

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ПО ПРОВЕДЕНИЮ И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ОЦЕНОК НАДЕЖНОСТИ В РАМКАХ ПРОЧНОСТНОЙ МОДЕЛИ

*Борисова Юлия Александровна (vniitf@vniitf.ru), Старцев Алексей Викторович,
Ковалева Виктория Александровна*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е. И. Забабахина», г. Снежинск Челябинской обл.

В докладе описана расчетная программа «Point 9», интегрированная в программный комплекс на основе конечно-элементного моделирования, которая позволяет автоматизировано проводить расчеты показателей точечных оценок надежности конструкций в рамках прочностной модели, а также визуализировать результаты расчета на 2D или 3D моделях.

На ранних стадиях разработки изделия, когда отсутствуют экспериментальные данные, показатели надежности в рамках прочностной модели, как правило, вычисляются не для всей конструкции, а только для элементов расчета надежности, которые выбираются по результатам прочностного расчета. Разработанная программа позволяет проводить оценку надежности конструкции в целом и автоматически выбирать элементы расчета надежности, что исключает человеческий фактор, как причину переоценки надежности в рамках прочностной модели. Визуализация распределения показателей надежности в разрабатываемой конструкции повышает информативность результатов расчета.

Ключевые слова: надежность, прочностная модель, точечная оценка надежности, визуализация.

DEVELOPMENT OF THE CODE TO ESTIMATE AND VISUALIZE RELIABILITY WITHIN THE STRESS-STRENGTH MODEL

*Borisova Yulia Alexandrovna (vniitf@vniitf.ru), Starcev Alexey Viktorovich,
Kovaleva Viktoriia Alexandrovna*

FSUE «RFNC-VNIITF named after Academ. E. I. Zababakhin»,
Snezhinsk Chelyabinsk region

The work describes Point 9 computational code integrated into the program complex based on finite-element simulation which allows automatically calculating point-like estimates of reliability measures of structures within stress-strength model and visualizing computational results through 2D and 3D models.

At earlier stages of workpiece design generally characterized by the lack of experimental data, reliability measures are usually calculated not for the whole structure, but only for the elements of reliability calculations selected according to the results of strength calculations. The developed code enables estimating the reliability of the whole structure and automatically selecting the elements for reliability calculations that excludes the human factor as a cause of overestimated reliability within the stress-strength model. Visualizing distribution of reliability measures for the designed structure contributes to the completeness of computational results.

Key words: reliability, stress-strength model, point-like evaluation of reliability, visualization.

Введение

На ранних стадиях разработки изделия, когда отсутствуют экспериментальные данные, расчет надежности в рамках прочностной модели проводится по результатам прочностных расчетов конструкции при внешних воздействиях, которые испытывает изделие в условиях эксплуатации и применения. При этом показатели надежности в рамках прочностной

модели, как правило, вычисляются не для всей конструкции, а только для «опасных» частей, которые выбираются человеком по результатам прочностного расчета и параметрам разброса механических свойств деталей конструкции. Такой подход может привести к переоценке надежности конструкции.

Помимо этого, в настоящее время не существует программных комплексов, позволяющих автоматизи-

зировано проводить оценку надежности в рамках прочностной модели и визуализировать ее результат.

Точечная оценка надежности, рассчитывается по формуле (1) [1].

$$\bar{R} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-U_R}^{U_R} e^{-t^2/2} dt \quad (1)$$

где U_R – квантиль нормированного нормального распределения (2).

$$U_R = \frac{k-1}{k \cdot \nu} \quad (2)$$

где ν – коэффициент вариации свойств материала; k – коэффициент запаса прочности, определяемый по формуле (3).

$$k = \frac{[\sigma]}{\sigma_{\max}} \quad (2)$$

где $[\sigma]$ – предел прочности (текучести) материала; σ_{\max} – максимальное эквивалентное напряжение, определенное в результате прочностного расчета.

Рассмотрим пример, в котором требуемый уровень надежности разрабатываемой конструкции составляет не менее 0,9999. По результатам прочностного расчета расчетчик-прочник может не передавать в отдел надежности информацию о тех составных частях разрабатываемой конструкции, коэффициент запаса прочности которых достаточно велик (например, $k \geq 2$). Однако составная часть конструкции с большим запасом прочности может быть не надежна из-за высокого коэффициента вариации свойств материала, а с малым – наоборот, будет иметь приемлемый уровень надежности за счет низкого коэффициента вариации, что в целом приводит к переоценке надежности всей конструкции (рис. 1).

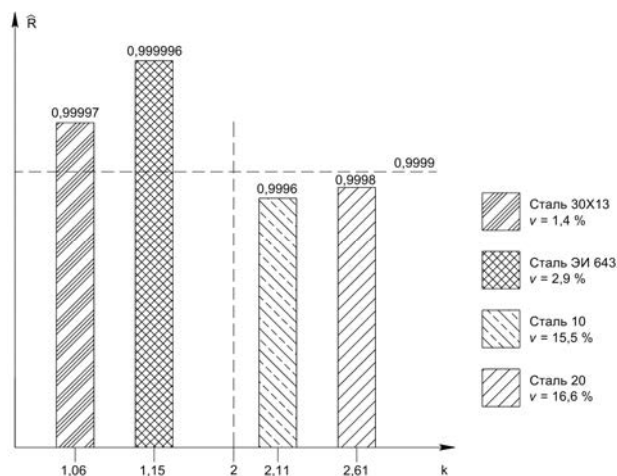


Рис. 1. Результаты оценки надежности примерной разрабатываемой конструкции

Для исключения ошибок из-за человеческого фактора была разработана расчетная программа «Point 9», интегрированная в программный комплекс на основе конечно-элементного анализа, которая позволяет проводить расчеты точечных оценок надежности конструкции в целом в рамках прочност-

ной модели, а также отображать результаты расчета на 2D или 3D моделях.

Описание программы

Программа «Point 9» создана в интегрированной среде разработки программных решений Matlab на высокоуровневом интерпретируемом языке программирования Matlab и выполняет расчет точечной оценки надежности в каждом элементе исследуемой конечно-элементной модели.

Программа «Point 9» интегрируется в программный комплекс на основе конечно-элементного анализа посредством макросов, программирование которых осуществлялось при помощи языка параметрического проектирования APDL. Интеграция заключается в предоставлении исходных данных для работы программы «Point 9» и визуализации результатов расчета.

Расчет точечной оценки надежности в программе «Point 9» проводится по формулам (1) – (3).

Исходными данными для программы «Point 9» является информация о свойствах материалов, используемых в рассматриваемом изделии (предел прочности или текучести, коэффициент вариации свойств материала) и результаты прочностного расчета рассматриваемого изделия (значение максимального эквивалентного напряжения в каждом элементе конечно-элементной модели).

При запуске программы «Point 9» на экране появляется окно главного меню (рис. 2), на котором отображена кнопка «Расчет». После нажатия данной кнопки начинается процесс загрузки исходных файлов, их обработки, расчета точечной оценки надежности в каждом элементе исследуемой конечно-элементной модели и формирования выходных файлов с результатами расчета, процесс которых отображается в окне прогресса в процентах (рис. 3).

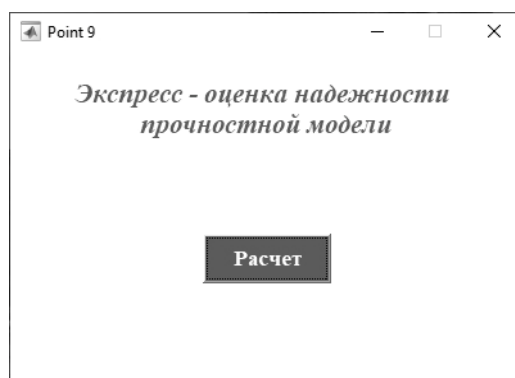


Рис. 2. Окно главного меню программы «Point 9»

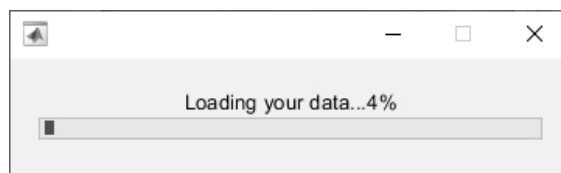


Рис. 3. Окно прогресса выполнения расчета

При запуске расчета программа «Point 9» в первую очередь проверяет наличие файлов с исходными данными, а при отсутствии одного или нескольких из них, сообщает каких конкретно файлов не хватает для запуска расчета (рис. 4).

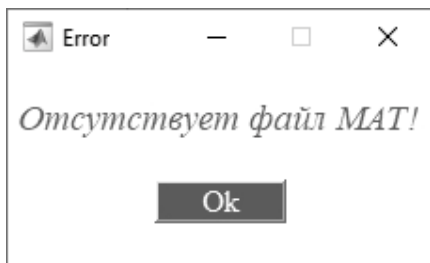


Рис. 4. Окно ошибки при отсутствии файла «MAT»

Программа «Point 9» сообщает об окончании расчета (рис. 5) и выдает результаты оценки надежности в двух файлах: «Information of safety» и «Visual», автоматически сохраняющихся в корневую папку программы.

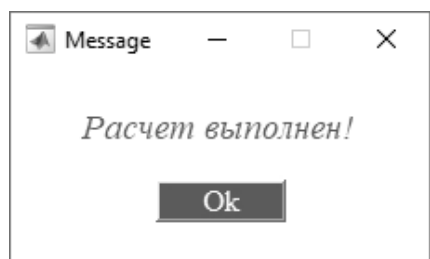


Рис. 5. Окно завершения расчета программы

В файле «Information of safety» приводятся минимальные значения точечной оценки надежности для каждого объема конечно-элементной модели рассматриваемого изделия.

Результаты точечной оценки надежности представляют собой числа, имеющие 15 знаков после запятой, однако для обеспечения такой степени точности затрачивается большое количество времени на выполнение расчета.

Для оптимизации времени проведения расчета в программе «Point 9» было введено следующее допущение: если элемент имеет значение U_R больше 6,6, то для него точечная оценка надежности не рассчитывается, а принимается равной 1. Данное допущение справедливо, так как при таком значении U_R точечная оценка надежности составляет 0,999999999978, а оценка надежности, рассчитанная по формуле (1) будет равна 0,99999999995, что в разы превышает любые возможные требования, предъявляемые к надежности реального изделия. Данное допущение позволяет сократить время расчета в программе «Point 9» на порядок.

Файл «Visual» является макросом для интеграции в программный комплекс на основе конечно-элементного анализа и визуализации в нем результатов расчета. Формирование данных в файле «Visual» происходит путем сравнения полученного значения

точечной оценки надежности каждого элемента конечно-элементной модели с величинами, представленными в таблице, и присваивания элементу определенного цвета.

В файле «Visual» используется функция присвоения цвета, которая позволяет отобразить результат в программном комплексе на основе конечно-элементного анализа без запуска на расчет, что значительно сокращает время визуализации.

Соответствие точечной оценки надежности присваиваемому цвету

Цвет отображения	Точечная оценка надежности
Темно-синий	0,99999 – 1
Светло-синий	0,99995 – 0,99999
Голубой	0,9999 – 0,99995
Зелено-голубой	0,9995 – 0,9999
Зеленый	0,999 – 0,9995
Желто-зеленый	0,995 – 0,999
Желтый	0,99 – 0,995
Оранжевый	0,9 – 0,99
Красный	Менее 0,9

Расчет тестовой модели

В программе «Point 9» был проведен расчет показателей надежности на тестовой модели, которая представляет собой лабораторную сборку для исследования механических свойств взрывчатых веществ (ВВ) в переходной области, предшествующей разрушению, состоящую из образца из взрывчатого вещества на основе октогена, вклеенного между двумя подложками из оргстекла (рис. 5) [2].

Тестовая модель лабораторной сборки состоит из 7488 узлов и 6120 элементов. Нагрузки, приложенные к модели, имитируют закрепление лабораторной сборки в цанговых захватах, один из которых расположен на подвижной траверсе (рис. 6).

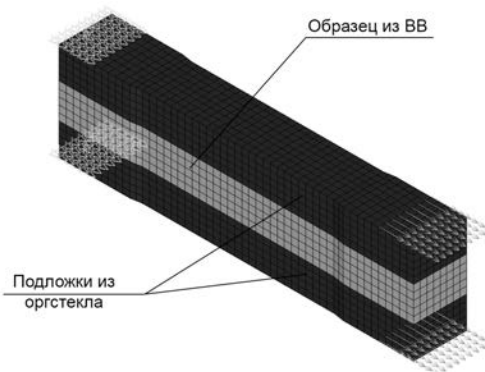


Рис. 6. Конечно-элементная модель лабораторной сборки

По результатам прочностного расчета было получено распределение максимальных растягивающих напряжений в образце из ВВ (рис. 7).

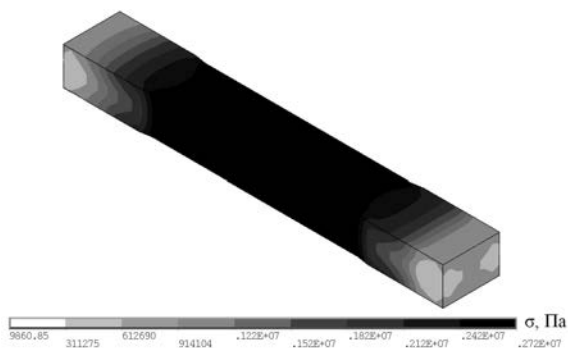


Рис. 7. Напряженно-деформированное состояние образца из ВВ на основе октогена

Визуализация результатов расчета надежности в программе «Point 9» (рис. 8) хорошо согласуется с результатами прочностного расчета, что показывает состоятельность разработанной программы.

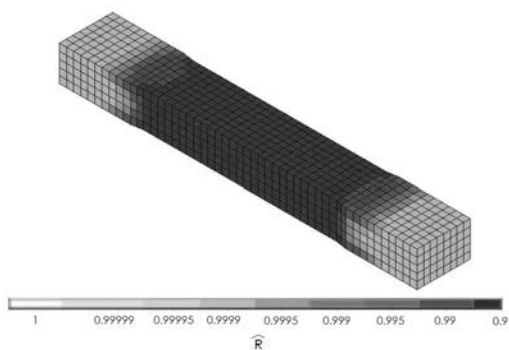


Рис. 8. Визуализация надежности образца из ВВ на основе октогена

Расчет измерительной головки

В программе «Point 9» был проведен расчет показателей надежности на полномасштабной модели измерительной головки, разработанной в РФЯЦ-ВНИИТФ.

Конечно-элементная модель измерительной головки состоит из 96950 узлов и 117953 элементов (см. рис. 9).

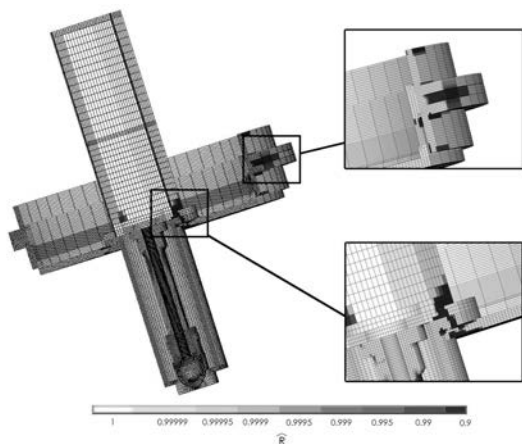


Рис. 9. Визуализация надежности измерительной головки

По результатам расчета в программе «Point 9» получена картина распределения условных точечных показателей надежности в каждом элементе модели измерительной головки (рис. 9), которая хорошо согласуется с картиной напряженно-деформированного состояния рассматриваемой конструкции по результатам расчета на вибропрочность (рис. 10).

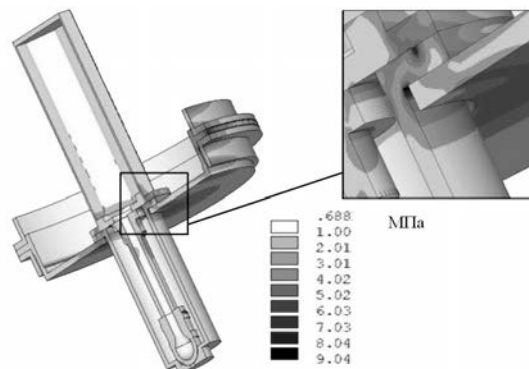


Рис. 10. Напряженно-деформированное состояние измерительной головки

Для более наглядного представления результатов расчета прочностные характеристики материалов конечно-элементной модели измерительной головки были уменьшены на несколько порядков, поэтому полученная точечная оценка надежности является условной.

Заключение

Результаты расчета в программе «Point 9» хорошо согласуются с результатами приведенных прочностных расчетов, что демонстрирует состоятельность данной разработки.

Расчет показателей надежности в программе «Point 9» снижает время проведения оценок надежности изделий, исключает человеческий фактор, как причину переоценки надежности в рамках прочностной модели, и позволяет осуществлять визуализацию результатов расчета надежности в рамках прочностной модели для отображения «слабых мест» элементов конструкции, определяющих ее надежность.

Список литературы

- ГОСТ 27.301-95 «Арматура трубопроводная. Расчет и оценка надежности и безопасности на этапе проектирования».
- Старцев А. В., Ильин П. Е., Ковалева В. А., Дергачёв И. С. Исследование физико-механических свойств взрывчатого вещества на основе октогена при статических испытаниях на растяжение / XI Всероссийская конференция по испытаниям и исследованиям свойств материалов «ТестМат» по тематике «Физико-механические испытания, прочность, надежность, высокотемпературные испытания» // Материалы Всероссийской конференции. М.: ВИАМ, 2019. С. 153–165.