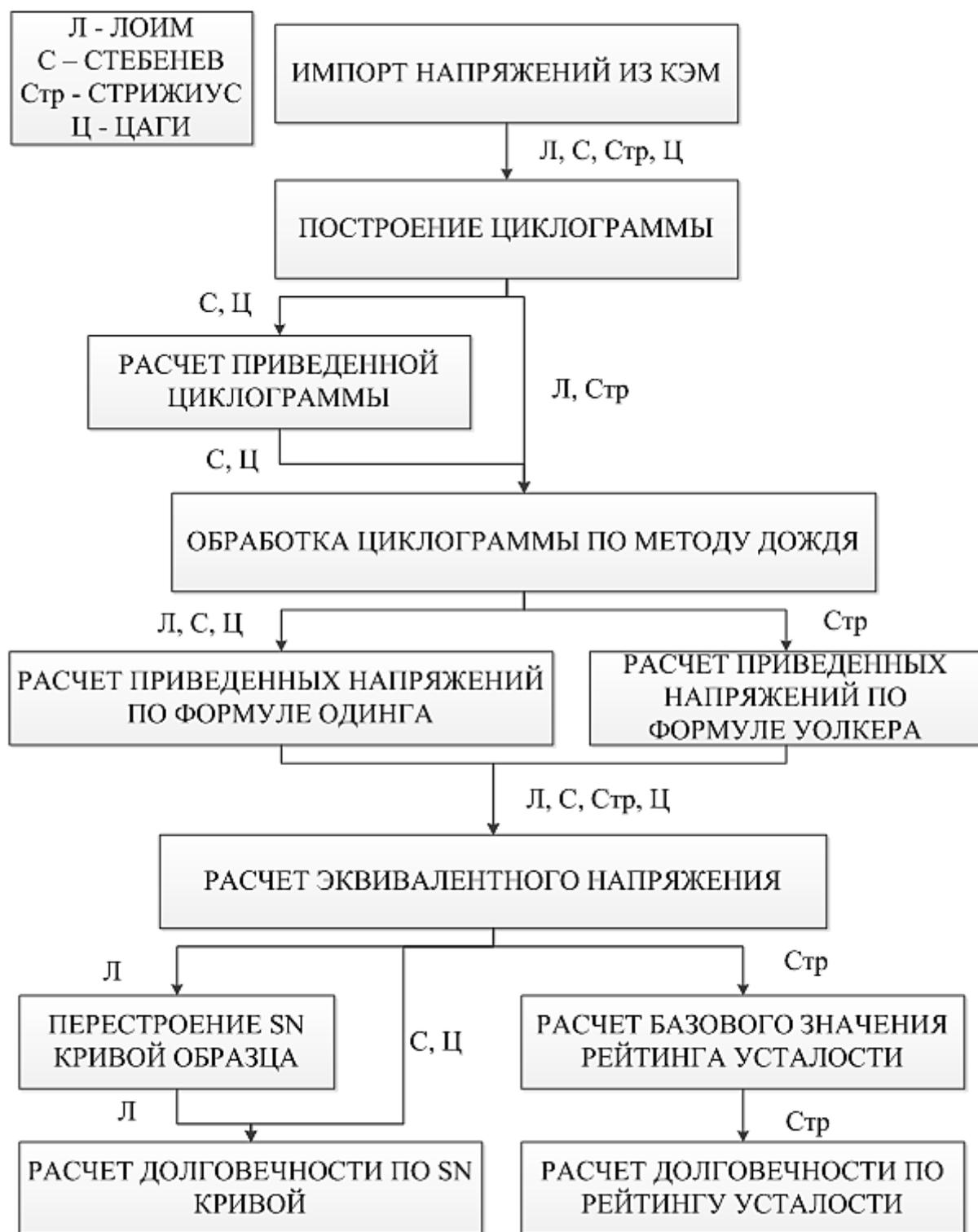


Рисунок 5 – Принципиальная схема алгоритма расчета усталостной долговечности механических соединений

## Заключение

Предложена схема автоматизации усталостных расчетов авиаконструкций с концентраторами напряжений. Для реализации этой схемы создан ряд программ, автоматизирующих и, тем самым, ускоряющих работу пользователя на разных стадиях анализа таких, как: создание конечно-элементных моделей, постпроцессорная обработка данных конечно-элементных расчетов, расчет усталостной долговечности и постпроцессорная обработка результатов расчета усталостной долговечности.

Ключевой элемент схемы автоматизации – программа SNCalculator. Ее основные преимущества – эффективное использование имеющихся конечно-элементных моделей, простота в задании исходных данных, а также возможность получения подробной информации о проведенных расчетах в удобной для анализа форме. Отметим, что SNCalculator по существу замещает аналогичное зарубежное программное обеспечение, при этом являясь лучше приспособленным к отечественной расчетной практике.

Отметим важную особенность SNCalculator – реализация нескольких методик расчета усталостной долговечности, характерных для отечественной авиационной отрасли. Возможность расчета по разным методикам одного и того же элемента конструкции позволяет получить “вилку” по долговечности, что, несомненно, обладает немалой ценностью в такой богатой неопределенностями области расчетов как расчеты на усталость.

## Библиографический список

1. Зарецкий М.В., Сидоренко А.С. Оценка показателей долговечности конструкции авиационного изделия при действии случайных нагрузок // Труды МАИ, 2013, №70: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=44479>
2. Полоник Е.Н., Суренский Е.А., Федотов А.А. Автоматизация расчетов усталостной долговечности элементов авиаконструкций с геометрическими концентраторами напряжений // Труды МАИ, 2016, №86: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=67799>
3. Яшутин А.Г., Суренский Е.А. Автоматизированный комплекс силовых и детальных расчетов прочности самолета // Труды МАИ, 2014, №74: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=49151>
4. Siddabathuni V. G. U., Mekam S., Sastry S. S .S. Parametric studies on the effect of four types of fastener modeling in channel type tension fitting. International Journal of Recent advances in Mechanical Engineering, 2015, vol.4, no. 1, pp.15-27
5. Лоим В.Б. Практика расчетной оценки долговечности авиаконструкций с использованием эффективных коэффициентов концентрации напряжений // Вестник машиностроения. 1998. №9. С. 31-37.
6. Стебнев В.Н. Методика оценки сопротивления усталости соединений // Труды ЦАГИ, выпуск 2117, 1981. С. 42-54.
7. Стрижиус В.Е. Методы расчета усталостной долговечности элементов авиаконструкций: справочное пособие. - М.: Машиностроение, 2012, - 272 с.
8. Расчеты и испытания на прочность. Методы схематизации случайных

процессов нагружения элементов машин и конструкций и статистического представления результатов. ГОСТ 25.101-83. - М.: Изд-во стандартов, 1983. – 25 с.