

УТВЕРЖДАЮ  
Главный конструктор –  
начальник отделения

В.В. Сотсков

«11» 03 2013 г.

## **Технические требования на разработку программы расчета на циклическую прочность**

### 1 Основные требования к выполнению работы

1.1 Программа расчета на циклическую прочность должна распространяться на оборудование и трубопроводы, на которые распространяются «Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» /1/ и «Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок» /2/.

1.2 Структурно программа должна включать в себя препроцессор, осуществляющий связь с конечно-элементной моделью и задание исходных данных, модуля программы, выполняющего расчет на циклическую и длительную циклическую прочность согласно методике Норм... /1/ и постпроцессор, обеспечивающий представление результатов, как в виде графиков, таблиц, которые должны быть пригодны для непосредственного включения в отчетные документы, так и полей значений повреждаемости отображаемых на КЭ сетке модели или её части. Программа должна быть открыта (иметь возможность) для подключения дополнительных модулей, содержащих другие нормативные методики расчета на циклическую прочность, например для стадии эксплуатации и продления ресурса.

1.3 Программа должна автоматизировано определять допускаемое число циклов нагружения и накопленное усталостное повреждение, исходя из характеристик циклической и длительной циклической прочности, с введением запасов прочности по долговечности и напряжениям согласно Норм... ПН АЭ Г-7-002-86 и с использованием гипотезы линейного суммирования повреждений.

Программа должна иметь возможность автоматизировано выбирать значения напряжений упругого или упругопластического расчета и температур в узлах (или

элементах) конечно-элементной модели из выходных файлов программ ANSYS, ANSYS Workbench. Возможна разработка программы в качестве приложения к ANSYS.

1.4 Фиксация главных площадок должна быть реализована в программе в соответствии с п.5.3.2 Норм... /1/ следующим образом:

- упругим расчетом определяются значения шести составляющих напряженного состояния для принятой системы координат и принятой последовательности во времени режимов работы и нагружения. По шести составляющим напряженного состояния определяются значения главных напряжений  $\sigma_i$ ,  $\sigma_j$  и  $\sigma_k$ . При этом индекс  $i$  присваивают наибольшему для всей последовательности процесса нагружения главному напряжению, а двум другим для того же момента времени – индексы  $j$  и  $k$  ( $\sigma_i > \sigma_j > \sigma_k$ ), фиксируя, таким образом, главные площадки;

- фиксация площадок производится по состоянию на момент достижения алгебраически максимального главного напряжения. Главные напряжения в иные моменты времени условно считаются отнесенными к этим фиксированным площадкам. Вектор главного напряжения, без изменения его абсолютного значения, "доворачивается" до ближайшего положения, нормального к фиксированной главной площадке.

1.5 Пластическая корректировка напряжений (учет памяти материала об истории нагружения) должна проводиться по алгоритму, заложенному в Нормы... /1/. При этом второй абзац п.5.3.8 читать в редакции:

"Если до момента времени  $l$  напряжение ( $\sigma_L$ ) находилось в упругой области ( $l=2$  на рисунке 3.1), то  $(\sigma_F)_l = (\sigma_L)_l$ , а если в момент времени  $l$  напряжение ( $\sigma_L)_l$  находится в упруго пластической области и разность  $|(\sigma_L)_l - R_{pe}^T|$  приобретает в этот момент наибольшее абсолютное значение среди всех предшествующих положительных и отрицательных ( $\sigma_L$ ), то  $(\sigma_F)_l$  определяют по формуле" и далее читать по Нормам...

Кроме того должна быть обеспечена возможность использования эффективных коэффициентов концентрации напряжений.

1.6 История деформирования должна задаваться как замкнутая последовательность расчетных состояний с возможностью учета количества повторений.

Количество расчетных точек анализа циклической прочности соответствует, по выбору пользователя:

- количеству узлов во всей конечно-элементной сетки;
- количеству узлов конечно-элементной сетки, принадлежащих только поверхностям расчетной модели;
- количеству узлов конечно-элементной сетки, заданных по номерам.

Количество расчетных состояний (случаев) ограничивается только возможностями персонального компьютера. В программе должно быть предусмотрена возможность задания вручную данных (по напряжениям, температуре и количеству циклов) для расчета.

1.7 В программе должны быть реализованы по выбору пользователя, как метод» дождя по ГОСТ 25101-83, так и метод «теней» (Приложение А) для выделения циклов напряжений по каждой из трех зависимостей изменения напряжений  $(\sigma_F)_{ij}$ ,  $(\sigma_F)_{jk}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ . Для визуализации принимается максимальное значение повреждаемости в каждой точке.

1.8 Должна быть предоставлена возможность оценки вклада в суммарное усталостное повреждение отдельно взятых циклов нагружения (режимов).

1.9 В программе должно осуществляться для выбранных точек графическое представление историй нагружения (деформирования), а также графики местных приведенных напряжений и измененных с учетом пластической корректировки условных упругих приведенных напряжений.

1.10 Программа должна иметь встроенные базы данных в соответствии с данными Норм....:

- по физико-механическим характеристикам (включая характеристики длительной прочности, пластичности и ползучести на временной базе до  $5 \cdot 10^5$ ч) материалов с возможностью ее пополнения пользователем;

- по значениям коэффициентов снижения циклической прочности сварных соединений;

- по значениям коэффициентов влияния неметаллических включений;

- по значениям коэффициентов влияния контакта с натрием или аргоном реакторной чистоты и по значениям коэффициентов влияния нейтронного облучения.

В базах данных используемых в программе, промежуточные по температуре значения должны определяться линейной интерполяцией, а промежуточные по времени значения должны определяться линейной интерполяцией в логарифмических координатах.

1.11 В программе должна быть предоставлена возможность построения кривых усталости (при заданной температуре и коэффициенте асимметрии цикла).

1.12 При расчете на длительную циклическую прочность  $Z_m^T$  принимается равным  $Z_i^T$ , а в формулах приложения 7 Норм... /1/ вместо  $(1 - Z_i^T)$  должно быть  $(1 - Z_i^T / 100)$ .

1.13 Разработанная по настоящим техническим требованиям программа должна соответствовать ЕСПД и ГОСТ 19.001-77 и являться собственностью ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС».

Отчетной документацией должны являться:

- исполняемый модуль и файлы тестов с исходными данными и результатами расчета, демонстрирующими возможности программы, а также верификацию с аттестованной программой РЕСУРС86-2002 /3/ (аттестационный паспорт ПС № 174 от 16.03.2004);

- комплект программной документации согласно ГОСТ 19.101-77 (спецификация, текст программы, формуляр, методика расчета, описание программы и применения);

- верификационный отчет в соответствии с РД-03-34-2000.

1.14 С контрольными примерами по верификации, разработанной по настоящим техническим требованиям программы, с аттестованной программой РЕСУРС86-2002 /3/ можно ознакомиться в ОАО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» по адресу: Московская обл., г. Подольск., ул. Орджоникидзе, д. 21, корпус 100р, кабинет № 609. Ознакомление проводится по рабочим дням с 9-00 до 11-30. Для ознакомления необходимо заблаговременно позвонить по телефону 8 (495) 502-79-12 для заказа пропуска.

## 2 Этапы проведения расчета

2.1 В настоящем разделе изложены основные этапы проведения расчета на циклическую и длительную циклическую прочность при использовании результатов НДС, определенных на базе МКЭ в трехмерной постановке с целью автоматизации данного расчета.

Этап 1 - на базе созданной конструктором CAD-модели (NX, SOLIDWORKS, CATIA и т.п.) при необходимой для расчета детализации модели с учетом разных материалов, сварных соединений, зон концентрации, тепловых защит в среде APDL создается:

- модель для расчета температурных полей;
- модель для расчета на прочность.

Обе модели должны содержать в себе зоны для приложения граничных условий (в виде выделенных поверхностей), а также различные параметры размеров при необходимости вариантных расчетов. Все эти компоненты и параметры должны восприниматься расчетной программой. Разбиение модели на объемы осуществляется в CAD-модели.

Этап 2 - создается файл граничных условий для расчетных n-режимов, включающий моменты времени, температуру и коэффициент теплоотдачи, а также теплофизические свойства материалов и сред.

Этап 3 - по программе ANSYS, проводится расчет температурных полей. Переходные режимы должны быть связаны со стационарными состояниями по начальному или конечному моменту времени. При необходимости получения данных на промежуточных уровнях мощности делается выдержка по времени.

Этап 4 - проводится подготовка расчетной модели для определения напряженно-деформированного состояния по программе ANSYS, а именно:

- создается оптимальная конечно-элементной сетка, исходя из особенностей конструкции и времени счета. При создании расчетной модели проводится разбиение CAD-модели на объемы;
- задаются условия симметрии и закрепления с учетом созданной CAD-модели;
- задаются силовые нагрузки (давление и т.д.) CAD-модели. Допускается задание граничных условия для расчета температурных полей и силовых нагрузок в едином файле;
- задаются свойства конструкционных материалов для расчета либо упругого, либо упругопластического.

Этап 5 - по программе, например ANSYS, проводится упругий, либо упругопластический расчет режимов. Стационарными состояниями считаются либо начальный, либо конечный момент времени переходного режима. Для дальнейшей обработки в каждой точке расчетной схемы используются следующие данные:

- шесть составляющих напряженного состояния, интенсивность напряжений;

- шесть составляющих деформированного состояния, интенсивность деформаций;
- температура, момент времени и название режима.

Этап 6 - проводится анализ статической прочности конструкции вне зон концентрации в номинальном режиме и при гидравлических испытаниях.

Этап 7 - при необходимости определяются коэффициент концентрации напряжений, эффективный коэффициент концентрации местного приведенного напряжения в сварных соединениях с неполным проплавлением;

Этап 8 - проводится выбор методики расчета на циклическую прочность из нормативов, приведенных в таблице 2.1. Данные технические требования распространяются на программный модуль, разработанный по методике Норм.../1/, но должна быть предусмотрена возможность выбора из нормативов, представленных в таблице 2.1, модули которых будут разработаны в дальнейшем.

Этап 9 - по результатам расчета НДС проводится:

- определение приведенных напряжений, для чего в зависимости от норматива допускается использовать теорию максимальных касательных напряжений Треска-Сен-Венана или энергетическую теорию Мизеса;

- определение приведенных напряжений с учетом  $K_{ef}$  (при использовании эффективного коэффициента концентрации  $K_{ef}$ );

- выбор характерных для расчета на циклическую прочность точек. Расчетные точки выбираются из условия возникновения в них максимального размаха напряжений, а также с учетом иных факторов, способных привести к образованию усталостных трещин (локальное ухудшение механических свойств, наличие остаточных напряжений, изменённая структура металла, включения, облучение, коррозия и т.д.).

Этап 10 - формируется расчетная последовательность режимов, которая должна быть замкнутой, то есть цикл начинается и заканчивается одним и тем же стационарным состоянием. Количество циклов эксплуатационных режимов также должно быть замкнутым, то есть количество разогревов равно количеству расхолаживаний или количество переходов из одного стационарного состояния в другое равно количеству возвратов в первое.

В соответствии с п.5.3.15. "Норм..." /1/ Формирование циклов напряжений проводится таким образом, чтобы каждый раз на каждом из трех графиков изменения напряжений для выбранной последовательности по времени эксплуатационных режимов работы и нагружения из остающихся участков была получена наибольшая, возможная амплитуда местного приведенного напряжения.

Выбор циклов осуществляется одним из двух методов «дождя» или «теней».

Таблица 2.1

Документ, литература	Расчёт на циклическую прочность. Общие положения
ПНАЭ Г-7-002-86  /1/	<p>Расчёт на циклическую прочность является частью поверочного расчёта. Он проводится на основе анализа общих и локальных напряжений с целью исключения появления трещины в элементах конструкции при эксплуатации. Расчётом учитываются все эксплуатационные режимы работы и нагружения, включая условия испытаний и нарушения нормальных условий эксплуатации, а также циклическое нагружение от сейсмических воздействий, если суммарное усталостное повреждение без учёта сейсмических воздействий превышает 0,8.</p> <p>В результате расчета определяется допускаемое число циклов нагружения и накопленное усталостное повреждение исходя из характеристик циклической прочности с введением запасов прочности по долговечности и напряжениям.</p> <p>Приведены отдельно методика расчета на длительную статическую прочность и методика расчета на длительную циклическую прочность. В расчете на длительную циклическую прочность используются длительные свойства материала при максимальной температуре цикла нагружения за время <math>t</math>, равное части рабочего ресурса рассматриваемой детали, отработываемого при температуре выше <math>T_b</math>, а при расчете условных упругих напряжений в переходных режимах рекомендовано учитывать среднее время работы на стационарном режиме между соответствующими переходными режимами.</p> <p>Основные критерии оценки прочности Норм /1/ базируются в основном на теории оболочек и упругом расчете. Об испытаниях, проводимых при изготовлении, информация отсутствует. Отдельные положения Норм, также положения Норм применительно к оценке прочности по трехмерным моделям нуждаются в доработке.</p>

Продолжение таблицы 2.1

Документ, литература	Расчёт на циклическую прочность. Общие положения
<p>РД ЭО 0330-01 /4/ и в редакции 2010г при обосновании продления срока службы</p>	<p>Расчёт на циклическую прочность проводится на основе анализа общих и локальных напряжений с целью исключения появления трещины в элементах конструкции при эксплуатации. Расчётом учитываются все фактические эксплуатационные режимы работы и нагружения, а также циклическое нагружение от сейсмических воздействий, если суммарное усталостное повреждение <math>[a]</math> без учёта сейсмических воздействий превышает 1. С учетом сейсмических воздействий должно выполняться условие <math>[a] &lt; 1,2</math>.</p> <p>В документе даны рекомендации по проведению полного упругопластического расчета. Введен порядок формирования расчетных циклов методом "теней". Изменены по сравнению с Нормами... /1/ кривые усталости и формулы по их определению.</p>
<p>РДЭО 1.1.2.09.0714-2007 /5/</p>	<p>В документе рассмотрен только аустенитный материал типа 18-8, из которого изготовлен реактор БН-600. Расчет по предельному состоянию «зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости» проводится для элементов РУ, максимальная температура которых, в рассматриваемый период времени, не превышает 450 °С. При температуре свыше 450 °С проводится расчет по критическому событию «зарождение трещины при длительном статическом циклическом нагружении при ползучести и усталости».</p> <p>С целью определения размахов деформаций для каждого временного интервала <math>\Delta t_j</math> решается термоупругопластическая задача. В документе приведены формулы и нормативные кривые усталости в координатах деформация-количество циклов для основного металла и металла шва при различных уровнях флюенсов нейтронов и максимальной асимметрии цикла. Предельное состояние «зарождение трещины при циклическом нагружении по механизму усталости» за рассматриваемый период эксплуатации не достигается, если выполняется условие <math>D_N &lt; 1</math>. Если на конец рассматриваемого периода эксплуатации повреждаемость <math>D_N &gt; 1</math>, то определяется такой момент времени эксплуатации (отсчет ведется с начала эксплуатации РУ), при котором <math>D_N = 1</math>. Начиная с этого момента времени, рассматривается развитие зародившейся трещины.</p>

Документ, литература	Расчёт на циклическую прочность. Общие положения
РД БОР-001-2008 /6/	<p>Расчёт на циклическую прочность проводится на основе анализа условий эксплуатации элементов РУ БОР-60. Последовательность режимов устанавливается на основе фактической истории нагружения за период эксплуатации и проектной типовой физически возможной последовательности нагружения на период продления срока службы РУ БОР-60.</p> <p>Допускается проведение расчета как с использованием теории максимальных касательных напряжений, так и с использованием энергетической теории Мизеса. Допускается проведение расчета по Нормам /1/, а также с использованием средних свойств материала, в которых учтено облучение. Изменен по сравнению с /1/ учет асимметрии цикла. Состояние рассчитываемого элемента, при котором суммарное накопленное усталостное повреждение <math>a = 1</math>, не является предельным. При достижении данного состояния рассматривается развитие зародившейся трещины.</p>
СТО	<p>В рамках НИОКР по ПГ БН-1200 ЦНИИКМ «Прометей» совместно с ОКБ «ГИДРОПРЕСС» разрабатывает стандарт эксплуатирующей организации - методику оценки длительной статической прочности и длительной циклической прочности на ресурс от 45 до 60 лет элементов оборудования и высокотемпературных трубопроводов, работающих в условиях ползучести и усталости.</p>

Этап 11 - выбираются данные по свойствам конструкционных материалов:

- физико-механические свойства для соответствующего сортамента материала конструкции;
- сварочный материал, если узел находится в зоне сварного соединения;
- для учета влияния нейтронного облучения – значение флюенса нейтронов;
- при температуре, превышающей температуру  $T_t$  дополнительно:
  - а) характеристики длительной прочности и пластичности материала, характеристики ползучести;
  - б) длительность цикла и длительность нагружения;
  - в) балл неметаллических включений;
  - г) учет влияния контакта с натрием или аргоном реакторной чистоты.

Этап 12 - в зависимости от требований норматива с введением коэффициентов запаса по числу циклов и по напряжениям определяется допускаемое число циклов  $i$ -го типа и накопленное усталостное повреждение, которое сравнивается с предельным значением.

2.2 В окончательный отчет включаются рисунки описывающие расчетные модели, температурные поля в моменты времени возникновения экстремумов приведенных напряжений, рисунки с характерным НДС, циклической повреждаемостью рассчитываемой модели и определяющими точками, для которых в графическом и табличном виде выдается более подробная информация по определению накопленного повреждения.

### 3 Описание структуры программного средства

3.1 Исходя из требований к программному средству, изложенных в разделе 2, последовательности выполнения расчета (раздел 3) для автоматизации расчета на циклическую и длительную циклическую прочность необходимо организовать весь процесс вычислений таким образом, чтобы главный модуль программы:

- обеспечивал задание данных для программы ANSYS и хранение данных необходимых для дальнейшего расчета;
- определял основные параметры расчета для выбранной методики (норматива);
- использовал предварительно созданную базу данных по свойствам конструкционных материалов;
- обеспечивал визуализацию задания исходных данных;
- осуществлял диагностику корректности исходных данных;
- организовал управление работой всех модулей программы;
- осуществлял вывод и визуализацию результатов расчета;
- осуществлял оформление исходных данных и результатов расчета в виде таблиц и рисунков для использования в окончательном текстовом отчете;
- имел развернутый HELP с описанием примеров.

3.2 Упрощенная блок-схема разрабатываемого программного средства изображена на рисунке 3.1.

3.3 Как пример структуры программы определения повреждаемости по Нормам..., на рисунках 3.2 - 3.3 приведена блок-схема программного модуля Cикl2002.exe программы РЕСУРС86-2002 /3/.

3.4 База данных должна содержать:

- создаваемые и редактируемые пользователем данные, которые включают в себя названия конструкционных материалов, сортамента, источник свойств и значения в зависимости от используемой методики расчета всех необходимых свойств:

а) физико-механические;

б) средние значения характеристик длительной прочности, пластичности и ползучести (например таблицы П.1.1, П.1.3, П6.1-П.6.4 Норм... /1/ );

в) характеристик ползучести (например по изохронным кривым ползучести Приложения 6 Норм... );

- встроенные базы данных. Для расчета по Нормам.../1/ :

а) по значениям коэффициентов снижения циклической прочности сварных соединений соответствует таблицам 5.8, 5.9, П7.2 Норм.../1/ ;

б) по значениям коэффициентов влияния неметаллических включений соответствует таблице П7.1 Норм.../1/;

в) по значениям коэффициентов влияния контакта с натрием или аргоном реакторной чистоты соответствует таблице П7.3 Норм.../1/ ;

г) по значениям коэффициентов влияния нейтронного облучения соответствует таблице П7.4 Норм... /1/.

3.5 Также желательно эту общую базу использовать и при расчете по ANSYS и для оформления подраздела по материалам в окончательном отчете.

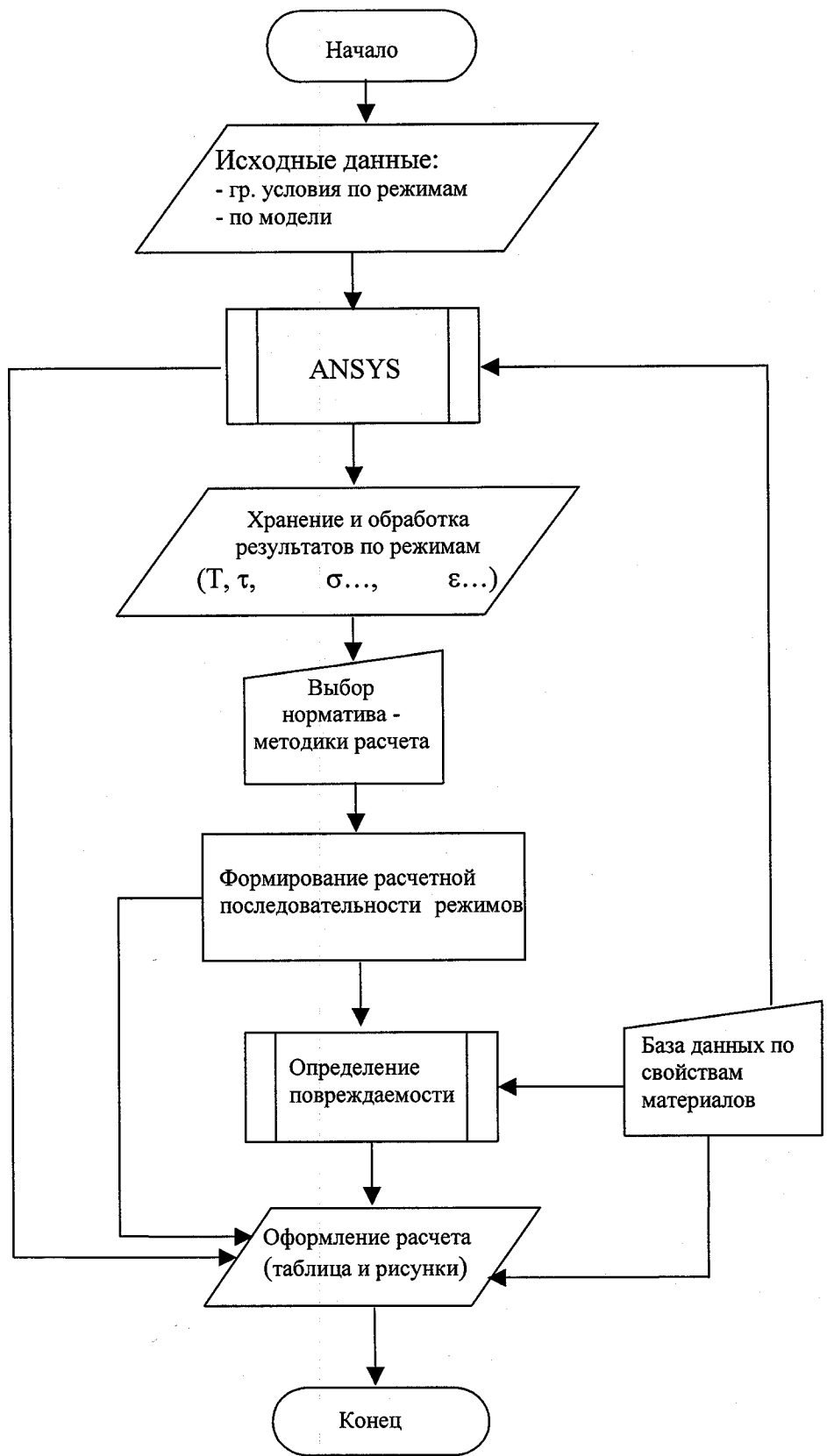


Рисунок 3.1 - Блок-схема программного средства

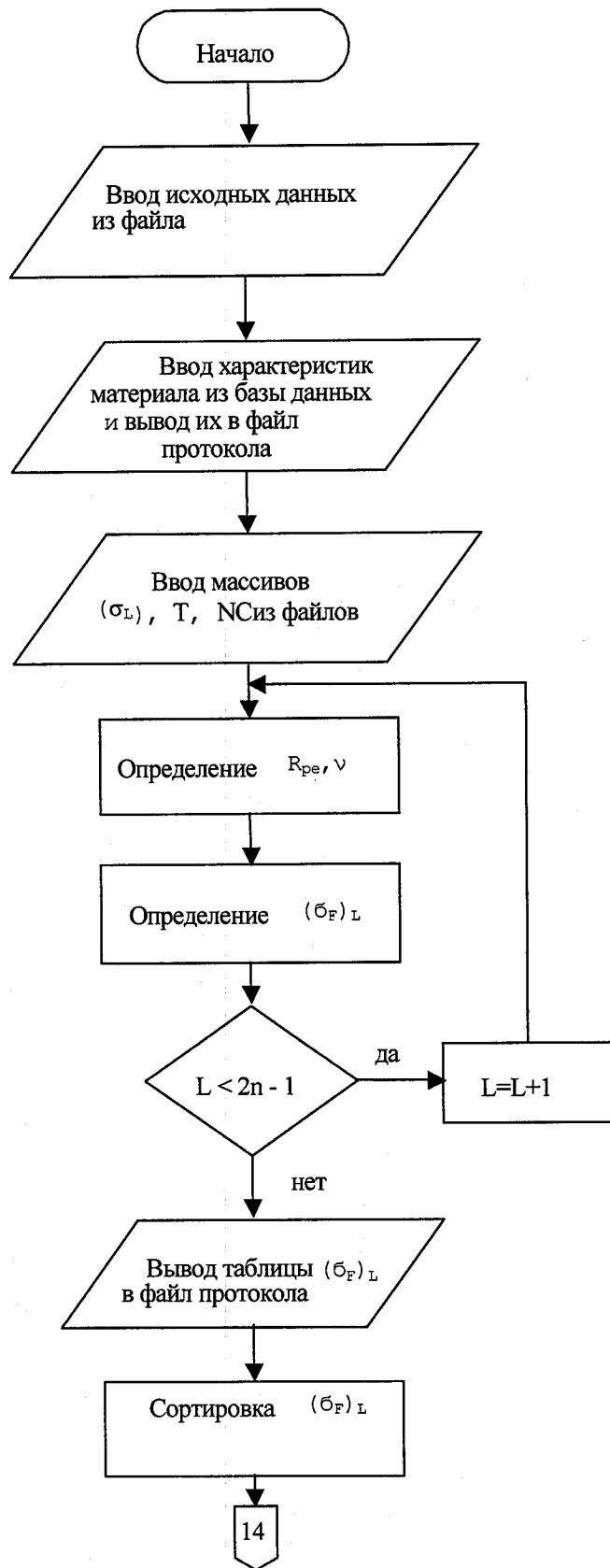


Рисунок 3.2 - Блок-схема модуля Cikl2002.exe

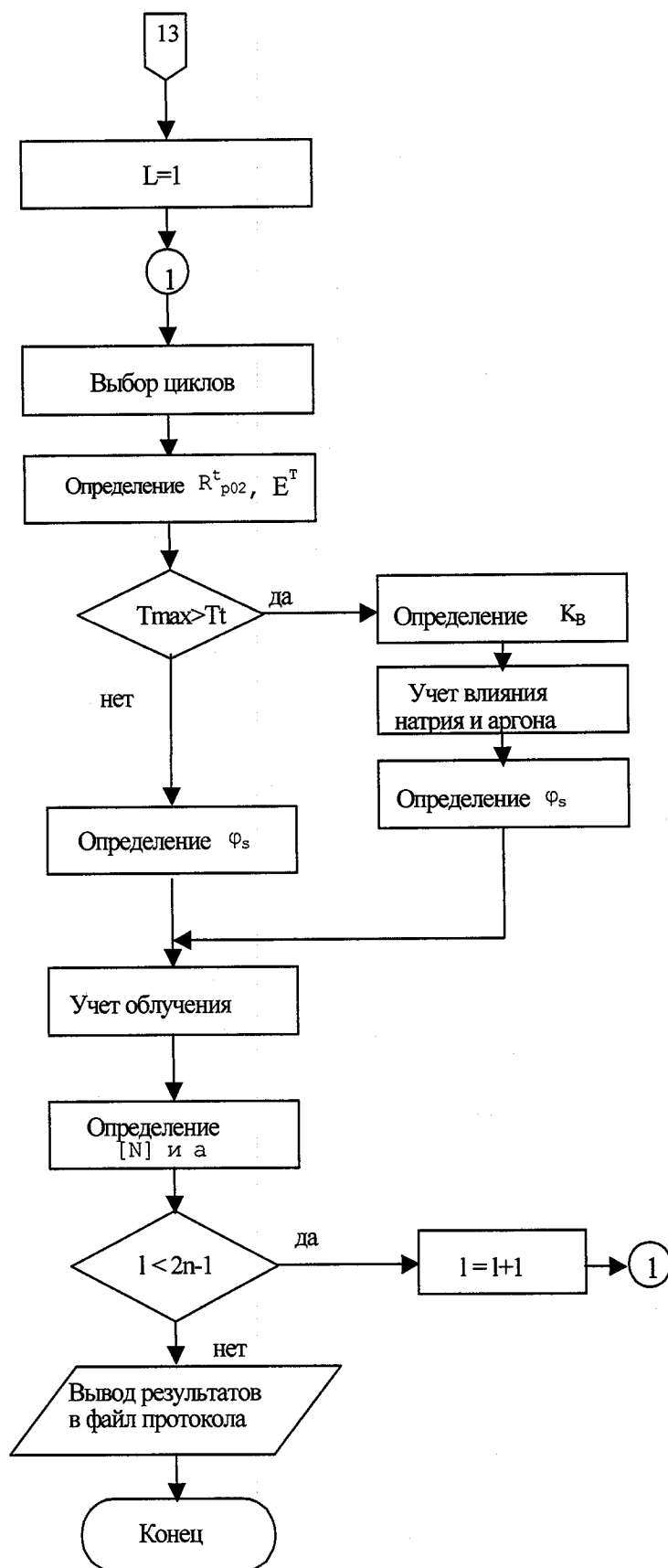
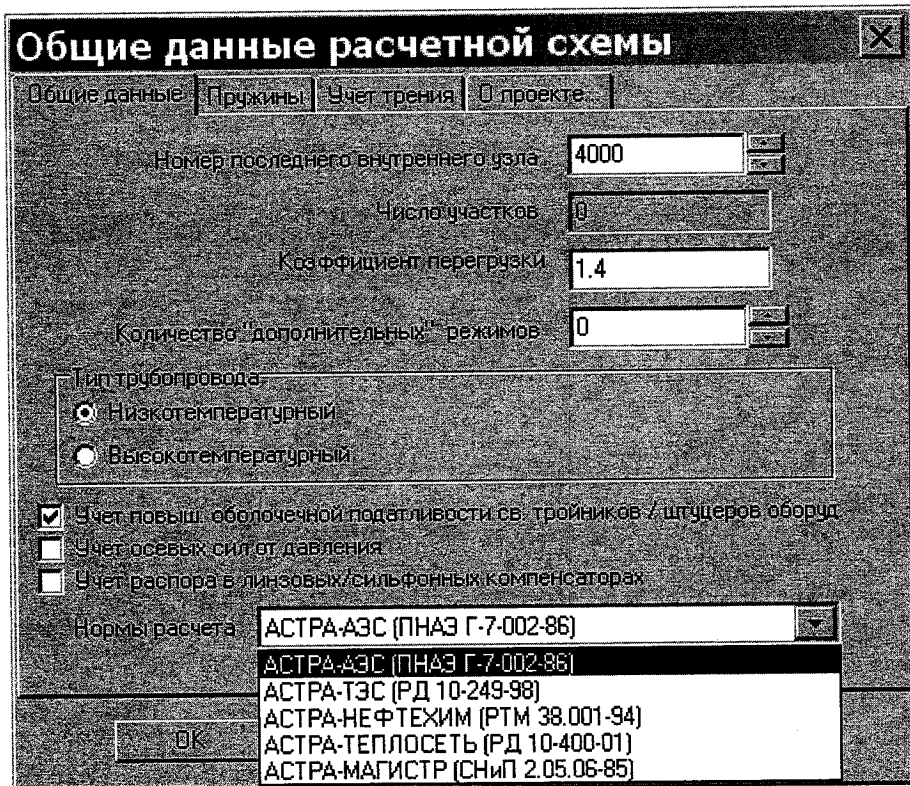


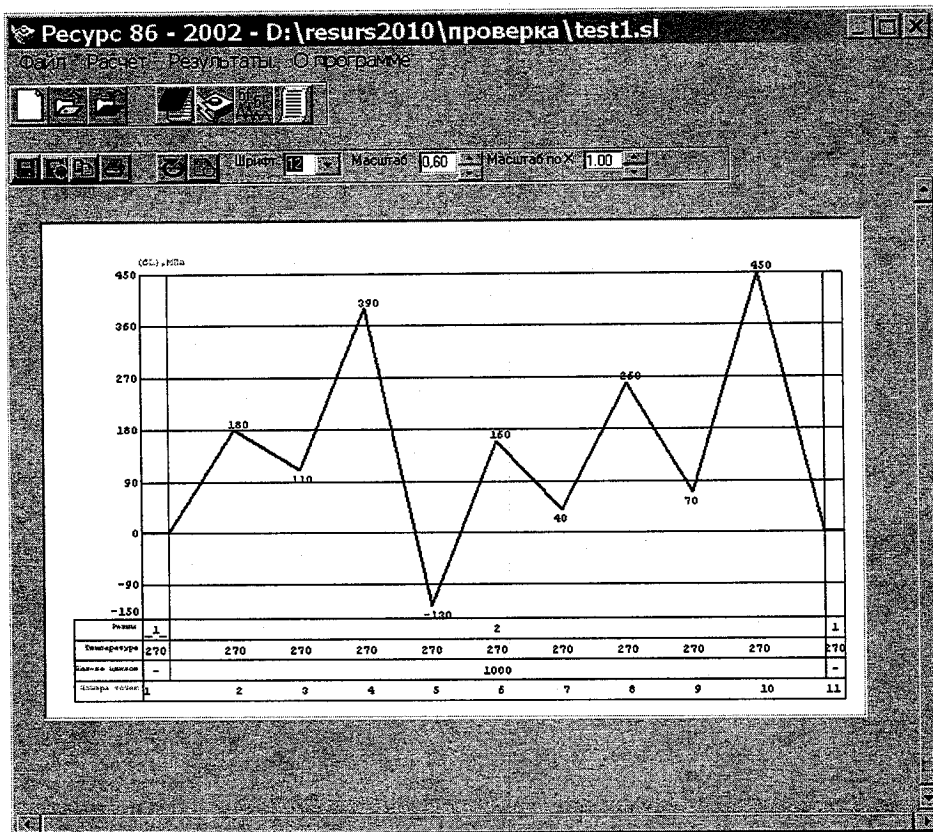
Рисунок 3.3 - Блок-схема модуля Cikl2002.exe

4 Примеры оформления программ приведены

4.1 - Пример выбора нормативного документа



4.2 - Пример визуализации расчетной последовательности режимов в точке



#### 4.3 - Пример задания общих исходных данных

**Исходные данные для расчета - D:\resurs2010\прове...**

test Добавить комментарий

**Вид расчета**

с учетом пластической деформации (памяти материала)  без учета пластической деформации (с использованием K<sub>pl</sub>)

**Вид материала**

8. 09X18H9 поковка t=300000ч Характеристики

**Материал**

Легированная сталь и сварное соединение  Сталь конструктивного класса и сварное соединение  Железо-никелевые сплавы и сварное соединение  Углеродистая сталь и сварное соединение

**Температура Tt**

350 C  450 C

Tmax Tt  Tmax Tt

**Коэффициенты запаса**

по напряжениям: 2  
по числу циклов: 10

**Сварочный материал**

Исследуемый шов находится в зоне сварного шва?

**Сортамент**

Лист  Прокат или труба за отводка  Поковка

**Длительность**

цикла: 3000  
напряжения: 270000

**Балл неметаллических включений**: 3  Учитывать коэффициент влияния работы в условиях нейтронного облучения

Учитывать влияние натрия и аргона реакторной частоты

Введите значение потока нейтронов FN 1/м<sup>2</sup> (например в следующем виде 12UE26): 2.7E25

OK Отмена

#### 4.4 Пример визуализации базы по свойствам материала

**Характеристики материала - 8 - 09X18H9 - поковка t=...** Закрыть

**Физико-механические характеристики**

t, C	-20	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
R <sub>m</sub> , МПа	491	470	451	425	400	380	380	340	323	314	30
R <sub>p0.2</sub> , МПа	196	196	177	157	147	137	128	118	118	108	9
Z <sub>0.2</sub>	45	45	45	45	45	45	45	45	45	45	4

**Характеристики длительной прочности и пластичности**

**R<sub>m</sub>** **Z<sub>0.2</sub>** **A<sub>5</sub>** **R<sub>m</sub>, МПа**

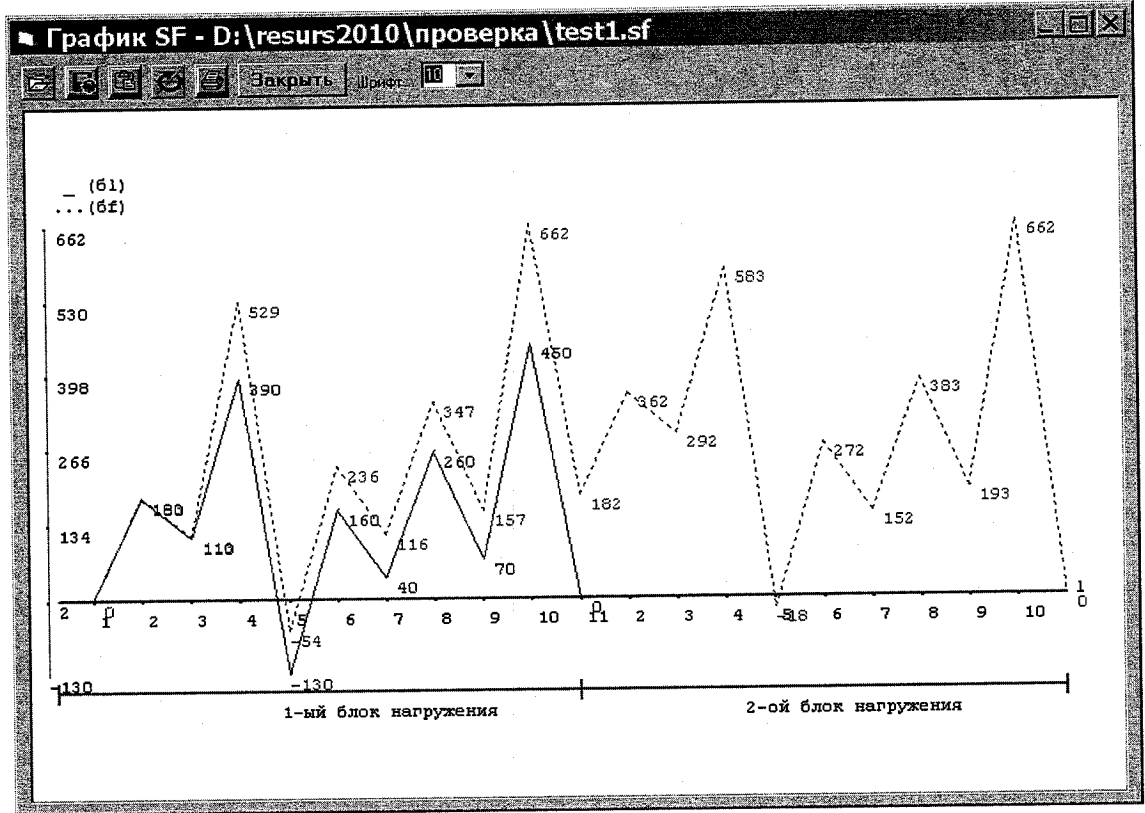
t, C	10	30	100	300	1000	3000	1E+4	3E+4	1E+5	2E+5	3E+5
450	361	361	361	361	361	361	361	361	297	268	259
500	361	342	333	314	285	256	238	209	190	180	172
550	323	313	290	275	237	200	171	152	133	123	115
600	266	257	232	195	166	152	119	100	85	76	76

**Изотермические характеристики ползучести**

**R<sub>p0.2</sub>** **R<sub>p0.2</sub>** **σ<sub>t</sub>** **R<sub>p0.2</sub>, МПа**

t, C	10	30	100	300	1000	3000	1E+4	3E+4	1E+5	2E+5
450	120	120	120	120	120	120	120	120	120	120
500	115	112	112	110	105	99	95	86	70	50
550	106	102	95	88	75	69	59	52	45	40
600	100	92	85	70	60	54	50	45	42	34

4.5 - Пример визуализации изменения местного условного упругого приведенного напряжения



4.6 - Пример оформления результатов расчета

test1.lpv - AkelPad

Файл Вставка Поиск Кодировка Настройки Справка

Таблица - Определенное (SF)1

Номер	Tmin	Tmax	Frе.	nu	(6L)h,	(6L)l,	ksi	(6F)h,	(6F)l,	lb	
Бл	Пл	'C	'C	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа		
1	1	270	270	149.5	0.174	0.0	180.0	1	0.0	182.5	2
1	2	270	270	149.5	0.174	180.0	110.0	-	182.5	112.5	2
1	3	270	270	149.5	0.174	0.0	390.0	1	0.0	528.9	4
1	4	270	270	149.5	0.174	390.0	-130.0	2	528.9	-53.7	4
1	5	270	270	149.5	0.174	-130.0	160.0	-	-53.7	236.3	4
1	6	270	270	149.5	0.174	160.0	40.0	-	236.3	116.3	4
1	7	270	270	149.5	0.174	-130.0	260.0	2	-53.7	347.4	4
1	8	270	270	149.5	0.174	260.0	70.0	-	347.4	157.4	4
1	9	270	270	149.5	0.174	0.0	450.0	1	0.0	661.6	10
1	10	270	270	149.5	0.174	450.0	0.0	2	661.6	181.7	10
2	1	270	270	149.5	0.174	0.0	180.0	-	181.7	361.7	10
2	2	270	270	149.5	0.174	180.0	110.0	-	361.7	291.7	10
2	3	270	270	149.5	0.174	0.0	390.0	2	181.7	582.8	10
2	4	270	270	149.5	0.174	450.0	-130.0	2	661.6	-18.0	10
2	5	270	270	149.5	0.174	-130.0	160.0	-	-18.0	272.0	10
2	6	270	270	149.5	0.174	160.0	40.0	-	272.0	152.0	10
2	7	270	270	149.5	0.174	-130.0	260.0	2	-18.0	383.1	10
2	8	270	270	149.5	0.174	260.0	70.0	-	383.1	193.1	10
2	9	270	270	149.5	0.174	-130.0	450.0	2	-18.0	661.6	10
2	10	270	270	149.5	0.174	450.0	0.0	2	661.6	181.7	10

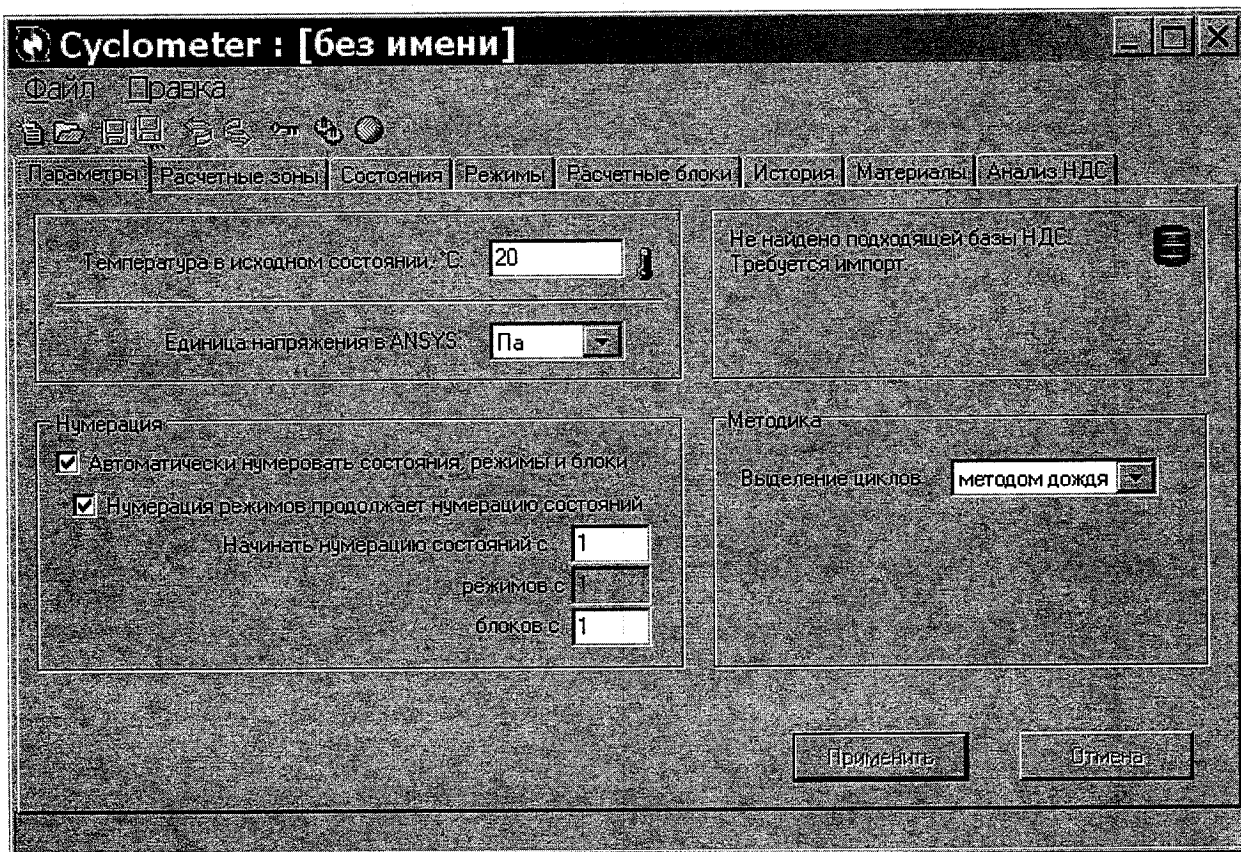
Таблица - test

Номер	(6F)i, МПа	(6aF),	Tmin	Tmax	r	бав,	fs	баFs,	N	[N]	a		
Бл	Точка	min	max	МПа	'C	'C	МПа	МПа					
1	5; 10	-53.7	661.6	357.6	270	270	-1.00	0.0	1.00	357.6	1	5.0E+03	2.0E-04
1	1; 4	0.0	528.9	264.5	270	270	-1.00	0.0	1.00	264.5	1	1.4E+04	7.4E-05
1	3; 8	112.5	347.4	117.4	270	270	-0.24	0.0	1.00	117.4	1	3.0E+05	3.4E-06
1	7; 6	116.3	236.3	60.0	270	270	0.37	0.0	1.00	60.0	1	7.1E+06	1.4E-07
1	9; 2	157.4	182.5	12.6	270	270	0.86	0.0	1.00	12.6	1	2.1E+13	4.7E-14
2	5; 10	-18.0	661.6	339.8	270	270	-1.00	0.0	1.00	339.8	999	5.8E+03	1.7E-01
2	7; 4	152.0	582.8	215.4	270	270	-1.00	0.0	1.00	215.4	999	3.0E+04	3.4E-02
2	1; 8	181.7	383.1	100.7	270	270	-0.06	0.0	1.00	100.7	999	5.6E+05	1.8E-03
2	9; 2	193.1	361.7	84.3	270	270	0.11	0.0	1.00	84.3	999	1.2E+06	8.1E-04
2	3; 2	291.7	361.7	35.0	270	270	0.63	0.0	1.00	35.0	999	3.1E+08	3.3E-06
2	7; 6	152.0	272.0	60.0	270	270	0.37	0.0	1.00	60.0	999	7.1E+06	1.4E-04

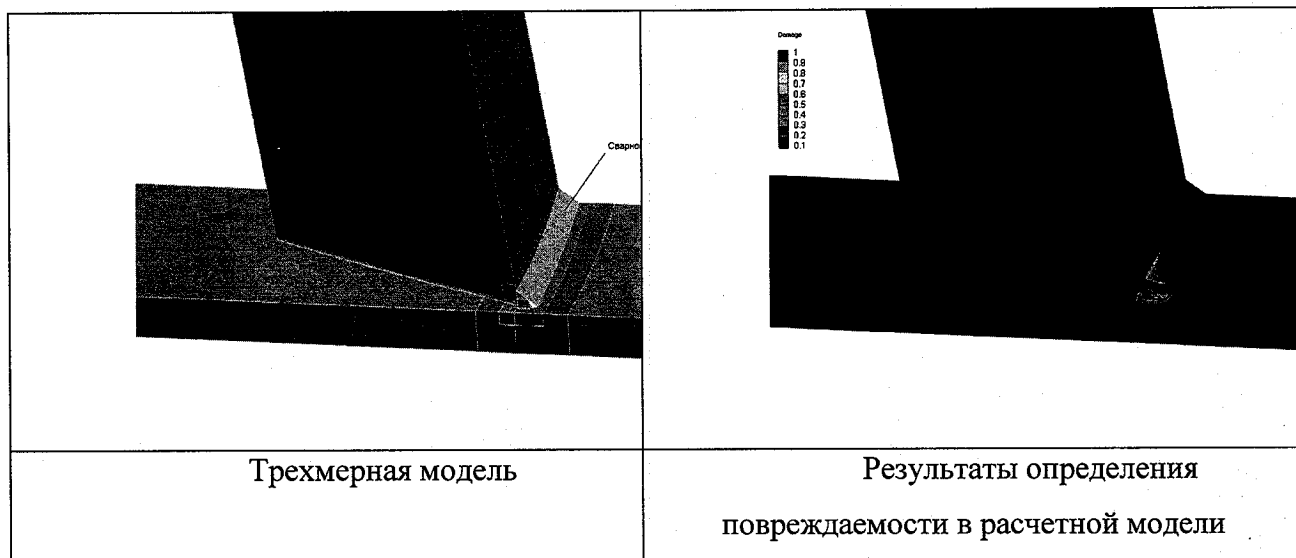
Примечание - Суммарная повреждаемость A=2.08E-01

68.1 Вставка ИМЕНЕН DCS-866 (OEM)

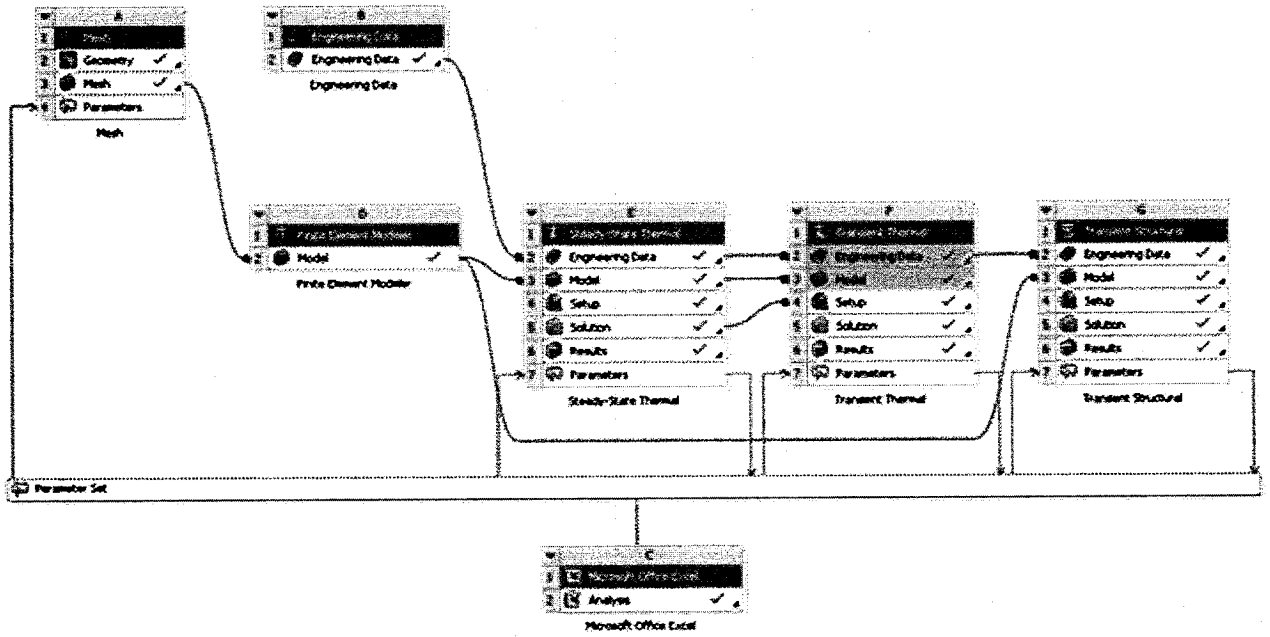
4.7 - Пример формирования расчетной последовательности из просчитанных режимов.



4.8 - Пример визуализации результатов определения повреждаемости

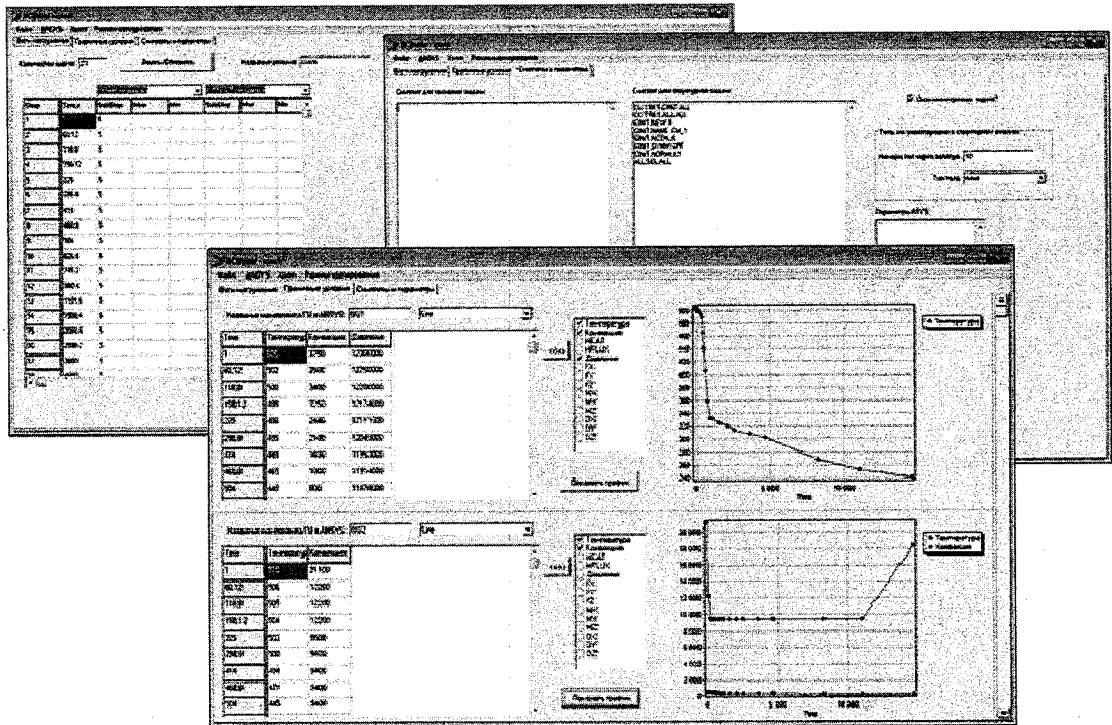


#### 4.9 - Пример организации расчетной цепочки в ANSYS Workbench



Модель для расчета импортируется из CAD вместе с параметрами и компонентами для приложения граничных условий. Настраивается расчетная цепочка, задаются граничные условия, свойства материала. Цепочка строится таким образом, чтобы все изменения с геометрией и граничными условиями происходили без необходимости изменения данных в конкретном расчетном блоке.

#### 4.10 - Пример окон сервисной программы



4.11 Данные примеры, безусловно, подлежат улучшению как с точки зрения автоматизации, использования современных возможностей, так и наглядности.

## Приложение А

(справочное)

### Формирование расчетных циклов напряжений по методу "теней"

По трем графикам местных приведенных напряжений устанавливается наибольшее по абсолютному значению условное упругое напряжение  $(\sigma_F^*)_{\max}$  для всего процесса изменения напряжений.

Формирование расчетных циклов или полуциклов напряжений выполняется на основе полной истории нагружения за период от  $t_1$  до  $t_m$ . При этом каждый раз при выделении очередного полуцикла из участков трех графиков изменения напряжений  $(\sigma_F)_{ij}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$  должна быть получена наибольшая возможная амплитуда местного приведенного напряжения.

Для формирования расчетных циклов (полуциклов) напряжений каждый из графиков  $(\sigma_F)_{ij}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$  во временном диапазоне от  $t_1$  до  $t_m$  должен быть замкнут, то есть в нем должны совпадать начальное (в момент времени  $t_1$ ) и конечное (в момент времени  $t_m$ ) значения напряжений. В противном случае графики следует искусственно замкнуть, введя в них соответствующие фиктивные участки изменения напряжений в интервале времени от  $t_m$  до некоторого фиктивного значения  $t_\phi$ .

Эти фиктивные участки истории нагружения вносят дополнительное усталостное повреждение, что делает последующую оценку циклической прочности консервативной. При необходимости результат расчета может быть уточнен путем вычитания величины повреждения от фиктивных участков из суммарного усталостного повреждения.

В процессе формирования расчетных циклов (полуциклов) предполагается, что каждый из трех графиков многократно освещается потоком света, лучи которого направлены вдоль горизонтальной оси времени. Освещения являются парными; при первом освещении из каждой пары рассматриваются только возрастающие, а при втором - только убывающие участки, соединяющие соседние локальные максимумы и минимумы. Считается, что свет не проходит сквозь рассматриваемые участки графиков (возрастающие либо убывающие), вследствие чего на каждом графике при каждом освещении образуется вертикальное пятно тени.

Порядок формирования расчетных циклов следующий:

а) выполняется первый этап основного парного освещения: на всех трех графиках освещаются возрастающие участки. Образующиеся на трех графиках пятна тени сравниваются по величине. Если при одном освещении на каком-либо графике образуется два или больше пятен, то в сравнении каждое пятно участвует независимо. Из всех пятен

тени, образующихся на трех графиках, выбирается пятно максимального размера. Если несколько пятен имеют одинаковый размер, то выбирается то, у которого верхняя граница расположена выше;

б) по выбранному пятну тени формируется расчетный возрастающий полуцикл напряжений следующим образом: его минимальное и максимальное значения принимаются равными, соответственно, нижней и верхней границам выбранного пятна;

в) на графике, на котором был сформирован этот возрастающий полуцикл, выполняется второй этап основного парного освещения: освещаются убывающие участки. Образующееся при этом пятно тени совпадает с пятном от возрастающих участков и на тех же принципах формирует расчетный убывающий полуцикл;

Сформированные таким образом расчетные возрастающий и убывающий полуциклы имеют одинаковые минимальные и максимальные значения. Такие полуциклы называются парными расчетными полуциклами.

Парные расчетные полуциклы могут быть объединены в один расчетный цикл;

г) после того, как выполнено основное парное освещение и сформированы парные расчетные полуциклы напряжений, графики  $(\sigma_F)_{ij}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$  должны быть для дальнейшего анализа преобразованы следующим образом:

1) на графике, на котором были сформированы очередные парные расчетные полуциклы, удаляются те участки, тень от которых вошла в выбранные пятна тени для этих полуциклов;

2) на двух остальных графиках части, расположенные в тех же интервалах времени, что и удаленные участки первого графика, подвергаются дополнительному парному освещению. При этом остальные части этих двух графиков игнорируются. На каждом из двух графиков сравниваются пятна тени от возрастающих и убывающих участков. Если эти пятна совпадают полностью или какой-либо своей областью, то части возрастающих и убывающих участков рассматриваемого графика, создавшие эту общую область тени, удаляются. Если совпадающих областей тени образуется несколько, то удаляются только те освещенные участки, размер области тени от которых больше, а при равенстве – у которых область тени размещена выше;

д) процесс формирования циклов (полуциклов) повторяется по пп. а) - г) до тех пор, пока не окажутся удаленными все участки рассматриваемых графиков.

Каждый из сформированных расчетных циклов (полуциклов) напряжений должен для выполнения последующего расчета на циклическую прочность сопровождаться информацией об условиях эксплуатации (о температуре, параметрах среды и флюенсе

нейтронов, длительности реализации), соответствующих всем тем частям графиков напряжений, из которых он был составлен.

В том случае если для вычисления приведённых напряжений использовалась энергетическая теория Мизеса /2/ рекомендует аналогичный вышеизложенному подход, отличие заключается в том, что в этом случае рассматривается только один график изменения ( $\sigma_F$ ).

Порядок формирования расчетных циклов проиллюстрирован ниже для истории нагружения, определяемой графиками изменения условных упругих приведенных напряжений ( $\sigma_F$ )<sub>ij</sub>, ( $\sigma_F$ )<sub>ik</sub>, ( $\sigma_F$ )<sub>ik</sub>, показанными на рисунке А.1.

Поскольку исходные графики незамкнуты (что может являться следствием одностороннего накопления деформаций в условиях пластичности), то они искусственно замыкаются введением соответствующих фиктивных участков на интервале времени от  $t_m$  до  $t_f$  (на рисунке эти участки показаны пунктиром).

Возрастающие участки графиков образуют при первом основном освещении пятна тени, показанные на рисунке А.2. Выбирается пятно с максимальным размахом; оно возникает на графике для ( $\sigma_F$ )<sub>jk</sub> и имеет размах 6000 МПа. Освещение убывающих участков этого графика дает такое же пятно тени. По этому пятну из двух парных расчетных полуциклов формируется 1-ый расчетный цикл, имеющий минимальное напряжение (-3000) МПа и максимальное - (+3000) МПа. Тонким пунктиром на рисунке А.2 показано дополнительное парное освещение участков (местами вспомогательное освещение совпадает с основным).

На рисунке А.3 показаны оставшиеся участки графиков после того, как из графика для ( $\sigma_F$ )<sub>jk</sub> были удалены части, освещенные основным парным освещением, а из двух других графиков удалены части, освещенные дополнительным парным освещением и соответствующие по времени удаленным частям графика ( $\sigma_F$ )<sub>jk</sub>.

При втором основном парном освещении этих оставшихся возрастающих участков максимальное пятно возникает на графике для ( $\sigma_F$ )<sub>ij</sub> и имеет размах 5000 МПа. Такое же пятно возникает при освещении убывающих участков этого графика и определяет 2-ой расчетный цикл с напряжениями: минимальным - 0 МПа и максимальным - (+5000) МПа.

Поскольку после выполнения дополнительного освещения и удаления освещенных участков никаких других участков на графиках не остается, то процесс формирования расчетных циклов на этом завершается.

При необходимости для снижения консерватизма может быть учтено введенное фиктивное нагружение, замыкающее исходные графики изменения напряжений. Для данного примера максимальный размах имеет фиктивный полуцикл, введенный на

графике  $(\sigma_F)_{ik}$  (см. рисунок А.1). Поэтому расчетный фиктивный полуцикл имеет параметры: минимальное напряжение  $-(-2000)$  МПа; максимальное напряжение  $-0$  МПа.

В результате для графиков изменения условных упругих приведенных напряжений  $(\sigma_F)_{ij}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ ,  $(\sigma_F)_{ik}$ , показанных на рисунке А.1, сформированы следующие расчетные циклы:

- 1-ый расчетный цикл: минимальное напряжение -  $(-3000)$  МПа; максимальное напряжения -  $(+3000)$  МПа;
- 2-ой расчетный цикл: минимальное напряжение -  $0$  МПа; максимальное напряжения -  $(+5000)$  МПа;
- фиктивный расчетный полуцикл (используется при необходимости): минимальное напряжение  $-(-2000)$  МПа; максимальное напряжения -  $0$  МПа.

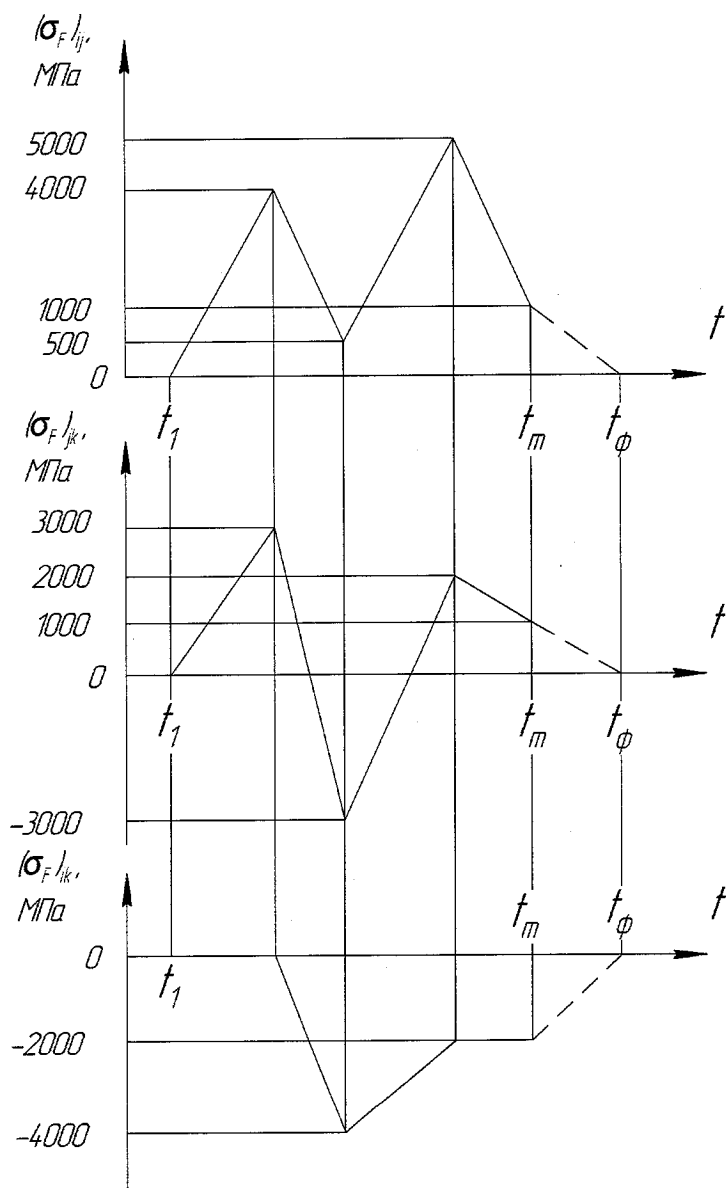


Рисунок А.1 - Пример анализа полной истории нагружения.

Исходные графики изменения напряжений

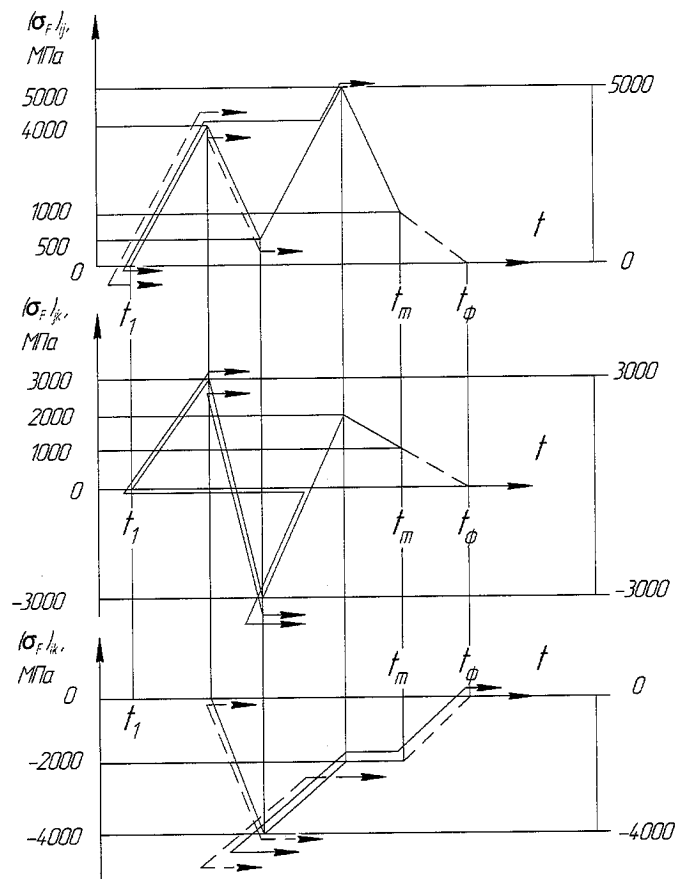


Рисунок А.2 – Пример анализа полной истории нагружения.  
Формирование 1-го расчетного цикла напряжений

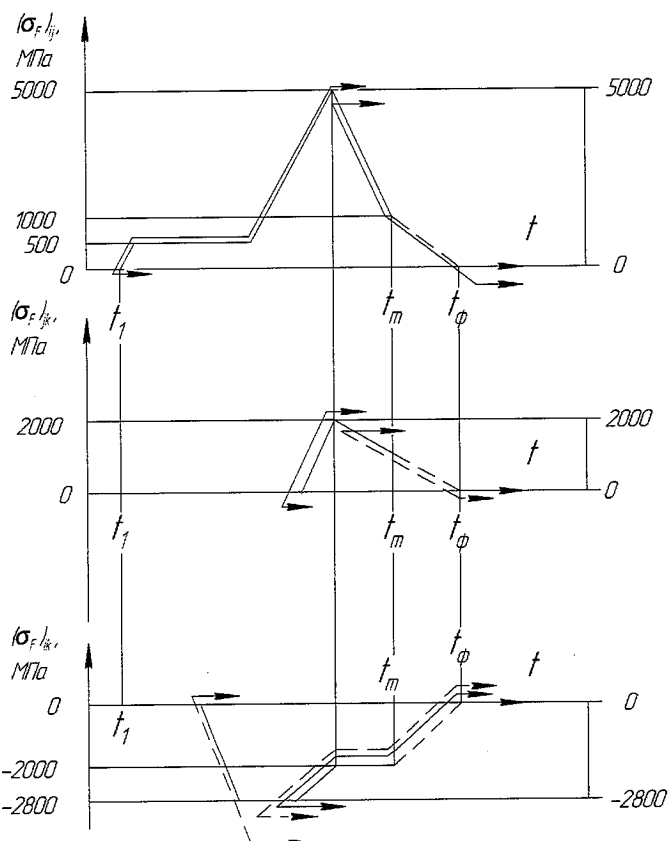


Рисунок А.3 – Пример анализа полной истории нагружения.  
Формирование 2-го расчетного цикла напряжений

## Список литературы

1 Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПН АЭ Г-7-002-86, Москва, Энергоатомиздат, 1989.

2 Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-008-89, Москва, Энергоатомиздат, 2000.

3 Программа для ПЭВМ. Расчет на циклическую прочность, РЕСУРС86-2002, 08624607.00418, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2002.

4 Руководство по расчету на прочность оборудования и трубопроводов реакторных установок РБМК, ВВЭР и ЭГП на стадии эксплуатации". РД ЭО 0330-01. Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», Москва, 2004.

5 Методика расчета прочности основных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. РД ЭО 1.1.2.09.0714-2011. Концерн «РОСЭНЕРГОАТОМ», 2011.

6 Методика обоснования целостности элементов РУ БОР-60 в связи с продлением срока службы. РД БОР-001-2008, Москва, ИЦП МАЭ, 2008.

Начальник отдела 3.04



С.Л. Лякишев