



Богатырь С.М., [Галанин М.П.](#),
[Горбунов-Посадов М.М.](#),
Гусев А.С., Еременко А.С.,
[Ермаков А.В.](#), Кузнецов В.И.,
[Лукин В.В.](#), Новиков В.В.,
[Родин А.С.](#), Салатов А.В.,
Сыпченко М.В., Фальков А.А.,
[Шаповалов К.Л.](#)

Комплекс программ CaPpaPI
для проведения
вероятностных расчетов
термомеханики
тепловыделяющих
элементов

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Комплекс программ CaPpaPI для проведения вероятностных расчетов термомеханики тепловыделяющих элементов / С.М.Богатырь [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2012. № 55. 39 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-55>

О р д е н а Л е н и н а
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В. Келдыша
Р о с с и й с к о й а к а д е м и и н а у к

С.М. Богатырь, М.П. Галанин, М.М. Горбунов-Посадов,
А.С. Гусев, А.С. Еременко, А.В. Ермаков, В.И. Кузнецов,
В.В. Лукин, В.В. Новиков, А.С. Родин,
А.В. Салатов, М.В. Сыпченко, А.А. Фальков, К.Л. Шаповалов

Комплекс программ CaPpaPI
для проведения вероятностных
расчетов термомеханики
тепловыделяющих элементов

Москва — 2012

С.М. Богатырь, М.П. Галанин, М.М. Горбунов-Посадов, А.С. Гусев, А.С. Еременко, А.В. Ермаков, В.И. Кузнецов, В.В. Лукин, В.В. Новиков, А.С. Родин, А.В. Салатов, М.В. Сыпченко, А.А. Фальков, К.Л. Шаповалов

Комплекс программ CaPpaPI для проведения вероятностных расчетов термомеханики тепловыделяющих элементов.

Разработан программный код (комплекс) CaPpaPI (Complex of Programs for Probability Investigations), реализующий алгоритм вероятностных расчетов поведения твэла на основе метода Монте-Карло с использованием кодов START-3 и RAPTA-5.2 и теплогидравлических условий, рассчитываемых кодом RELAP/SCDAPSIM. Описана архитектура разработанного кода. Представлены описание реализации многовариантного расчета решения задачи и графический интерфейс. Приведены результаты работы кода. Учитываются неопределенности входных параметров, погрешности эмпирических корреляций и погрешности расчетных моделей.

Код ВР позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров твэлов в авариях типа LOCA, например, максимальной температуры оболочки, максимальной эквивалентной степени окисления оболочки и др. с оценками их неопределенностей в виде границ доверительного интервала с заданным уровнем доверия.

Ключевые слова: твэл, метод BEPU, неопределенность параметров, метод Монте-Карло, формула Wilks, авария LOCA, ключевой параметр, доверительный интервал, уровень доверия, коды, интерфейсные данные, функции распределения.

S.M. Bogatyr, M.P. Galanin, M.M. Gorbunov-Possadov, A.S. Gusev, A.S. Eremenko, A.V. Yermakov, V.I. Kuznetsov, V.V. Lukin, V.V. Novikov, A.S. Rodin, A.V. Salatov, M.V. Sypchenko, A.A. Falkov, K.L. Shapovalov

Software CaPpaPI for probability calculations for thermomechanics of fuel rods.

There was developed the software CaPpaPI (Complex of Programs for Probability Investigations) for probabilistic calculations that implements the algorithm of probability calculations of fuel rods on the base of Monte-Carlo method using codes START-3 and RAPTA-5.2 and thermo-hydraulic conditions calculated by RELAP/SCDAPSIM code. The architecture of the developed code is presented. The implementation of multi-variant calculation for problem solution and graphical interface are described. The results of the software usage are shown. The algorithm takes into account the uncertainty of input parameters, errors of the empirical correlations and errors of the calculation models.

The software allows to get a realistic assessments of the major criteria for fuel rod parameters in the accidents of LOCA type, for example, the peak cladding temperature and the equivalent cladding reacted etc. with estimates of their uncertainties as borders of a confidence interval with a specified safety level.

Key words: fuel rods, BEPU method, the uncertainty of parameters, the method of Monte Carlo, Wilks formula, LOCA, a key parameter, the confidence interval, the safety level, software, interface data, distribution functions

Введение и постановка задачи

Одними из наиболее ответственных результатов математического и численного моделирования явлений и процессов являются критериальные, которые призваны дать ответ на вопрос о попадании некоторых выходных параметров математической модели в заданные множества. Часто такие вопросы возникают в связи с проблемами безопасности. Типичный и очевидный (по применимости к нему данных вопросов) пример, который и рассматривается в работе,— атомная энергетика[1-7].

Рассмотрим следующую ситуацию (рис. 0.1). Пусть имеется m входных величин $p_1, p_2, \dots, p_m$, называемых далее параметрами, по которым некоторая математическая (чаще всего вычислительная) модель определяет n выходных параметров $y_1, y_2, \dots, y_n$: $y = A p$, где A — некоторый оператор. Будем считать выходные параметры критериальными, остальные выходные результаты рассматривать не будем.

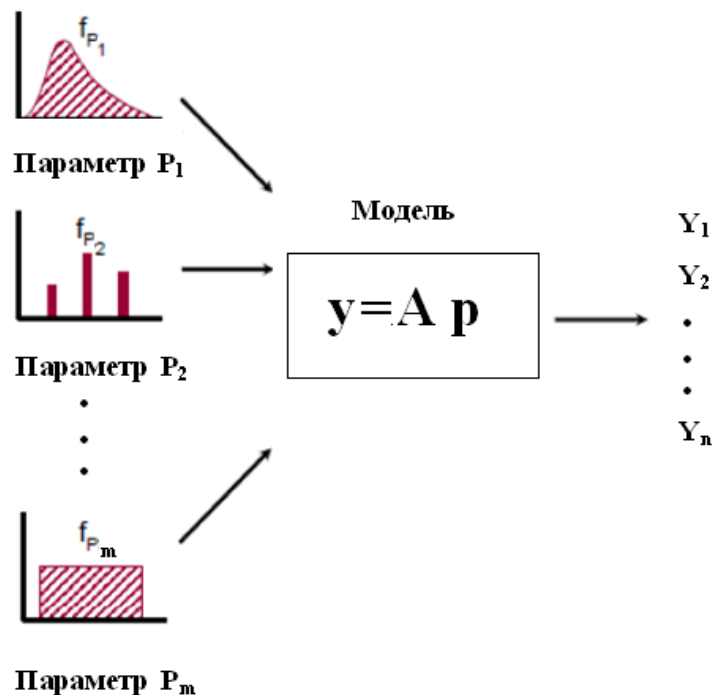


Рис. 0.1. Модель объекта как «черный ящик»

Хорошо известно (см., например, [8]), что результат моделирования содержит ошибку, определяемую неточностью входных данных, неточностью модели, неточностью алгоритма и неточностью вычислений. Допустим, что три последние составляющие результирующей ошибки либо пренебрежимо малы, либо находятся под жестким контролем и известны. При несколько расширительном толковании в качестве входных могут рассматриваться и параметры, управляющие точностью расчетов, например, параметры дискретизации. Тогда основным источником неопределенности выходных данных является неопределенность входных параметров. Чаще всего она носит случайный характер. Далее будем считать, что законы распределения случайных величин, поступающих на вход системы математического моделирования, известны. Однако сложность системы такова, что найти законы распределения выходных величин невозможно даже при известных законах распределения входных параметров. В результате выходные величины приходится считать случайными с неиз-

вестными законами распределения. Чаще всего между собой выходные величины являются зависимыми. Ситуацию иллюстрирует рис. 0.1.

Целью данной работы является создание компьютерной системы для проведения критериальных расчетов термомеханики тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ). При этом система должна обеспечивать возможность варьирования по заданным вероятностным законам входных параметров, изменять количество выходных параметров и в удобной форме представлять полученные результаты.

В качестве математической модели, находящейся в центре системы, используются коды START-3 [9], RAPTA-5.2 [10], RELAP/SCDAPSIM (далее — RELAP) [11], каждый из которых рассчитывает свою часть задачи. Разработанная методика вероятностных расчетов реализована в виде программного кода CaPpaPI (Complex of Programs for Probability Investigations), объединяющего имеющиеся коды в единый программный код (комплекс).

Разработанная вероятностная методика должна позволить снизить консерватизм определения критериальных параметров ТВЭЛОВ в аварии LOCA и увеличить их запасы до предельных значений.

В соответствии с современными требованиями нормативных документов [1, 12] и сложившейся практикой обоснований проектов должно быть показано, что критерии безопасности выполняются для наиболее горячего ТВЭЛА с вероятностью не менее 95% при уровне доверия 95%.

В работе отражены материалы литературных данных по использованию вероятностных методик в расчетах выходных параметров аварии LOCA. Представлена блок-схема выполнения ВР. Описана программная реализация общей блок-схемы решения задачи в виде программного кода (комплекса). Для него выполнен тестовый вероятностный расчет с учетом наиболее значимых параметров. Реализован многовариантный расчет решения задачи. Код оснащен разработанным графическим интерфейсом для представления полученных результатов ВР.

Комплекс включает программные коды START-3 и RAPTA-5.2 и интерфейсные данные кода RELAP. В коде реализована возможность выбора коммуникативных схем связей между START-3, RAPTA-5.2, RELAP и, соответственно, выбора структуры итерационного цикла для последовательного уточнения входных и промежуточных данных, получаемых из перечисленных программ.

Разработанный программный код (комплекс) соответствует процедуре GRS [7] и позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров ТВЭЛОВ, в частности, для условий LOCA, PCT — максимальной температуры оболочки, ECR — максимальной эквивалентной степени окисления оболочки, с оценкой их неопределенностей в виде доверительного интервала и квантиля.

В работе использованы следующие аббревиатуры и термины.

Детерминистский расчет — расчет с заданными входными данными.

ВР — вероятностный расчет, расчет со случайными входными данными.

Консервативный подход — подход к моделированию на основе только детерминистских расчетов, при котором для параметров и характеристик принимаются значения и пределы, заведомо приводящие к более неблагоприятным результатам.

Поверхность отклика — результат эмпирического изучения соотношений между выходными параметрами и группой входных переменных.

LOCA — Loss Of Coolant Accident — авария с потерей теплоносителя.

LBLOCA, SBLOCA — Large Break LOCA, Small Break LOCA — авария LOCA с большим или малым разрывом.

BE — Best Estimate — наилучшая оценка. Обычно используется как синоним слов «реалистичная оценка». Является результатом анализа событий в отсутствие предвзятого пессимизма при избранном критерии приемлемости номинальными входными данными.

BEPU — BE Plus Uncertainty — наилучшая оценка плюс неопределенность.

PIRTs — Phenomenon Identification and Ranking Tables — таблицы идентификации и ранжирования явлений.

PCT — Peak Cladding Temperature — максимальная температура оболочки.

ECR — Equivalent Cladding Reacted — эквивалентная степень окисления оболочки.

Расчетные коды — программные коды START-3, RAPTA-5.2и RELAP, осуществляющие математическое моделирование и расчет параметров твэла, а также необходимых для этого теплогидравлических граничных условий. Вычисления в рамках каждого расчетного кода производятся по детерминистической модели на основе *входных параметров* и с выводом *выходных параметров* конструкции.

Расчет — однократный запуск одного из расчетных кодов или их конфигурации с номинальными или смоделированными случайными значениями входных параметров.

Серия вероятностных расчетов (BP) — совокупность расчетов, выполненная с использованием смоделированных наборов случайных значений входных параметров. Моделирование наборов входных параметров производится на основании предварительно заданных параметров распределения соответствующих случайных величин. Число испытаний в серии определяется на основании предварительно установленных квантиля распределения критериального параметра и уровня доверия подтверждения гипотезы.

Программный комплекс BP — программный комплекс, осуществляющий подготовку, проведение и анализ результатов вероятностных испытаний математических моделей работы твэла, сборки или реактора в целом в различных эксплуатационных режимах путем проведения серии экспериментов с использованием расчетных кодов.

Контролируемые параметры — предварительно определенный набор выходных параметров расчетных кодов, оценка и анализ которых может осуществляться в рамках программного комплекса BP.

Критериальные параметры — предварительно определенный набор контролируемых параметров, для которых в рамках данной серии вероятностных испытаний проверяется предварительно заданный критерий вида $U < U_{max}$ (верхний критерий) или $U > U_{min}$ (нижний критерий). Верхние и нижние критерии при определении числа испытаний в серии BP учитываются отдельно.

В случае если выходные параметры в рамках применяемой вероятностной методики удовлетворяют критерию, то критерий считается *подтвержденным*, в противном случае — *проваленным*.

Работа выполнена при финансовой поддержке топливной компании "ТВЭЛ" (Госкорпорация "Росатом").

Авторы благодарны А.В. Плеханову за сотрудничество в выполнении данной работы.

1. Краткий обзор вероятностных методик

В последние годы возрастает интерес к разработке программных комплексов, обеспечивающих численный анализ безопасности реакторных установок АЭС. При этом акцент смещается с детерминистского консервативного подхода к так называемому BEPU-подходу. Например, theUSACodeofFederalRegulation (CFR) [1] позволяет использовать для этих целей или программу с наилучшей оценкой неопределенности и численную оценку неопределенности, или консервативную вычислительную программу. Но консервативный подход дает большое рассогласование между рассчитанными значениями параметра и «истинным» его значением.

Понятие «наилучшая оценка» относится к программному комплексу, моделирующему работу объекта. Анализ неопределенности включает идентификацию и численную оценку важнейших неопределенных параметров вместе с методологией количественного определения их влияния на выходные параметры объекта.

Пионерской методикой оценки неопределенности является методика CSAU (Code Scaling, Applicability and Uncertainty), подробное описание которой приведено в [2]. Развитием CSAU является методика EMDAP (Evaluation Model Development & Assessment). Методики успешно применены для анализа LBLOCA и SBLOCA [3-5].

С 2005 года USNRC (USA Nuclear Regulatory Commission) рекомендовала для анализа постулируемых аварий типа LOCA и non-LOCA применять программы наилучшей оценки плюс анализ неопределенности (BEPU методология).

В литературе упоминаются несколько вероятностных методов оценки неопределенностей: CSAU, GRS, IPSN, ENUSA, GSUAM и BEAU [6].

Вероятностные методы имеют особенности в реализации следующих этапов: (а) идентификации объекта, программы расчета и типа анализируемого переходного режима; (б) идентификации неопределенностей начальных и граничных условий, параметров топлива, моделирования; (в) ограничения числа входных неопределенностей, включенных в расчет.

Выбор входных неопределенностей ранжируется по их вкладу в неопределенность выходных параметров (или выбранного критерия), используя результаты анализа экспериментов, выполненных на так называемых установках по исследованию отдельных эффектов (в американской терминологии SETF — Separate Effects Test Facility). Уровень знаний каждой неопределенности входного параметра внутри ее области значений выражается распределением вероятности.

Одним из основных шагов CSAU методологии является т.н. PIRTs. На этом шаге идентифицируются явления и процессы, производится их ранжирование по степени воздействия на критерий безопасности и формируется перечень учитываемых неопределенностей.

GRS метод разработан в рамках CSAU подхода [7]. Он использует формулу Wilks [13, 14] для определения необходимого количества расчетов и до настоящего времени является наиболее используемым на практике. При его применении выполняются следующие шаги:

- идентифицируются относящиеся к неопределенности входные параметры,
- определяются диапазоны и законы вероятностных распределений параметров,
- необходимое количество расчетов N определяется из требований к оценке допуска и доверительному интервалу для выбранного параметра [13, 14],

- генерируются N выборок векторов случайных параметров из этих распределений,
- выполняется N расчетов по модели объекта с этими векторами входных параметров,
- получают количественные предписания на выходные неопределенности (интервал допустимых пределов),
- проводят численное исследование чувствительности по N результатам (ранжированные (Spearman's) или простые (Пирсон) коэффициенты корреляции).

Метод GRS не имеет ограничений по количеству рассматриваемых неопределенных параметров. Рассчитанная неопределенность имеет хорошо обоснованную статистическую базу [7, 14, 15]. При этом не используются поверхности отклика.

Метод IPSN [16] разработки Institut de Protection et de Sûreté Nucléaire (Франция) базово аналогичен методу GRS. Отличие в том, что рассматриваются только неопределенности, возникающие от определяющих уравнений модели программы.

Метод ENUSA развивает Empresa Nacional del Uranio (Испания). Базово и тот же самый, что и GRS. Идеология метода находится в рамках CSAU. Как и в методе GRS, для нахождения требуемого числа расчетов по пакету программ используется формула Wilks и не используются поверхности отклика. Однако за счет прохождения PIRTs процесса количество рассматриваемых неопределенностей входных параметров ограничивается 26.

Метод GSUAM разработан фирмой Сименс. Метод использовался для поддержки процесса лицензирования объекта Anga [17].

Метод GSUAM включает все особенности методов, разработанных в рамках подхода CSAU. Он позволяет оценить точечные значения выбранного параметра, такого как, например, PCT, но не позволяет получить оценку неопределенности того же параметра как функции времени. Идентифицируются три основных вклада в неопределенность выбранного критерия: пакет программ для расчета, условия объекта и параметры топлива. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало, что пакет программ вносит наибольший вклад в общую неопределенность.

Метод BEAU разработан и применяется в Канаде [18, 19]. Методика применяется для исследования первого импульса мощности LBLOCA в реакторе CANDU, который имеет положительный пустотный коэффициент реактивности. Подход BEAU находится в рамках CSAU методологии и очень похож на него. Используется процесс PIRTs и применяются поверхности отклика.

В настоящее время отсутствуют критерии, позволяющие убедительно и в полном объеме сравнить достоверность и точность процесса оценки неопределенности по той или иной методике. Выбор зависит от многих субъективных факторов.

В данной работе использован GRS метод, основными преимуществами которого являются: широкое использование метода и его модификаций в практике оценки неопределенностей; отсутствие ограничений по количеству рассматриваемых неопределенных параметров; рассчитанная неопределенность выходных параметров имеет хорошо обоснованную статистическую базу; не используются поверхности откликов.

Последовательность выполнения расчетов соответствует схеме рис. 0.1.

Таким образом, разработка вероятностной методики разбивается на три блока: 1) моделирование последовательности выборок случайных параметров с заданными функциями распределений, 2) моделирование работы объекта, 3) анализ результатов расчетов.

2. Методика вероятностных расчетов

Главными из действий при реализации метода GRS [7] являются определение выходных параметров (и их числа), для которых требуется установить границы изменения, определение числа независимых запусков программы для набора необходимой статистики, проведение вычислительного эксперимента и его обработка. При этом каждый запуск программы соответствует своему набору независимых входных параметров, что отвечает общей идеологии метода Монте-Карло [20 - 22]. Программа рассматривается как черный ящик (см. рис. 0.1).

Для определения необходимого количества запусков программы используется формула типа формулы Wilks [13, 14, 23]. Опишем ее подробнее.

Пусть β — confidence level — доверительный уровень, γ — quantile — квантиль.

Необходимо [14, р. 42] определить такие случайные границы $(L_i, U_i), i = 1...n$ изменения n выходных параметров $(y_1, ..y_n)$, что вероятность P того, что вероятность попадания выходных параметров в определяемые этими интервалами границы будет больше γ , равна β , т.е

$$P \left\{ \int_{L_1}^{U_1} \dots \int_{L_n}^{U_n} g(y_1, \dots, y_n) dy_1 \dots dy_n > \gamma \right\} = \beta. \quad (2.1)$$

Здесь случайные величины $(L_i, U_i), i = 1...n$ — нижняя и верхняя границы изменения соответствующего параметра. Одна из них (или обе в тривиальном для параметра случае) может быть равна бесконечности с некоторым знаком. Это означает, что соответствующая граница не представляет интереса. В случае конечности обеих величин они разыскиваются обе.

Рис. 2.1 иллюстрирует рассматриваемую задачу для случая $n = 1$.

Функция $g(y_1, \dots, y_n)$ является плотностью распределения выходных параметров и считается неизвестной. Выходные параметры являются зависимыми, при этом зависимость считается неизвестной.

Задачей вероятностного расчета является определение границ изменения выходных параметров $(L_i, U_i), i = 1...n$ с помощью проведения серии из N независимых случайных испытаний. В этом случае говорят об уровне надежности $(\beta|\gamma)$ (safety level) полученной оценки.

Ответ на поставленный вопрос дает следующая формула [14, р.42]:

$$\beta = 1 - I(\gamma, s_n - r_n, N - s_n + r_n + 1) = \sum_{j=0}^{s_n - r_n - 1} C_N^j \gamma^j (1 - \gamma)^{N-j}, \quad (2.2)$$

где $I(c, j, k)$ — регуляризованная неполная β -функция [14, р.р. 27, 42].

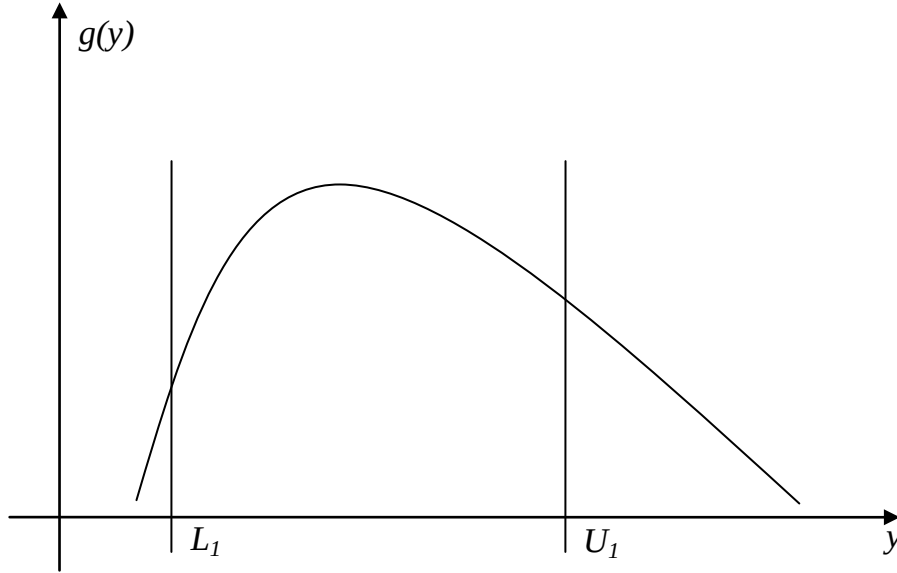


Рис. 2.1. Плотность распределения значений выходного параметра

Тогда

$$(L_j = y_j(r_j), U_j = y_j(s_j)), j = 1 \dots n, \quad (2.3)$$

$$s_n \leq s_{n-1} - r_{n-1} - 1 \leq s_1 - \sum_{j=1}^{n-1} (r_j + 1), r_n \geq r_{n-1} \geq \dots \geq r_1.$$

Формулы (2.2), (2.3) дают общий ответ и в случае, когда часть результатов случайных испытаний отбраковывается.

В частных случаях расчетные формулы упрощаются.

Например, для двусторонней оценки без отбраковки результатов

$$\beta = 1 - I(\gamma, N - 2n + 1, 2n) = \sum_{j=0}^{N-2n} C_N^j \gamma^j (1 - \gamma)^{N-j}, \quad (2.4)$$

$$s_n = N - 2(n - 1), s_{n-1} = s_n + 2, \dots, s_1 = N, r_n = r_{n-1} = \dots = r_1 = 1.$$

Для случая односторонней (верхней, т.е. $L_j = -\infty, j = 1, \dots, n$) оценки без отбраковки результатов имеем

$$\begin{aligned} \beta &= 1 - I(\gamma, N - n + 1, n) = \sum_{j=0}^{N-n} C_N^j \gamma^j (1 - \gamma)^{N-j} = \\ &= 1 - \sum_{j=N-n+1}^N C_N^j \gamma^j (1 - \gamma)^{N-j}, \end{aligned} \quad (2.5)$$

$$s_n = N - n + 1, s_{n-1} = s_n + 1, \dots, s_1 = N, r_n = r_{n-1} = \dots = r_1 = 0.$$

В этих формулах $C_N^j = \frac{N!}{j!(N-j)!}$ — число сочетаний из N элементов по j —

комбинаторная характеристика.

Формулы (2.5) употребительны и для случая двусторонней оценки, но при этом выходной параметр, для которого требуется двусторонняя оценка, необходимо «раздвоить», т.е. создать еще один формально новый выходной параметр противоположного знака. Его верхняя оценка будет давать (со знаком минус) нижнюю оценку исходного параметра. При этой процедуре число оцениваемых параметров возрастает на единицу. Именно это видно и из сравнения (2.4) и (2.5).

Таким образом, основной используемой формулой для определения числа испытаний без отбраковки является (2.5). Именно она положена в основу разработанного программного комплекса.

Приведем краткое описание алгоритма [14] нахождения односторонних верхних границ в случае двух $n = 2$ выходных параметров. Для этого при заданном уровне надежности $(\beta|\gamma)$ из (2.5) находится число N независимых случайных испытаний и совершается соответствующее количество запусков программы. В результате получается N независимых случайных двумерных векторов (y_1, y_2) . Упорядочим их по возрастанию первого компонента вектора и примем $U_1 = y_1(s_1) = y_1(N)$. После этого рассмотрим только вторые компоненты без $y_2(N)$ и выберем в них максимальный элемент, который примем за $U_2 = y_2(s_2) = y_2(N-1)$. Для большего числа параметров дальнейшее рассмотрение аналогично.

В разработанном программном комплексе реализован алгоритм определения необходимого числа испытаний N для заданного числа выходных параметров (с учетом возможного увеличения этого числа вследствие необходимости нахождения двусторонней оценки) n и заданного уровня надежности $(\beta|\gamma)$ при заданных доверительном уровне и квантиле.

Нахождение неизвестного числа испытаний реализовано с помощью метода Ньютона [8]. Как известно, успех применения этого метода сильно зависит от выбора начального приближения для корня. Наилучшим оказался следующий алгоритм: нахождение соответствующего N_1 с единичного начального приближения для одного параметра, потом для двух с использованием N_1 в качестве начального приближения и так далее до необходимого числа параметров. Расчеты ведутся для заданных $(\beta|\gamma)$.

Каждый запуск программы соответствует своему набору независимых входных параметров, что отвечает общей идеологии метода Монте-Карло [20 - 22]. Для выполнения расчета необходимо создать свой набор независимых входных параметров в соответствии с постановкой задачи. При этом каждый из параметров может иметь свой собственный закон распределения.

Основой алгоритма генерации случайных входных параметров является генерация равномерно распределенных на участке $(0,1)$ случайных величин. Пусть далее на протяжении данного параграфа α — такая случайная величина. Ее функция распределения имеет вид

$$F_{\alpha}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0, \\ x, & x \in (0,1), \\ 1, & x \geq 1. \end{cases} \quad (2.6)$$

Если в распоряжении пользователя имеется набор равномерно распределенных на участке $(0,1)$ случайных величин α , то случайная величина ξ , имеющая функцию распределения $F_{\xi}(x)$, может быть определена следующим образом [20 - 22]:

$$\xi = F_{\xi}^{-1}(\alpha). \quad (2.7)$$

В данном выражении справа стоит функция, обратная к $F_{\xi}(x)$.

Таким образом, задача генерации случайных величин с заданным законом распределения сводится к задаче генерации равномерно распределенных случайных величин.

В программе реализован алгоритм RAN2 [24], дающий последовательность псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на единичном отрезке и имеющих период повторения не хуже $2.3 \cdot 10^{18}$ (см. по этому поводу также [25]). При необходимости может быть реализован так называемый «вихрь Мерсенна» [26], имеющий период $2^{19937}-1$.

Приведем в качестве примера ряд распределений случайных величин, реализованных в программе проведения вероятностных расчетов.

1. $N(\mu, \sigma^2, a, b)$ — нормальный закон распределения со «средним» μ и «дисперсией» σ^2 на участке (a, b) .

Функция распределения такой величины имеет вид

$$F_{\xi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ C(\Phi(\frac{x-\mu}{\sqrt{2}\sigma}) - \Phi(\frac{a-\mu}{\sqrt{2}\sigma})), & x \in (a, b), \\ 1, & x \geq b. \end{cases} \quad (2.8)$$

Здесь $\Phi(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-\beta^2} d\beta$ — интеграл ошибок [27], нормирующий множитель

$$C = \frac{1}{\Phi(\frac{b-\mu}{\sqrt{2}\sigma}) - \Phi(\frac{a-\mu}{\sqrt{2}\sigma})}.$$

Выписанные формулы справедливы и в случае, когда одна из границ (или обе) равна бесконечности некоторого знака.

«Среднее» μ для данного распределения является настоящим средним (т.е. математическим ожиданием), а дисперсия совпадает с «дисперсией» σ^2 , при условии $2\mu = a + b$.

Формула (2.7) для данного распределения имеет следующий вид

$$\xi = \mu + \sqrt{2}\sigma\Phi^{-1}\left(\frac{\alpha}{C} + \Phi\left(\frac{a-\mu}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right), \quad (2.9)$$

где в правой части фигурирует обратная к интегралу ошибок функция.

2. Экспоненциальное распределение с параметром λ на участке (a, b) .

Функция распределения такой величины имеет вид

$$F_{\xi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ C(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda x}), & x \in (a, b), \\ 1, & x \geq b. \end{cases} \quad (2.10)$$

Фигурирующий здесь нормирующий множитель равен

$$C = \frac{1}{(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})}.$$

Данные формулы остаются справедливыми и в стандартном варианте, в котором $a = 0, b = +\infty$. Только в последнем случае математическое ожидание и дисперсия стандартным образом выражаются через параметр λ .

Формула (2.7) для данного распределения имеет следующий конкретный вид

$$\xi = -\frac{1}{\lambda} \ln(e^{-\lambda a} - \alpha(e^{-\lambda a} - e^{-\lambda b})). \quad (2.11)$$

3. Равномерное распределение на участке (a, b) .

Формулы для функции распределения и пересчета от равномерно распределенной на $(0, 1)$ величины α имеют следующий вид.

$$F_{\xi}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a, \\ \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b), \\ 1, & x \geq b. \end{cases} \quad (2.12)$$

$$\xi = a + (b-a)\alpha. \quad (2.13)$$

3. Структура кода CaPraPI

Расчет термомеханики ТВЭЛ выполняется путем последовательного выполнения трех различных программ (см. рис. 3.1; связи входного модуля IN на нем не показаны, чтобы не перегружать рисунок), обмен данными между которыми осуществляется на уровне файлов. Программа START-3 проводит термомеханический расчет ТВЭЛ (или их группы) в случае моделирования режима нормальной эксплуатации или готовит данные для расчета аварии типа LOCA с помощью кода RAPTA-5.2. Программа RELAP проводит серию теплогидравлических расчетов, в ходе которых определяются внешние условия на границах ТВЭЛов и их неопределенности. Возможны многочисленные варианты связи отдельных кодов, включая их итерационное взаимодействие. Помимо общего расчета каждый из кодов может решать свою задачу, представляющую самостоятельный интерес. Разрабатываемый программный комплекс должен давать возможность проводить ВР для различных комбинаций описываемых программ.

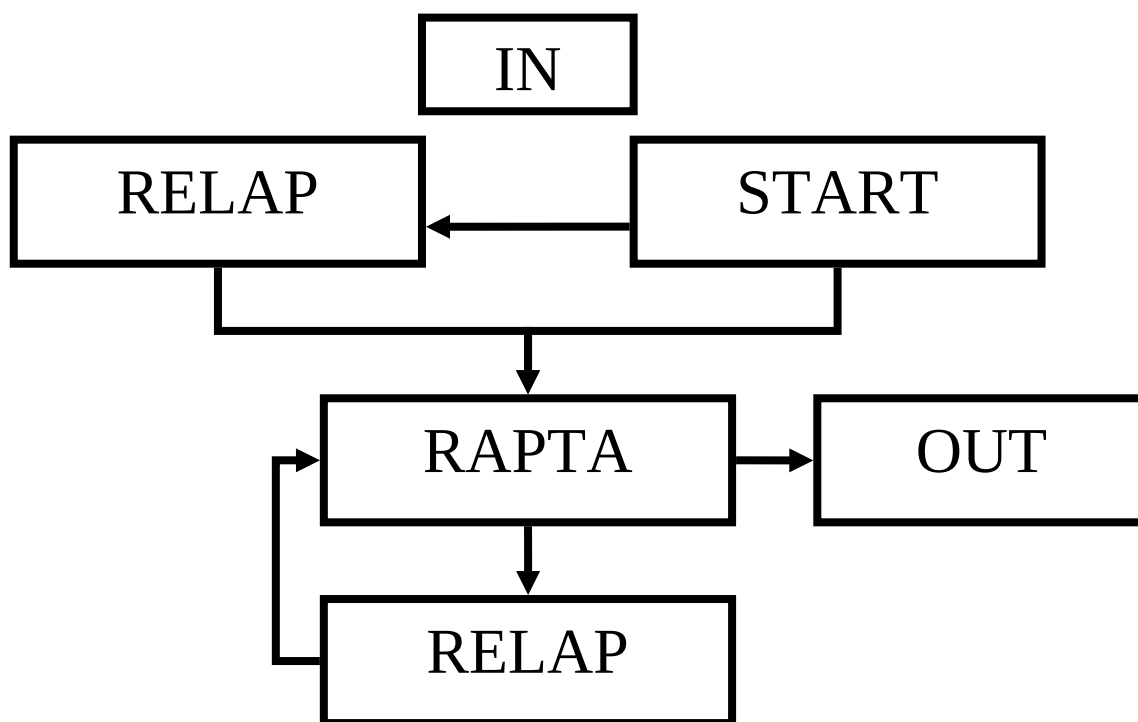


Рис. 3.1. Взаимосвязи расчетных кодов в комплексе CaPrAPI

В частности, для START-3 возможно варьирование группы входных данных, которые можно разделить на 2 подгруппы: технологические параметры и модельные.

Технологические параметры твэлов для START-3 таковы: внешний и внутренний радиусы оболочки, радиус таблетки, плотность топлива, доспекаемость топлива, давление газа под оболочкой, длина газосборника, открытая пористость.

Модельными параметрами START-3 являются коэффициенты для зависимостей: теплопроводности топлива, термического расширения топлива, теплопроводности оксида, теплопроводности оболочки, теплопроводности газа, газовыделения, скорости коррозии оболочки, распухания топлива, ползучести оболочки, модуля Юнга оболочки, радиационного роста оболочки, термического расширения оболочки, линейной мощности твэла. Также варьируется величина нейтронного потока.

Учитывается неопределенность результатов кода RELAP на основе результатов валидации кода на экспериментальных данных, также по коду RELAP проводятся расчеты для оценки влияния неопределенности мощности твэла. Серия результатов кода RELAP используется в дальнейшем анализе как интерфейсные данные.

Код RAPTA-5.2 при запуске считывает данные, полученные на выходе из программы START-3. Кроме того, у RAPTA-5.2 есть свои входные параметры, которые также могут варьироваться. К варьируемым данным относятся коэффициенты для напряжения течения сплава Э110, кинетики высокотемпературного окисления оболочки, граничных условий и задания мощности.

В ряде тестовых расчетов для простоты предполагается, что все указанные параметры имеют усеченное нормальное распределение.

При запуске объединенного кода START-3 – RAPTA-5.2 варьируется некоторая комбинация описанных выше входных переменных.

При проведении вероятностных расчетов (BP) только для кода START-3 или для объединенного кода START-3 – RAPTA-5.2 можно получать информацию о выходных параметрах каждого из используемых кодов.

Приведем, например, расширенный перечень контролируемых выходных параметров кода START-3: линейная мощность, выгорание в сечении, флюенс, толщина оксидной пленки, давление газа под оболочкой, окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки, температура наружной поверхности оболочки, температура оболочки на внутренней поверхности, температура топлива на наружной поверхности, температура в центре топлива, радиальный зазор между топливом и оболочкой, контактное давление между топливом и оболочкой, среднеобъемная температура топлива, глубина трещины в оболочке, газовыделение по твэлу, среднее выгорание, содержание Xe+Kг в газовой смеси, объем газа под оболочкой твэла в нормальных условиях, осевая деформация твэла в данном аксиальном сечении, изменение диаметра твэла.

В тестовых расчетах (см. параграф 5) критериальными выбраны следующие выходные параметры кода START-3: давление газа под оболочкой и окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки.

При проведении ВР для объединенного кода START-3 – RAPTA-5.2 контролируемыми являются следующие выходные параметры кода RAPTA-5.2: максимальная температура топлива, среднерадиальная энтальпия топлива, максимальная температура оболочки, эквивалентная степень окисления, доля прореагировавшего циркония.

Программный комплекс ВР, реализующий методику вероятностных испытаний кодов START-3, RAPTA-5.2 и RELAP, включает в себя несколько графических и консольных утилит, позволяющих производить подготовку данных для серии вероятностных испытаний, запуск и отслеживание работы расчетных программ, а также предоставляет средства обработки и анализа получаемых результатов. Комплекс состоит из следующих 3 основных утилит и 1 библиотеки.

1. Atom.exe — графическая оболочка Планировщика расчета. В рамках утилиты происходит задание данных о варьируемых технологических и модельных параметрах расчетов по кодам START-3, RAPTA-5.2 и RELAP. Утилита позволяет задать число, тип и значения критериальных параметров для серии испытаний, а также уровень доверия и квантиль распределения, по которым будет оцениваться соответствие получаемых данных выдвинутым критериям.
2. CalculationsOrganizer.exe — утилита, осуществляющая подготовку, запуск и отслеживание прохождения серии вероятностных испытаний заданной конфигурации расчетных кодов и проводящая первичную постобработку получаемых данных и их анализ на предмет удовлетворения критериям.
3. ResultViewer.exe — графическая утилита (постобработчик), позволяющая производить построение графиков контролируемых параметров, а также представляющая в визуальной форме результаты испытаний и проверки критериев.
4. Monte_karlo.dll — динамическая библиотека, позволяющая производить расчет параметров вероятностного расчета, а также моделировать случайные величины по заданным распределениям.

Единство обрабатываемых данных обеспечивается использованием в рамках каждой утилиты универсального конфигурационного файла формата xml, подготовка которого может осуществляться как с использованием графического приложения atom.exe, так и в стандартном текстовом редакторе. Программный комплекс поддерживает загрузку пользовательских конфигурационных файлов, в ходе серии вероятностных испытаний изменить xml-файл нельзя.

Подготовка данных к серии вероятностных испытаний производится при помощи утилиты atom.exe. Интерфейс программы состоит из нескольких вкладок. На первой производится выбор конфигурации расчетных кодов для проведения серии вероятностных испытаний (рис. 3.2). На второй и третьей (рис. 3.3) производится задание параметров распределения входных параметров расчетных кодов и определяются список критериальных для данной серии испытаний параметров, значения критериев, квантиль распределения критериальных параметров и уровень доверия, на котором критерий проверяется. Запуск испытаний производится кнопкой «Расчет».

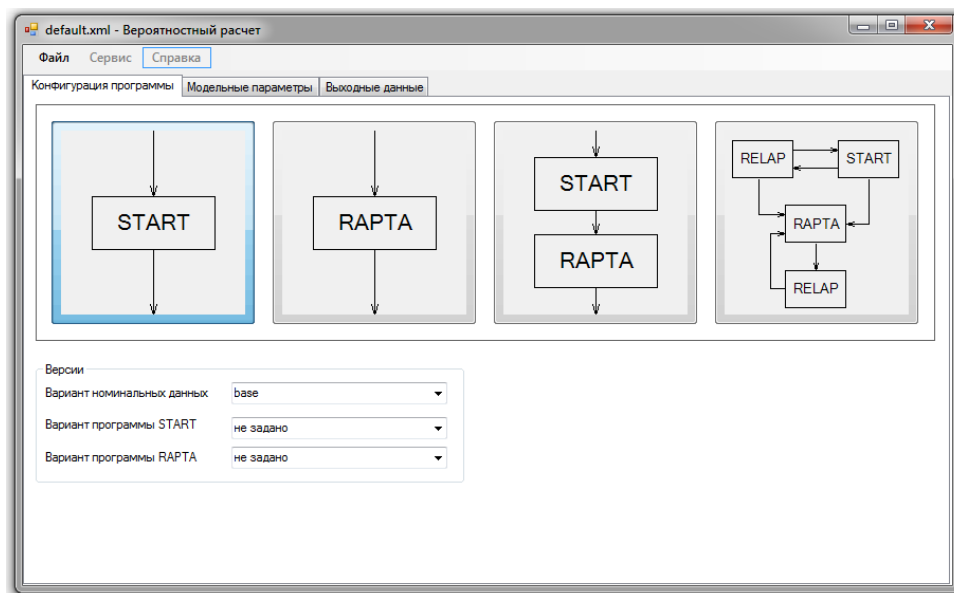


Рис. 3.2. Выбор конфигурации расчетных кодов

Двойной щелчок на любом из содержащихся во второй закладке модельных параметров позволяет перейти к окну, в котором можно изменить атрибуты параметра: минимальное и максимальное значение, вид распределения для вероятностного расчета: фиксированное, равномерное или нормальное. Следует указать значения параметров распределения.

Двойной щелчок на любом из содержащихся в третьей закладке выходных параметров позволяет перейти к окну, в котором можно изменить атрибуты параметра: указать, является ли параметр в расчете критериальным, а также задать минимально и максимально допустимые его значения, т.е. границы.

Организована фильтрация отображаемых в среде подготовки серии испытаний модельных параметров и выходных данных в зависимости от выбранной схемы расчета. Параметры, контроль которых не проводится, обозначены серым цветом.

Для удобства работы с различными сериями расчетов в начале подготовки серии испытаний программа запрашивает имя проекта, которое впоследствии сохраняется в файле проекта и которому будут соответствовать папка проекта в директории “\calculations\”. Также имя проекта можно задать или изменить, используя пункт меню “Файл ->Переименовать проект” (рис. 3.4.).

По нажатию кнопки «Расчет» из данных, введенных в форму, формируется конфигурационный файл серии испытаний current.xml и запускается на расчет утилита CalculationsOrganizer.exe. Запуск данной утилиты можно производить непосредственно из консоли, минуя графический интерфейс утилиты atom.exe. Запуск производится без аргументов командной строки.

default.xml - Вероятностный расчет

Файл Сервис Справка

Конфигурация программы Модельные параметры Выходные данные

Параметр	Минимум	Максимум	Распределение	Фиксир.	Ожидание	Отклонение
Теплопроводность топлива	0.9	1.1	нормальное		1.000	0.033
Термическое расширение топлива	0.87	1.13	нормальное		1.000	0.043
Теплопроводность оболочки твэла	0.92	1.08	нормальное		1.000	0.027
Теплопроводность газа	0.9	1.1	нормальное		1.000	0.033
Газовыделение при газовыделении меньше 3%	0.3	1.7	нормальное		1.000	2.667
Газовыделение при газовыделении больше 3%	0.9	1.1	нормальное		1.000	0.033
Термическое расширение оболочки	0.87	1.13	нормальное		1.000	0.043
Скорость коррозии оболочки	0.7	1.3	нормальное		1.000	0.1
Теплопроводность оксида циркония	0.75	1.25	нормальное		1.000	0.083
Распухание топлива	0.65	1.35	нормальное		1.000	0.117
Ползучесть оболочки твэла	0.7	1.3	нормальное		1.000	0.1
Модуль Юнга оболочки твэла	0.98	1.02	нормальное		1.000	0.007
Радиационный рост оболочки твэла	0.7	1.3	нормальное		1.000	0.1
Линейная мощность твэла	0.9	1.1	нормальное		1.000	0.033
Внешний радиус оболочки, мм	4.73	4.77	нормальное		4.75	0.007
Внутренний радиус оболочки, мм	4.135	4.195	нормальное		4.165	0.01
Радиус топливной таблетки, мм	4.09	4.1	нормальное		4.095	0.002
Плотность топлива, г/см ³	10.4	10.7	нормальное		10.55	0.007
Доспекаемость топлива, %	0.00	1.20	нормальное		0.60	0.2
Давление газа под оболочкой, МПа	0.19	0.24	нормальное		0.215	0.007
Длина газосборника, мм	150	168	нормальное		159.00	3.0
Открытая пористость, %	0.00	1.00	нормальное		0.50	0.17
Нейтронный поток	1.0	1.0	нормальное		1.0	0.1

default.xml - Вероятностный расчет

Файл Сервис Справка

Конфигурация программы Модельные параметры Выходные данные

Параметр	Контроль	Минимум	Максимум	Обозначение
Давление газа под оболочкой, МПа	-	не задано	15.8	PGAS
Окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки, МПа	+	не задано	260	SCI
Температура в центре топлива, С		не задано	2840	TFI
Осевая деформация твэла в данном аксиальном течении, мм		не задано	58.0	LCLAD
Изменение диаметра твэла, мкм	+	-120.0	50.0	DDIAM
Среднее выгорание, %		не задано	не задано	BUA

Квантили
Крит. параметров: 3
Квантиль распределения: 0.95
Уровень доверия: 0.95
Число расчетов: 124

Расчет
Выполнение (сек):

Начать расчет

Рис. 3.3. Задание входных и контролируемых параметров модели

default.xml - Вероятностный расчет

Файл Сервис Справка

Конфигурация программы Модельные параметры Выходные данные

Название проекта

Введите название проекта (разрешены только латинские буквы и цифры):

New

OK

Параметр	Минимум	Максимум	Обозначение
Давление газа под оболочкой, МПа	не задано	15.8	PGAS
Окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки, МПа	не задано	260	SCI
Температура в центре топлива, С	не задано	2840	TFI
Осевая деформация твэла в данном аксиальном течении, мм	не задано	58.0	LCLAD
Изменение диаметра твэла, мкм	-120.0	50.0	DDIAM
Среднее выгорание, %	не задано	не задано	BUA

Квантили
Крит. параметров: 3
Квантиль распределения: 0.5
Уровень доверия: 0.5
Число расчетов: 6

Расчет
Выполнение (сек):

Начать расчет

Рис. 3.4. Задание имени серии ВР

По завершении испытаний утилита atom.exe выводит системное сообщение об окончании серии. Дальнейшая обработка результатов испытаний может вестись как через выходные файлы комплекса BP, так и при помощи утилиты ResultViewer.exe.

По итогам расчетов в каталоге текущей серии формируется ряд выходных файлов, содержащих агрегированные данные о значениях контролируемых параметров.

В главный файл отчета выводится информация о соответствии полученных в BP значений контролируемых параметров всех исследуемых программных кодов исходно заданным критериям.

При этом отдельно формируется файл со сводными результатами расчетов по коду RAPTA-5.2. Это, в частности, максимальная температура топлива, максимальная радиально усредненная энтальпия топлива, максимальная температура оболочки, максимальный эффективный коэффициент окисления, максимальная относительная масса окисленного циркония, максимальные напряжения оболочки.

Также формируется набор файлов агрегированных выходных данных по контролируемым параметрам кода START-3. Данный набор файлов содержит следующую информацию: максимальное (по сечениям) значение контролируемого параметра, соответствующее номинальным значениям входных параметров; максимальное значение контролируемого параметра в области неопределенности; минимальное значение контролируемого параметра в области неопределенности; максимальное предельное значение (верхний критерий) контролируемого параметра; минимальное предельное значение (нижний критерий) контролируемого параметра; резервный — в случае, если критерий провален, в столбце указывается тип проваленного критерия.

На данный момент программный комплекс BP поддерживает проведение серий вероятностных испытаний для кодов START-3 и RAPTA-5.2 в трех конфигурациях:

- испытания только по коду START-3;
- испытания только по коду RAPTA-5.2;
- испытания по связке кодов START-3 и RAPTA-5.2 — последовательное исполнение кодов.

Утилита CalculationsOrganizer.exe позволяет производить последовательный запуск программ START-3 и RAPTA-5.2, а также автоматизированную подготовку файлов с исходными данными для этих программ. Утилита отслеживает процесс прохождения расчета в каждой из программ и по его окончании производит запуск либо следующей программы в данном испытании, либо нового испытания в рамках серии вероятностных расчетов, либо постобработчика данных для текущей серии расчетов.

Для подготовки, организации запуска и отслеживания прохождения расчетных программ применена платформа .NET и ее реализация для языка C++. Для корректной работы программного комплекса BP требуется установка .NetFramework 3.5.

Утилита CalculationsOrganizer.exe реализует следующий алгоритм:

1. считывание конфигурационного xml-файла серии испытаний, определение количества необходимых испытаний для проверки всех заданных критериев при заданном квантиле распределения на заданном уровне доверия;
2. подготовка пакета входных файлов расчетных кодов (реализована подготовка входных данных для START-3 и части или всех входных параметров RAPTA-5.2, остальные параметры RAPTA-5.2 получает из выходных параметров START-3);

3. запуск на расчет кода START-3 и сбор полученных необработанных выходных данных;
4. в случае, если испытания проводятся и для кода START-3, и для кода RAPTA-5.2, отбор выходных данных кода START-3 и подготовка входных данных кода RAPTA-5.2; иначе
5. запуск на расчет кода RAPTA-5.2 и сбор полученных необработанных выходных данных;
6. если все испытания проведены, то выполняется пункт 7; иначе — 3;
7. обработка выходных файлов расчетных кодов, проверка критериев, формирование выходных файлов кода ВР и отчета серии испытаний.

4. Графический интерфейс программного кода CaPpaPI

4.1. Постпроцессор

Программа ResultViewer.exe выполняет функции постобработчика данных серии вероятностных испытаний и обеспечивает их визуализацию. Реализован следующий набор функций:

1. Рисование графиков всех выходных данных вероятностных расчетов (номинальное, максимальное и минимальное значения параметров) и критериев (если они есть). Пользователь может редактировать внешний вид всех графиков.
2. Многооконный пользовательский интерфейс.
3. Использование шаблонов оформления графиков.
4. Сохранение рисунков построенных графиков.

Пример окна, возникающего в результате запуска программы ResultViewer.exe, приведен на рис. 4.1.

При помощи меню «Данные» можно выбирать группы параметров, графики для которых будут отображены (рис. 4.2). Каждое окно графика соответствует отдельному выходному параметру вероятностного расчета.

Используя пункт меню «Файл -> Шаблон», можно производить различные манипуляции с шаблонами. Пример возникающего окна приведен на рис. 4.3.

Для анализа проведенных расчетов осуществлено наглядное представление входных параметров кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP. Кроме возможности непосредственного анализа входных файлов расчетных кодов реализован сбор варьируемых по методу Монте-Карло входных параметров в единую таблицу. В этой же таблице приводится информация о прохождении наборами входных данных критерия χ^2 -квадрат [28] на соответствие заявленным законам распределения соответствующих случайных величин. Проверка критерия происходит по заданной величине уровня доверия.

Кроме того, в рамках модуля ResultViewer реализована возможность построения гистограмм распределений входных и выходных параметров расчетных кодов (рис. 4.4 - 4.6).

В окне гистограммы по наведению мыши на соответствующий столбец отображаются начало и конец интервала, а также количество расчетов, попавших в него.

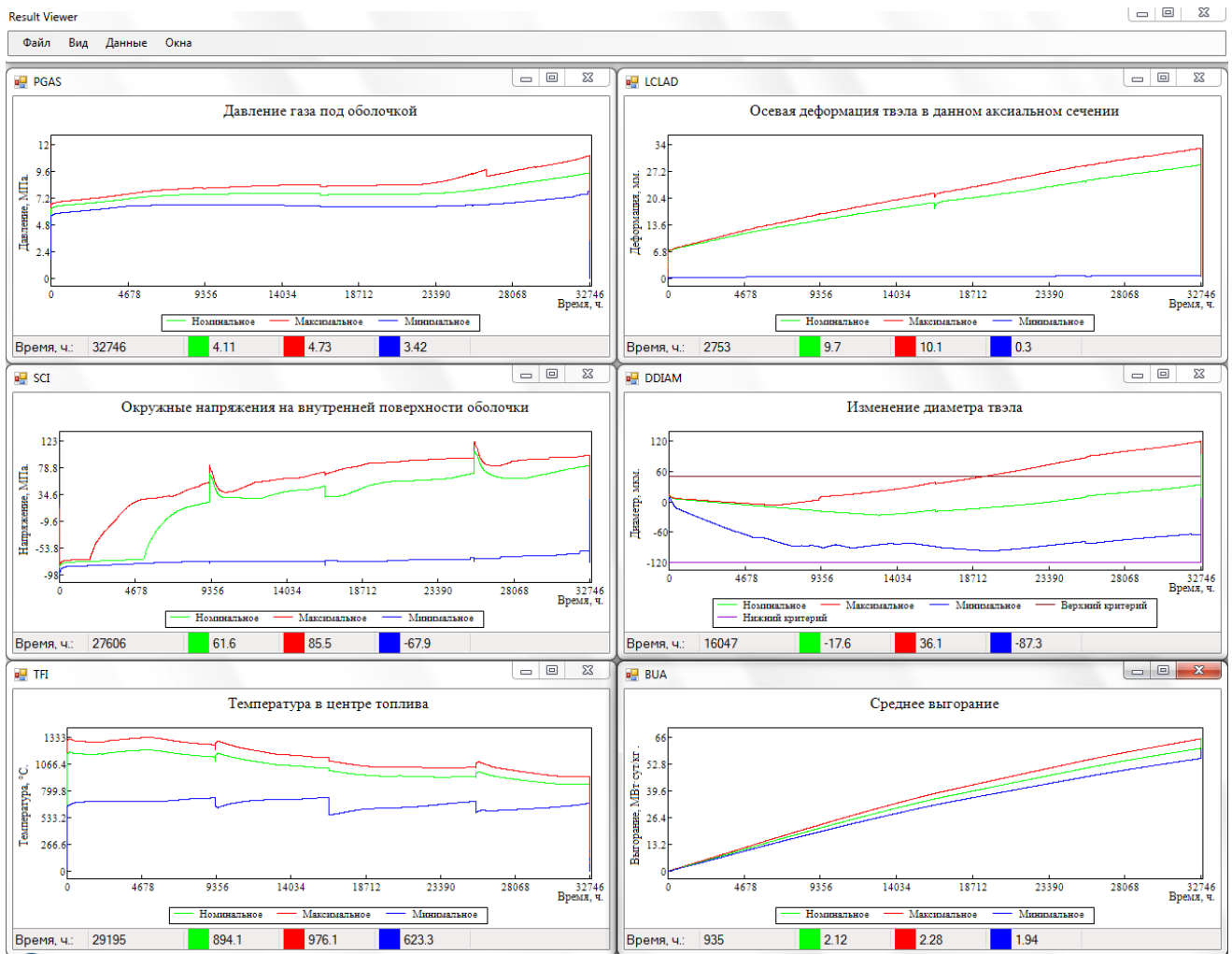


Рис. 4.1. Графический интерфейс постобработчика серии ВР

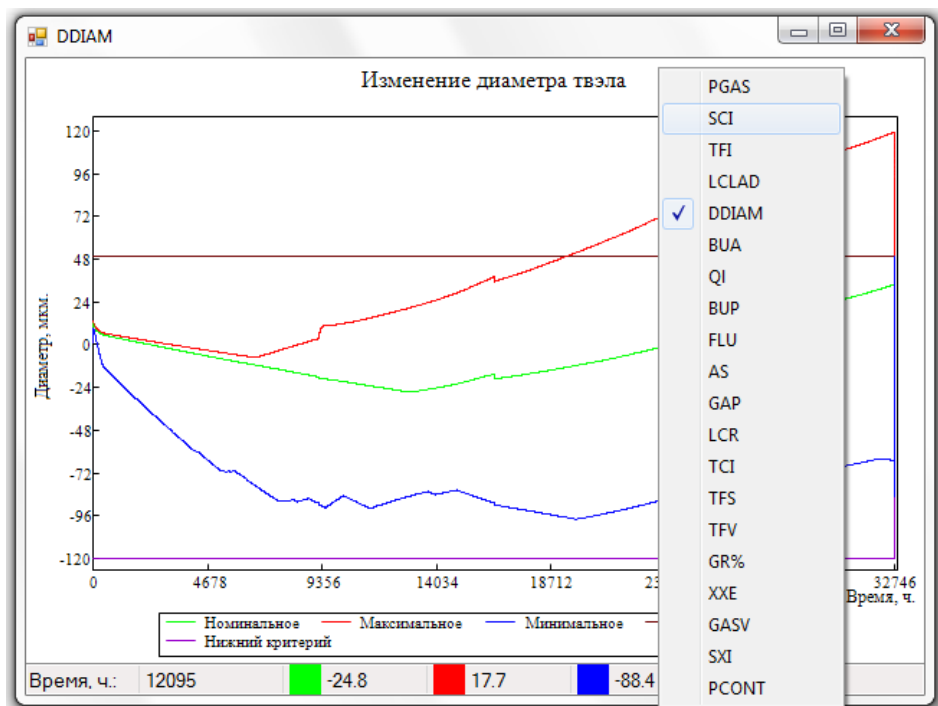


Рис. 4.2. Выбор отображаемых параметров

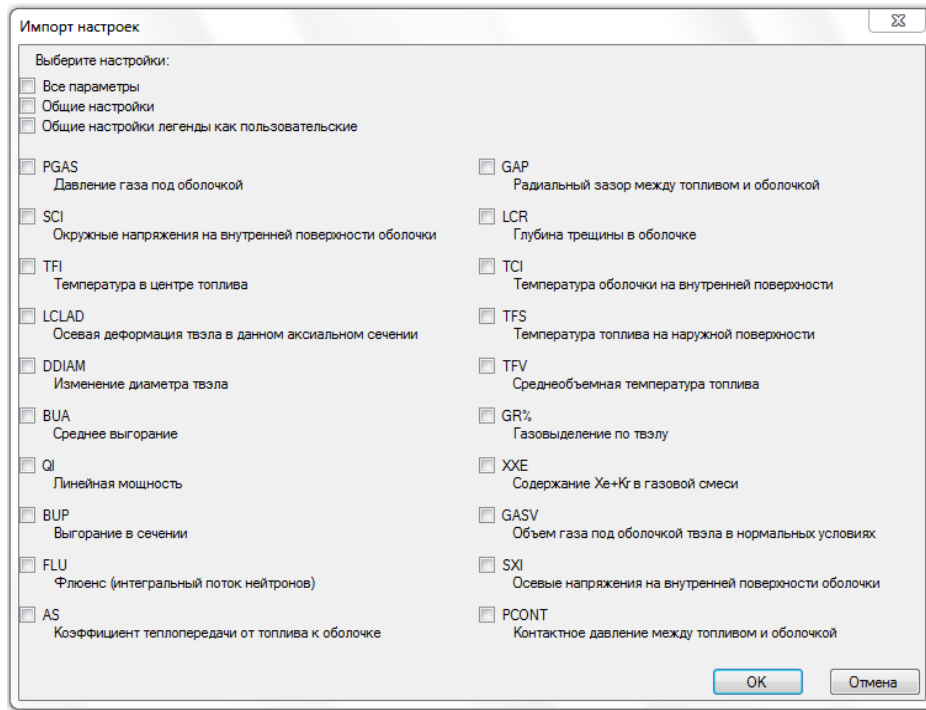


Рис. 4.3. Импорт шаблонов отображения параметров серии ВР

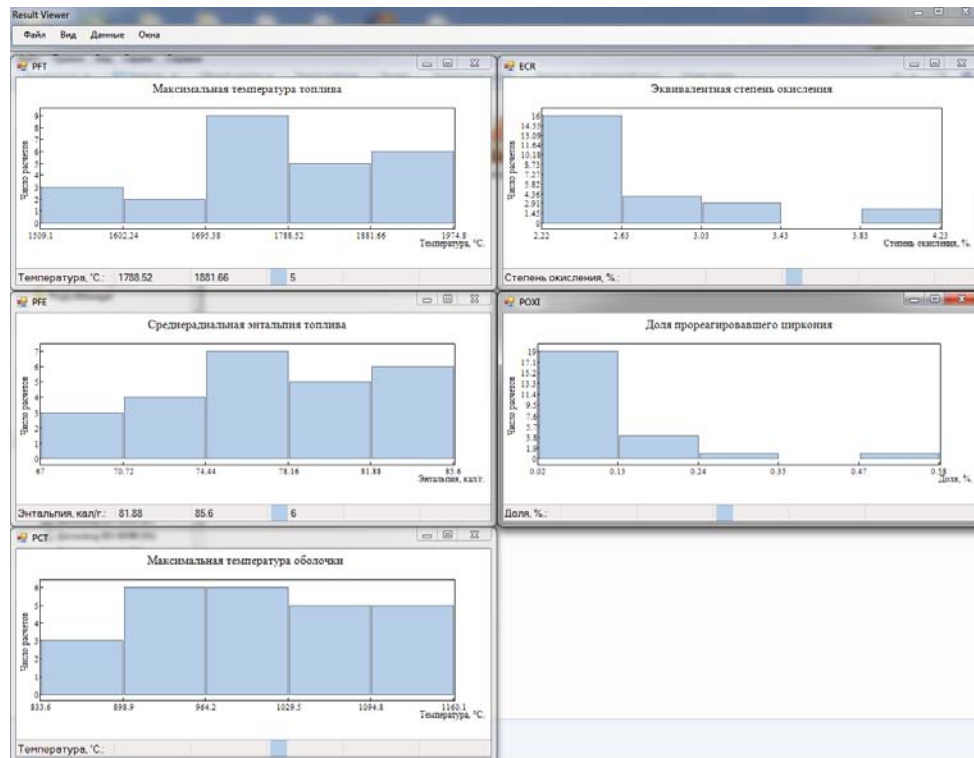


Рис. 4.4. Набор гистограмм входных параметров серии ВР

Наряду с построением максимальной, минимальной и номинальной кривых для оцениваемых выходных параметров в зависимости от времени реализовано построение графика-«пилы» для выходных параметров, отображающего максимальное по сечению и по времени значение параметра в зависимости от номера расчета. Опции легенды и формата отображения графика-пилы также содержатся в разделе общих настроек визуализирующего модуля (рис. 4.7).

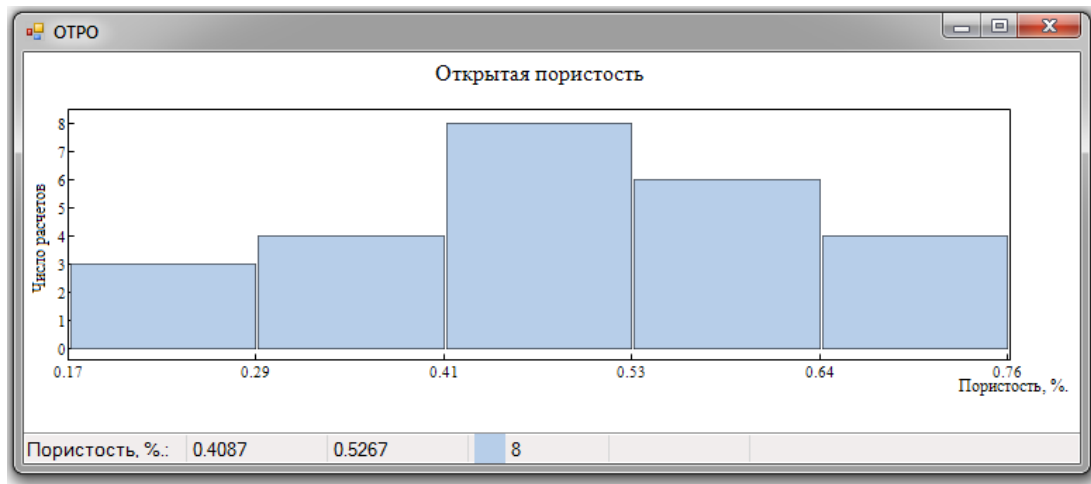


Рис. 4.5. Пример гистограммы выходного параметра серии ВР

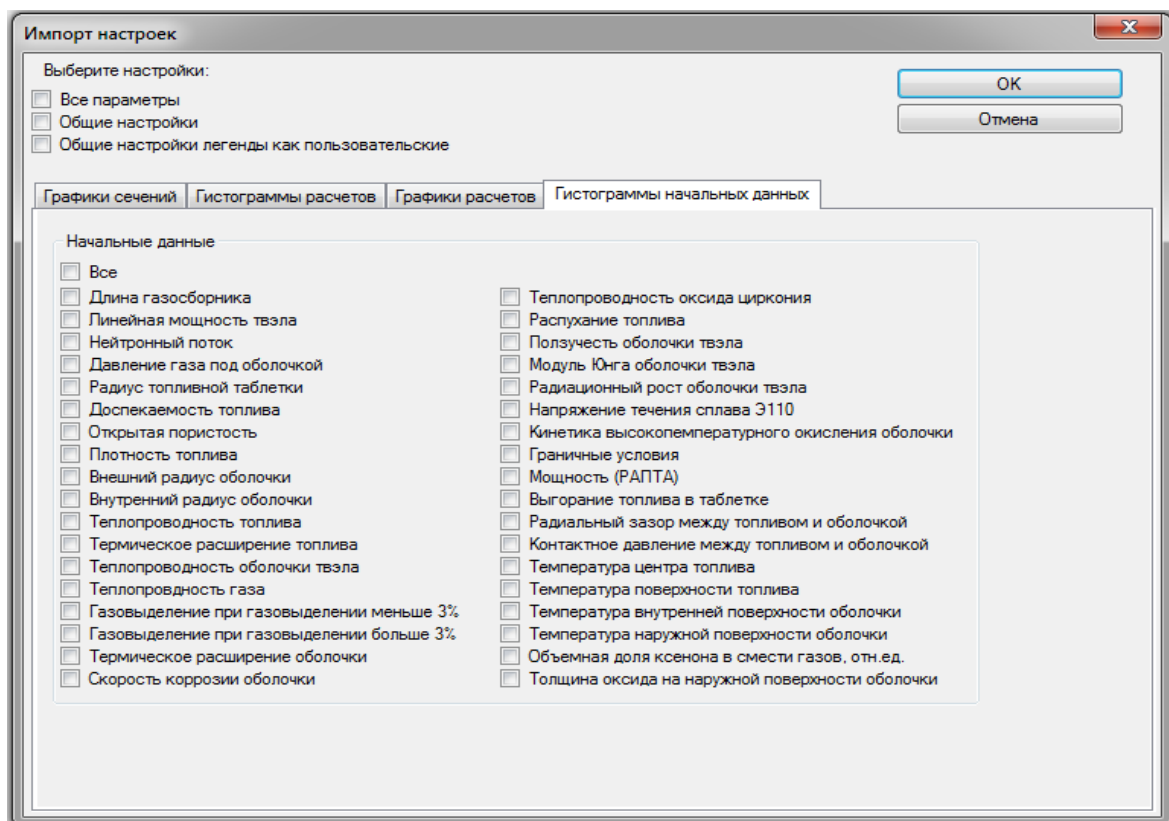


Рис. 4.6. Выбор шаблонов отображения гистограмм параметров серии ВР

В визуальный интерфейс программы ResultViewer.exe включено окно просмотра нарушения критериев. Если критерий нарушен, то двойной щелчок по примеру сечения открывает соответствующий файл с результатами (рис. 4.8).

Пункт меню “Данные” позволяет выбрать между входными данными и выходными для расчетных кодов START-3 и RAPTA-5.2 (рис. 4.9). Отображение групп графиков располагается в пункте меню “Окна->Показать группу”.

Как уже упоминалось выше, для удобства анализа проведенных расчетов осуществлено наглядное представление входных параметров кодов START-3, RAPTA-5.2, в том числе гистограмм входных параметров START-3 и RAPTA-5.2 (рис. 4.10).

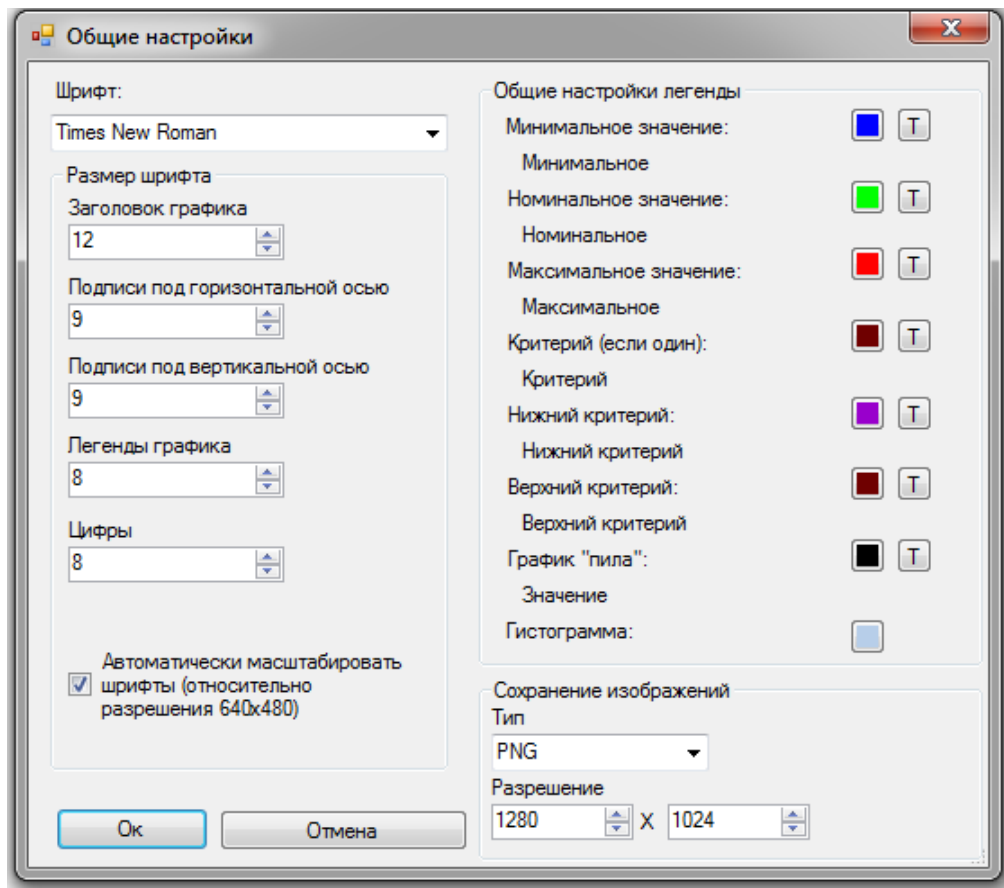


Рис. 4.7. Окно настройки внешнего вида отображаемых и сохраняемых графиков

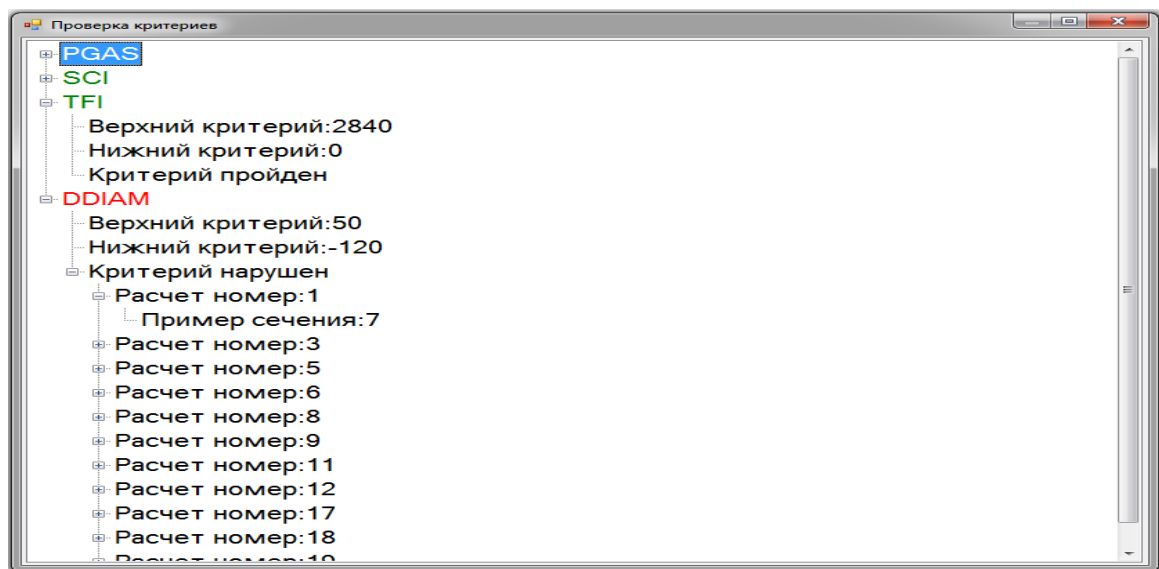


Рис. 4.8. Сводная информация о подтвержденных и проваленных критериях

Также выполняется построение максимальной, минимальной и номинальной кривых для оцениваемых выходных параметров расчетного кода RAPTA-5.2 в зависимости от времени (рис. 4.11, 4.12).



Рис. 4.9. Отображение выходных параметров различных расчетных кодов

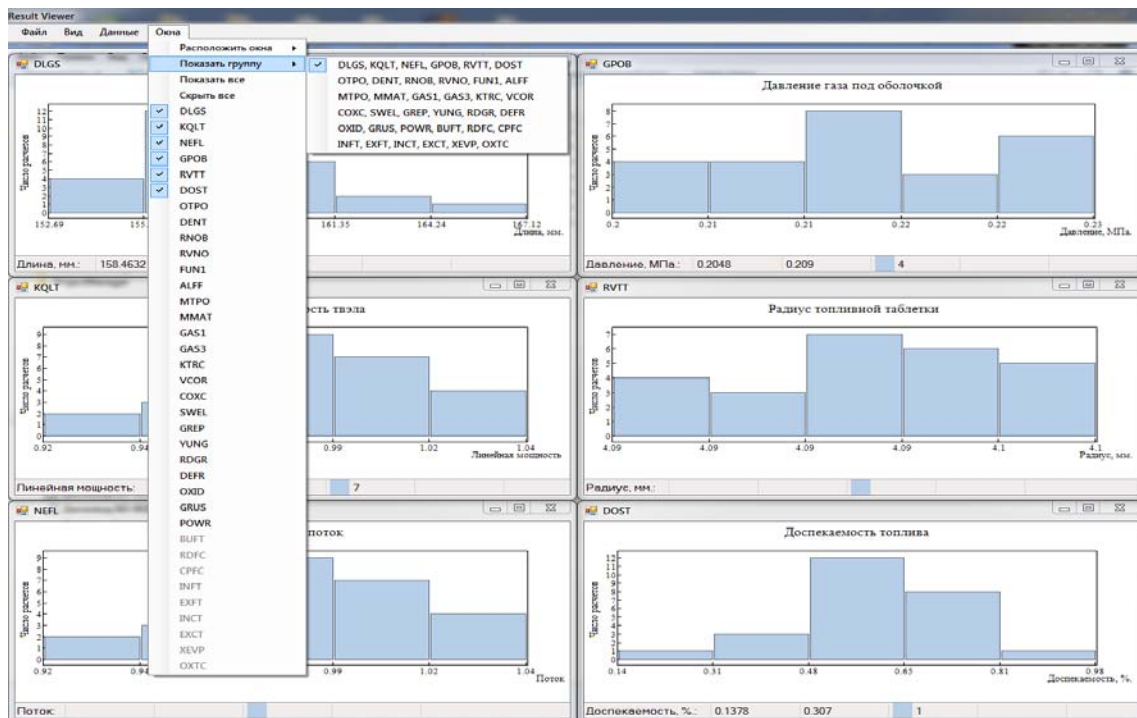
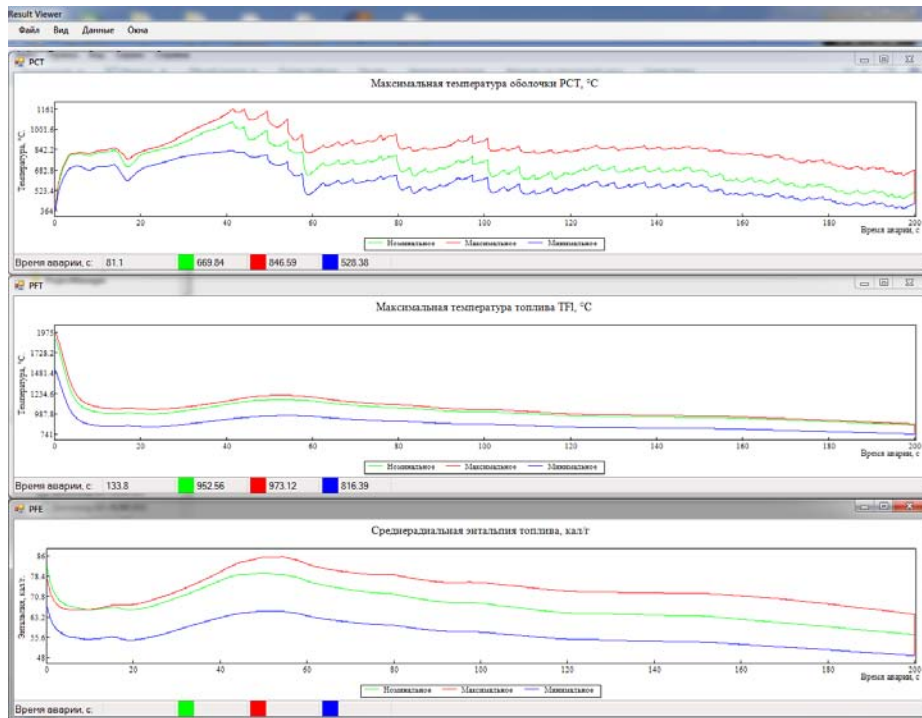


Рис. 4.10. Группировка при отображении выходных параметров



4.2. Графическая среда сопровождения серии испытаний

Для наглядности отображения работы программы в процессе выполнения расчетов на экран выводится следующая информация (рис. 4.13):

- схема организации расчета;
- общее количество расчетных испытаний;
- номер текущего расчетного испытания;

- приблизительное время до окончания серии расчетов;
- затраченное на прошедшие расчеты время;
- линейки прогресса текущего расчета и серии расчетов;
- для каждого кода, участвующего в расчетах, в отдельном окне выводятся:

1) возможность выбора наблюдаемого параметра (например, из выпадающего списка) (предусмотрена возможность просмотра расчетных значений всех выходных переменных из LongList);

2) график, на котором отображается выбранная наблюдаемая величина в зависимости от номера расчетного испытания (для кода START-3 — максимальное значение расчетной величины по всем сечениям и, кроме того, минимальное значение для изменения диаметра) и предельное значение для наблюдаемой величины, если оно задается;

3) сообщение о превышении предельного значения критериального параметра с указанием номера сечения и номера расчетного испытания, в котором произошло превышение предела.

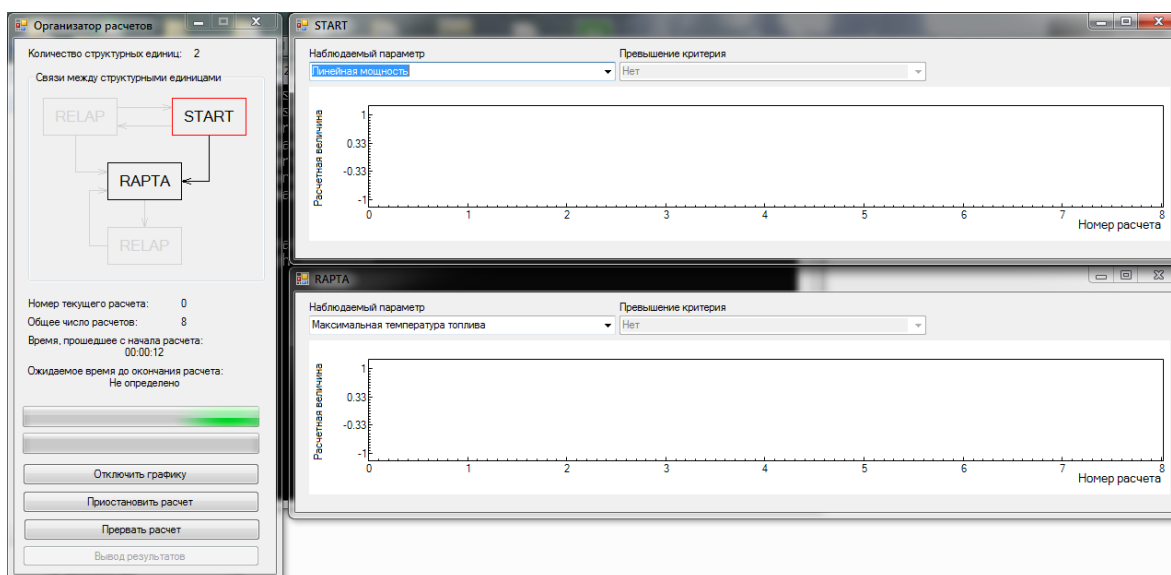


Рис. 4.13. Графический интерфейс среды сопровождения серии ВР

Реализована возможность отключения графического представления промежуточных результатов и кнопка вывода результатов (графиков) после окончания расчетов (рис. 4.14).

Для каждого кода, участвующего в расчетах, разработаны окна графиков расчетов (рис. 4.15, 4.16). Окно содержит график экстремальных значений параметров в зависимости от номера проведенного расчета. При наведении мыши на точку графика отображается соответствующее ей значение параметра.

При превышении критерия отображаемый график автоматически переключается на график параметра, превышающего критерий. Становится активным список (выделен красным цветом), содержащий такие параметры, упорядоченные по номеру расчета, в котором замечено последнее превышение критерия.

Реализована опция приостановки (паузы) и прерывания (остановки) расчета с возможностью последующего возобновления расчетов.

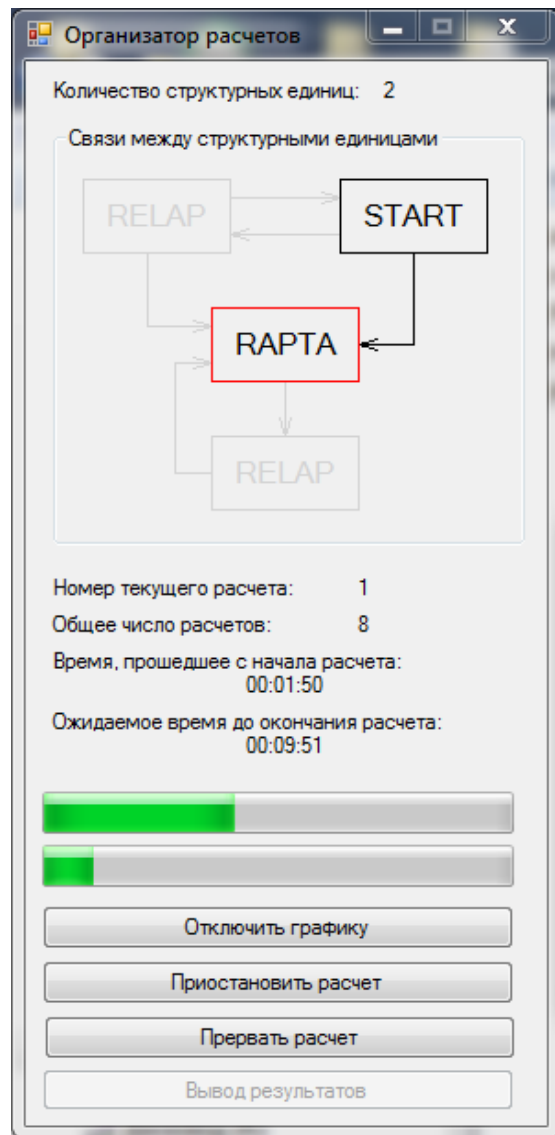


Рис. 4.14. Основные сведения о текущем состоянии серии ВР

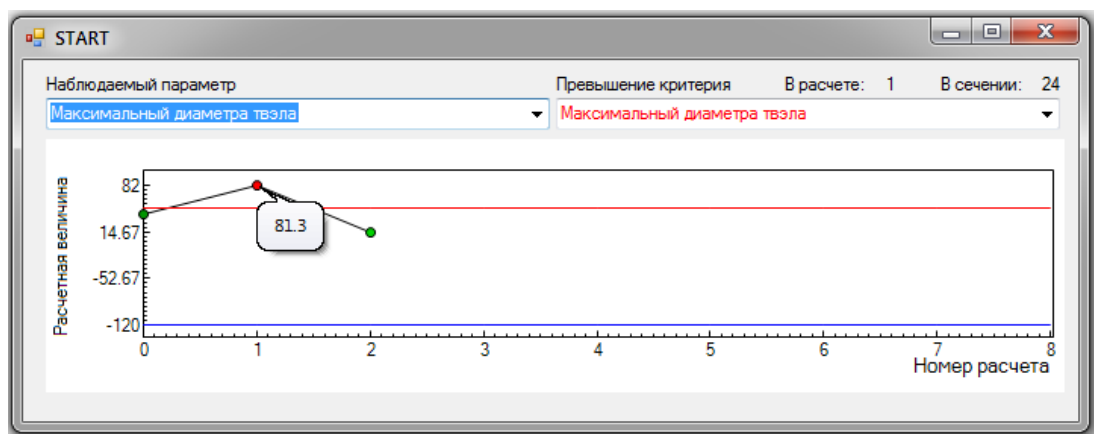


Рис. 4.15. Отображение информации о критериальных параметрах в режиме реального времени

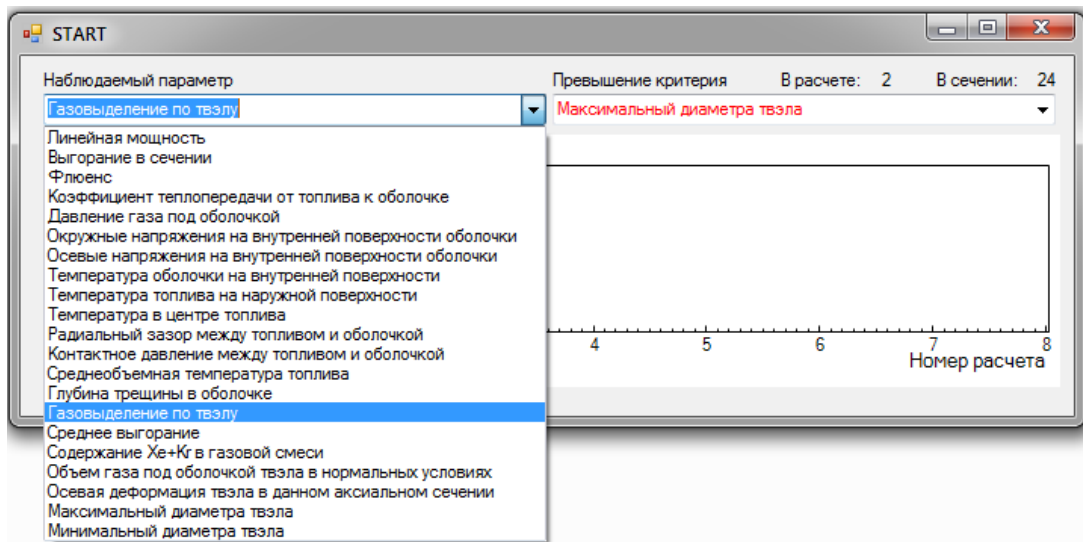


Рис. 4.16. Выбор отображаемых в процессе расчета критериальных параметров

Если в процессе расчетов зафиксировано превышение одного или нескольких предельных значений критериальных параметров, программа производит необходимое количество дополнительных вычислений, необходимых для проверки критерия, и предлагает пользователю соответствующий диалог, позволяющий принять или отклонить продолжение расчетов до установления критерия либо до следующей развилки (в случае новых превышений предельных значений критериев).

После проведения расчетов становится доступна кнопка “Вывод результатов”, при нажатии которой открывается ResultViewer.exe (рис. 4.17).

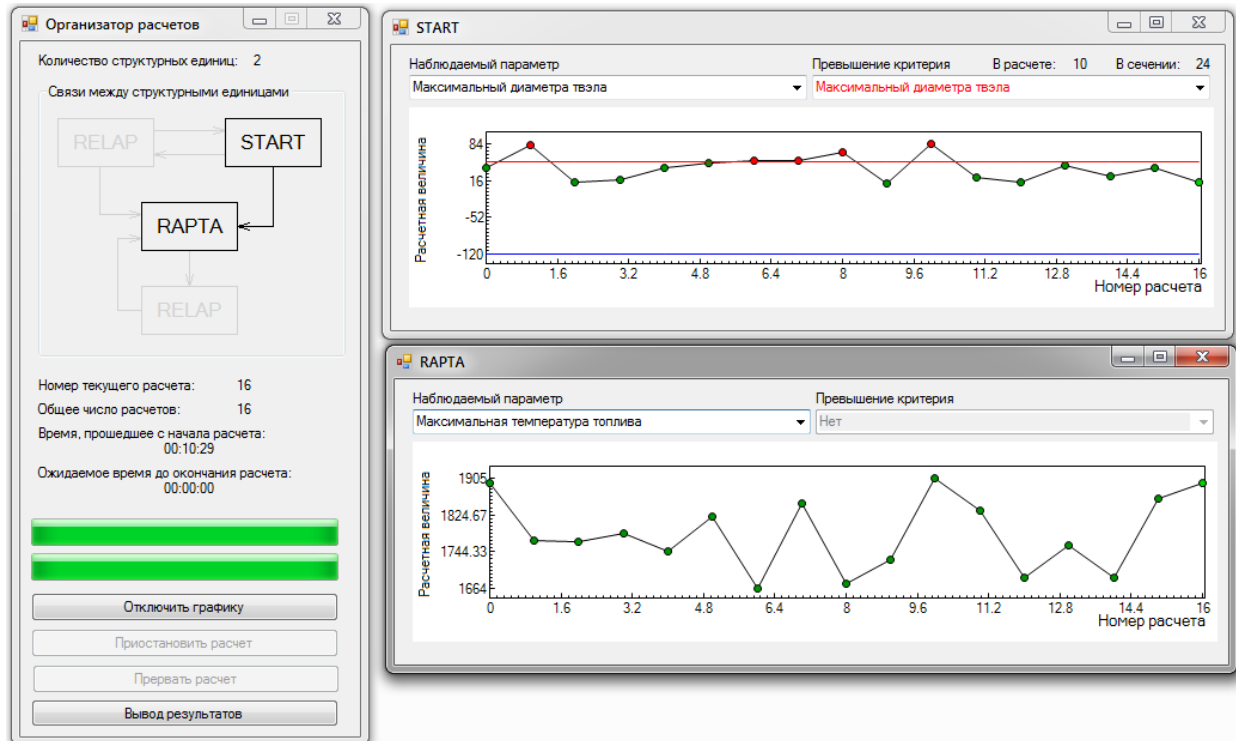


Рис. 4.17. Вид среды сопровождения серии ВР по окончании серии

5. Примеры работы программного кода CaPpaPI

5.1. Тестирование программного кода

Работоспособность кода ВР протестирована на примере с использованием описанных выше варьируемых входных параметров и их распределений.

В качестве критериальных параметров выбраны контролируемые параметры кода START-3:

давление газа под оболочкой PGAS < 15,8 МПа;

окружные напряжения на внутренней поверхности оболочки SCI < 260 МПа.

История изменения максимальной линейной мощности твэла, для которого проводились расчеты критериальных параметров, представлена на рис. 5.1. Значения линейной мощности твэла варьировались в диапазоне $\pm 10\%$.

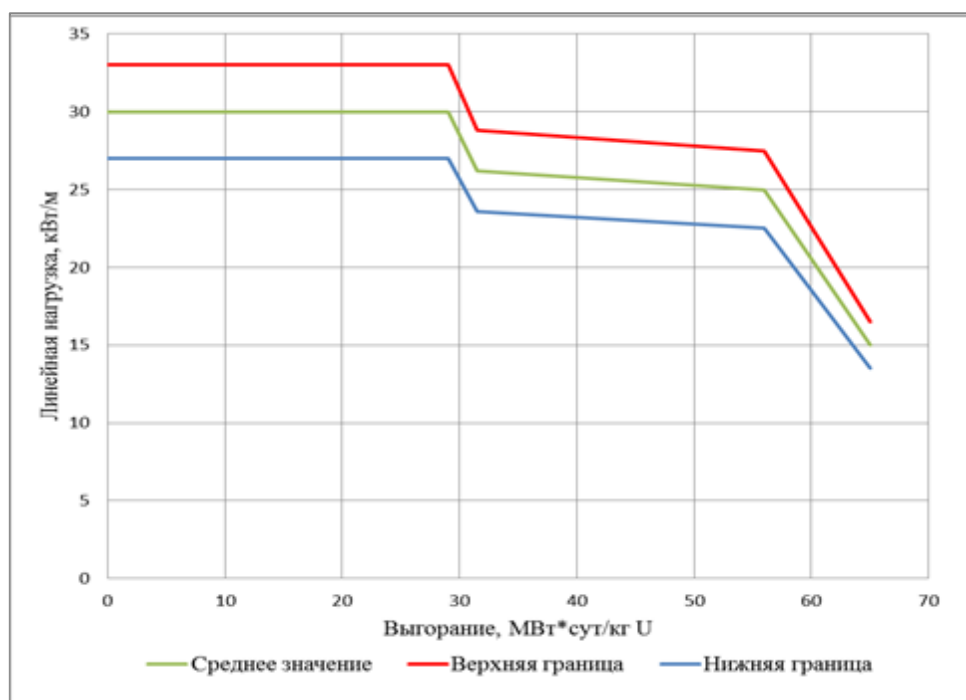


Рис. 5.1. Изменение линейной нагрузки с выгоранием

Списки варьируемых параметров, математическое ожидание и тип распределения представлены ниже в табл. 5.3, 5.4 для технологических и модельных параметров соответственно.

Таким образом, в ходе расчетов проверялось 2 критерия. Выбрано значение квантиля $\beta = 0.95$ и уровень доверия $\gamma = 0.95$. Произведено 93 расчета с использованием расчетного кода START-3, в том числе 1 расчет с номинальным значением входных параметров и 92 расчета со смоделированными по методу Монте-Карло входными параметрами.

Расчет проводился на сервере следующей конфигурации.

1. Процессор: Core 2 Quad, 2660 МГц.
2. Оперативная память: 4Гб памяти формата DDR2.
3. Операционная система MS Windows 7 x64.
4. Набор компиляторов: MS Visual Studio 2008 с компиляторами Intel Parallel Studio XE 2011.

Время расчета составило 6645 секунд (1,84 часа) с учетом постобработки выходных файлов кода START-3. В среднем на один расчет по коду START-3 потребовалось 71,46 с.

Общий объем полученных данных составил 724,3 Мб.

В результате серии ВР получены следующие результаты.

Подтверждены критерии: давление газа под оболочкой $P_{GAS} < 15,8$ МПа; окружающие напряжения на внутренней поверхности оболочки $SCI < 260$ МПа.

Ниже (рис. 5.2, 5.3) приведены графики полученных критериальных параметров:

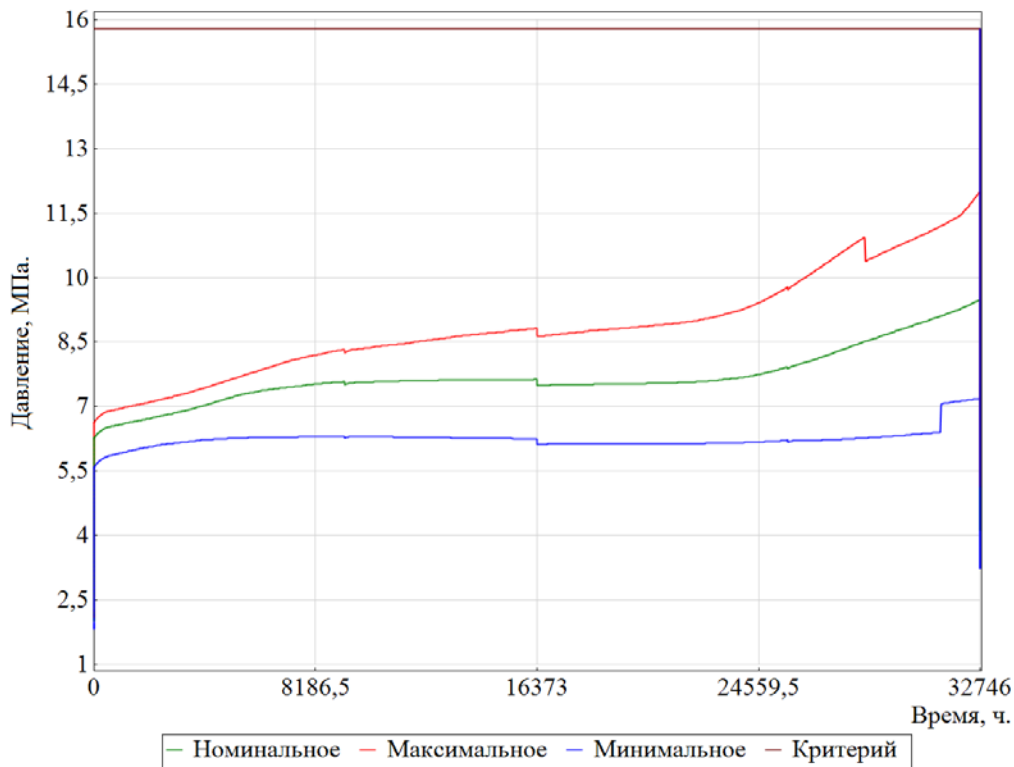


Рис. 5.2. Давление газа под оболочкой

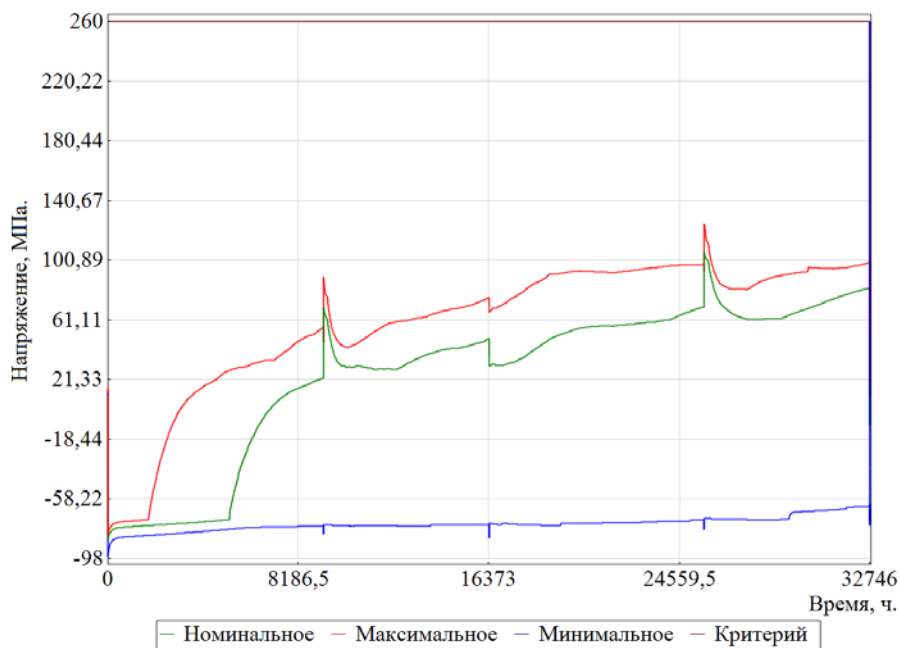


Рис. 5.3. Окружающие напряжения на внутренней поверхности оболочки

5.2. Проведение тестового расчета горячего твэла в аварии LOCA с использованием заданных функций распределения для ключевых параметров, моделей и интерфейсных данных

В качестве тестового примера расчета критериальных характеристик твэла в аварии типа LOCA с использованием разработанного ВР-кода рассмотрен типичный постулируемый аварийный режим с большой течью теплоносителя первого контура реактора PWR.

5.2.1. Алгоритм и программная реализация статистической методики анализа LOCA с использованием кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP

В тестовом примере реализован алгоритм вероятностных расчетов поведения твэла в аварии типа LOCA на основе методов Монте-Карло с использованием кодов START-3 и RAPTA-5.2 и интерфейсных данных кода RELAP.

Пример имел целью получение реалистических оценок основных критериальных параметров твэлов в аварии LOCA: максимальной температуры оболочки РСТ и максимальной эквивалентной степени окисления оболочки ECR с оценками их неопределенностей в виде границ 95% доверительного интервала с уровнем доверия 95%.

В соответствии с требованиями параграфа 46 части 50 раздела 10 Свода законов США [1] (краткое обозначение “10CFR50.46”), расчетная максимальная температура оболочки твэла РСТ должна быть не выше 1204 °С, а расчетное значение эквивалентной степени окисления оболочки (ECR) должно быть не больше 17 %.

Реализованный в тестовом примере алгоритм включает следующие этапы:

- 1) генерация входного вектора случайных значений ключевых параметров твэла и коэффициентов ключевых моделей твэла для кодов START-3 и RAPTA-5.2 с использованием генератора псевдослучайных чисел RAN2, дающего последовательность псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на единичном отрезке и имеющих период повторения не хуже $2.3 \cdot 10^{18}$, а также с использованием заданных функций распределения плотностей вероятности ключевых параметров и коэффициентов моделей,
- 2) формирование файлов входных данных кода START-3,
- 3) расчет режима нормальной эксплуатации (НЭ) до аварии по коду START-3,
- 4) генерация случайных коэффициентов для интерфейсных данных кода RELAP/SCDAPSIM (распределение энерговыделения в твэле и граничные условия на поверхности твэла),
- 5) формирование файлов входных данных кода RAPTA-5.2,
- 6) расчет твэла в аварии LOCA по коду RAPTA-5.2,
- 7) обработка результатов, анализ значений критериальных параметров РСТ и ECR на предмет непревышения критерия, возврат к шагу 1, если заданное количество расчетов не достигнуто.

5.2.2. Учет неопределенности расчета интерфейсных параметров кодом RELAP

Перечень важных явлений в части теплогидравлики активной зоны в авариях LOCA включает следующие явления [29, 30]:

- 1) теплообмен на стадии разрыва контура теплоносителя (blowdown):

- неравновесное и пузырьковое кипение,
- критический тепловой поток и осушение,
- повторное смачивание,
- пленочное кипение;

2) адиабатический разогрев на стадии пополнения запасов теплоносителя (refill):

- теплообмен при однофазном течении пара;

3) теплообмен на стадии повторного залива (reflooding):

- пленочное кипение,
- унос капельной влаги и конденсация,
- CCFL (ограничение расхода воды при «захлебывании» на входе из активной зоны реактора) и межфазное трение,
- минимальная температура пленочного кипения,
- теплообмен излучением, в том числе с теплоносителем,
- продвижение фронта охлаждения,
- влияние разбухания оболочки ТВЭЛов на теплообмен,
- влияние дистанционной решетки и фрагментации капель.

Согласно общепринятым подходам в существующих реалистических методиках оценки LOCA [7, 16, 31, 32] каждому из идентифицированных важных явлений ставится в соответствие конкретный входной параметр теплогидравлического кода, для которых определяются параметры функции распределения путем анализа неопределенностей на основе валидации кода, анализа чувствительности или экспертной оценки.

Для анализа LOCA с использованием граничных условий по активной зоне и несвязанных термомеханических и теплогидравлических кодов предлагается альтернативный подход, когда перечисленные выше явления объединяются в одно — теплообмен в активной зоне реактора на данной стадии аварии, а соответствующая неопределенность оценивается интегрально по результатам валидации кода.

При таком подходе неопределенность расчета теплогидравлических процессов в активной зоне реактора кодом RELAP выражается в неопределенности единственного интерфейсного параметра — эффективного коэффициента теплоотдачи.

В результате выполненной валидации кода показано, что относительное отклонение расчетной температуры от экспериментальной $\Delta_{OTH} = (T_{RELAP} - T_{EXP}) / (T_{EXP} - T_S)$ имеет близкое к нормальному распределение со среднеквадратичным отклонением $\sigma = 7\%$ (для всех стадий аварии), как показано в табл. 5.1. Здесь приняты следующие обозначения:

Δ_{OTH} — относительное отклонение расчетной температуры от экспериментальной,

T_{RELAP} — температура, рассчитанная по программе RELAP (°C),

T_{EXP} — экспериментальная температура (°C),

T_S — температура теплоносителя (°C).

Таблица 5.1

Характеристики неопределенности расчета температуры оболочки на разных стадиях аварии по результатам валидации кода RELAP

	Refill	Reflood	Overall
Кол-во точек	10	196	206
σ , °C	13,4	40,4	64,9
σ , отн. ед.	0,021	0,069	0,068

Неопределенность расчета температуры оболочки трансформируется в неопределенность эффективного коэффициента теплоотдачи, который вводится, используя следующее соотношение: $HTC = Q_{\Sigma} / (T_{RELAP} - T_S)$, где Q_{Σ} — суммарный тепловой поток на стенку оболочки. Неопределенность выражается в виде случайного коэффициента, который умножается на величину HTC, и характеризуется средним значением (математическим ожиданием), равным 1,0, и заданным среднеквадратичным отклонением σ .

Таким образом, теплогидравлические граничные условия — коэффициенты теплоотдачи, рассчитанные кодом RELAP, — являются одним из параметров — вкладчиков в неопределенность, которые учитываются при анализе состояния топлива в LOCA.

5.2.3. Учет неопределенности распределения мощности в активной зоне реактора

В число статистически рассматриваемых параметров включаются коэффициенты неравномерности мощности для горячего твэла (FΔH). Используется фиксированное высотное поле энерговыделения Fz, при этом локальная мощность твэла FQ будет изменяться в соответствии с вариацией FΔH.

Предполагается, что FΔH горячего канала (твэла) для рассматриваемого состояния (выгорания) является случайной величиной с нормальным законом распределения и среднеквадратичным отклонением $\sigma = 0,04/1,645 = 0,024$. Максимальное значение $F\Delta H^{\max} = F\Delta H^{BE} \cdot (1 + 0,04)$.

5.2.4. Учет неопределенностей ключевых параметров и моделей твэла для анализа LOCA

Идентификация ключевых параметров и моделей твэла для анализа LOCA проведена на основе таблиц PIRTs (NUREG/CR-6744 Phenomenon Identification and Ranking Tables (PIRTs) for Loss-of-Coolant Accidents in Pressurized and Boiling Water Reactors Containing High Burnup Fuel). В результате анализа PIRTs определены ключевые параметры твэла конструкционного и технологического характера, модельные параметры для условий НЭ и LOCA, параметры условий НЭ и нагружения в LOCA — см. табл. 5.2.

Таблица 5.2

Перечень ключевых параметров твэла для анализа LOCA

Тип параметра	№№	Параметр
Конструкционные и технологические	1	Внешний радиус оболочки твэла
	2	Внутренний радиус оболочки твэла
	3	Радиус топливной таблетки
	4	Плотность топлива

	5	Доспекаемость топлива
	6	Начальное давление газа под оболочкой ТВЭЛ
	7	Длина газосборника
	8	Открытая пористость топлива
Модельные	9	Теплопроводность топлива
	10	Термическое расширение топлива
	11	Теплопроводность оксида циркония
	12	Теплопроводность материала оболочки ТВЭЛ
	13	Теплопроводность внутритвэльного газа
	14	Газовыделение из топлива
	15	Коррозия оболочки
	16	Распухание топлива
	17	Ползучесть оболочки
	18	Термическое расширение оболочки
	19	Высокотемпературное окисление оболочки
	20	Напряжение течения сплава Э110
	21	Критерий разрушения оболочки
Эксплуатационные NO	22	История мощности
Нагружение в LOCA	23	Исходное распределение линейной мощности
	24	Теплоотдача от оболочки

На этапе проведения тестового расчета заданы предварительные или имитационные функции распределения плотностей вероятностей для ключевых параметров, которые будут уточняться при проведении реальных расчетов по обоснованию безопасности топлива.

1) Технологические параметры.

В табл.5.3 представлены данные о распределениях значений варьируемых параметров кода START-3, связанных с технологическими допусками при производстве ТВЭЛОВ.

Таблица 5.3

Параметры распределения варьируемых параметров,
определяемые технологическими допусками при производстве ТВЭЛОВ

Параметр	Математическое ожидание	Среднеквадратичное отклонение	Тип распределения
Внешний радиус оболочки ТВЭЛ, мм	4,75	0,007	Нормальное
Внутренний радиус оболочки ТВЭЛ, мм	4,18	0,01	Нормальное
Радиус топливной таблетки, мм	4,095	0,002	Нормальное
Плотность топлива, г/см ³	10,55	0,05	Нормальное
Доспекаемость топлива, %	0,60	0,20	Нормальное

Начальное давление газа под оболочкой твэла, МПа	2,100	0,007	Нормальное
Длина газосборника, мм	159,0	3,0	Нормальное
Открытая пористость, %	0,50	0,17	Нормальное

2) Модельные параметры и история нагружения твэлов.

При моделировании код START-3 осуществляет расчет параметров топлива и оболочки твэлов с помощью расчетных моделей, имеющих свои погрешности. В табл.5.4 представлена информация о распределении значений варьируемых параметров кода START-3, связанных с неточностью расчетных моделей, используемых в коде START-3, и неопределенностью параметров нагружения твэлов. При этом неопределенность модельных параметров задается в виде коэффициентов, на которые умножаются полученные расчетные параметры.

Таблица 5.4

Параметры распределения значений варьируемых параметров кода START-3, определяемые неточностью расчетных моделей, используемых в коде START-3, и неопределенностью параметров нагружения твэлов

Параметр	Математическое ожидание	Среднеквадратичное отклонение	Тип распределения
Коэффициент для теплопроводности топлива	1,000	0,033	Нормальное
Коэффициент для термического расширения топлива	1,000	0,043	Нормальное
Коэффициент для теплопроводности оксида циркония	1,000	0,033	Нормальное
Коэффициент для теплопроводности оболочки твэла	1,000	0,027	Нормальное
Коэффициент для теплопроводности газа	1,000	0,020	Нормальное
Коэффициент для газовыделения	1,000	0,233, если газовыделение < 3% 0,028, если газовыделение > 3%	Нормальное
Коэффициент для скорости коррозии оболочки	1,000	0,033	Нормальное
Коэффициент для распухания топлива	1,000	0,050	Нормальное
Коэффициент для ползучести оболочки твэла	1,000	0,100	Нормальное
Коэффициент для термического расширения оболочки твэла	1,000	0,003	Нормальное
Коэффициент для линейной мощности твэла	1,000	0,033	Нормальное

В табл. 5.5 приведены предварительные параметры распределения плотностей вероятности для коэффициентов моделей кода RAPTA-5.2, описывающих кинетику окисления и деформационное поведение оболочки из сплава Э110.

Таблица 5.5

Параметры распределения коэффициентов моделей кода RAPTA-5.2:
коэффициент для кинетики высокотемпературного окисления оболочки,
коэффициент для напряжения течения сплава Э110

Параметр	Математическое ожидание	Среднеквадратичное отклонение	Тип распределения
Коэффициент для кинетики высокотемпературного окисления оболочки	0.91116	0,03114	Нормальное
Коэффициент для напряжения течения сплава Э110	1,0192	0,0472	Нормальное

Предварительные параметры распределения плотностей вероятности для параметров теплогидравлических интерфейсных данных, характеризующих условия нагружения твэла в LOCA, представлены в табл. 5.6.

Таблица 5.6

Характеристики распределения интерфейсных данных: Множитель на коэффициент теплоотдачи F_{HTC} , Мощность горячего твэла FdH

Параметр	Распределение	Среднее значение	σ
Множитель на коэффициент теплоотдачи F_{HTC}	нормальное	1.0	0.068
Мощность горячего твэла FdH	нормальное	1.59	0,024

5.2.5. Результаты тестового расчета

В качестве выходных критериальных параметров, для которых должны быть определены верхние оценки 95/95, выбраны два параметра.

1. Максимальная температура оболочки, °C (PCT).
2. Максимальная эквивалентная степень окисления оболочки, % (ECR);

В соответствии с теоремой Уилкса проведено $N=93$ расчета.

Результаты расчетов критериальных параметров PCT и ECR проиллюстрированы на рис. 5.4, 5.5.

В тестовом примере получены значения верхних границ $PCT = 1136.5$ °C и $ECR = 2.48$ %, удовлетворяющие критериям безопасности.

Заключение

Приведены материалы работы, посвященной созданию кода вероятностных расчетов (BP) критериальных характеристик твэлов в условиях нормальной эксплуатации и постулируемых аварий типа LOCA. Работа выполнена на основе применения кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP.

На основе выполненных исследований определена методика проведения BP. За основу принят метод GRS, который разработан в рамках CSAU подхода. Он использует формулу типа Wilks [13, 14, 23] для определения необходимого количества запусков программы и до настоящего времени является наиболее используемым на практике.

В разработанном программном коде заложена возможность изменения как числа, так и самих параметров, подлежащих варьированию.

По результатам разработки методики проведения BP и анализа параметров кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP определена архитектура аппаратного обеспечения программного кода BP.

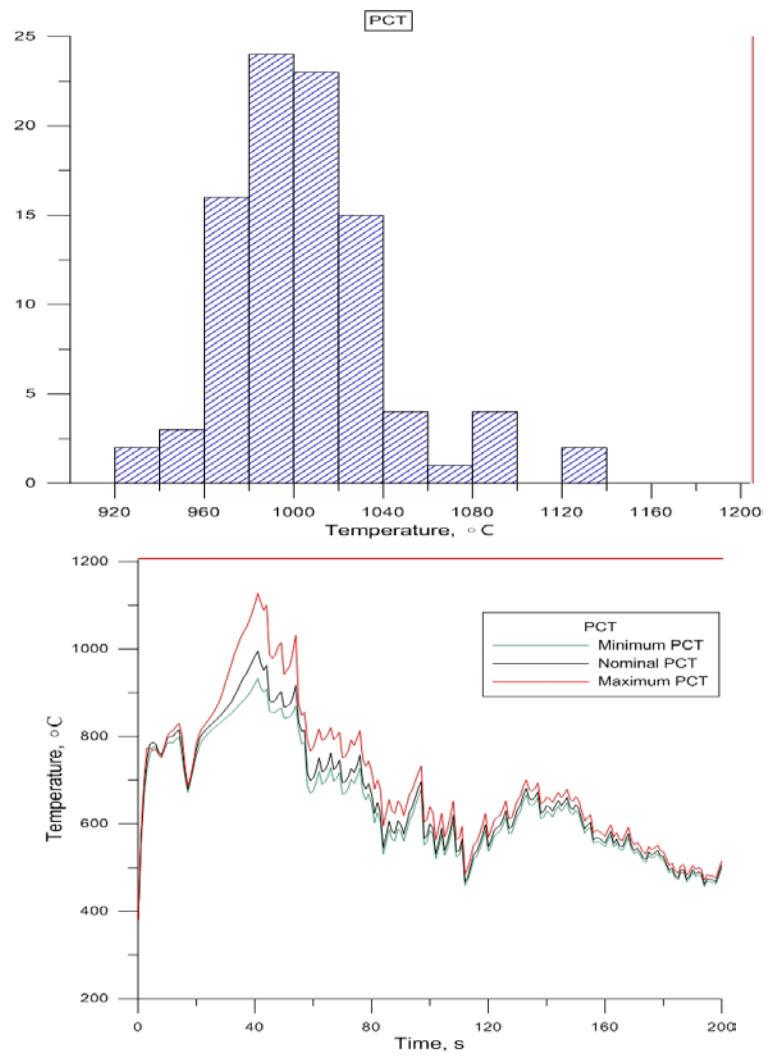


Рис. 5.4. Гистограмма распределения результатов 93 расчетов РСТ, изменение температуры оболочки в процессе аварии в расчетах с реализацией max, nom, min РСТ

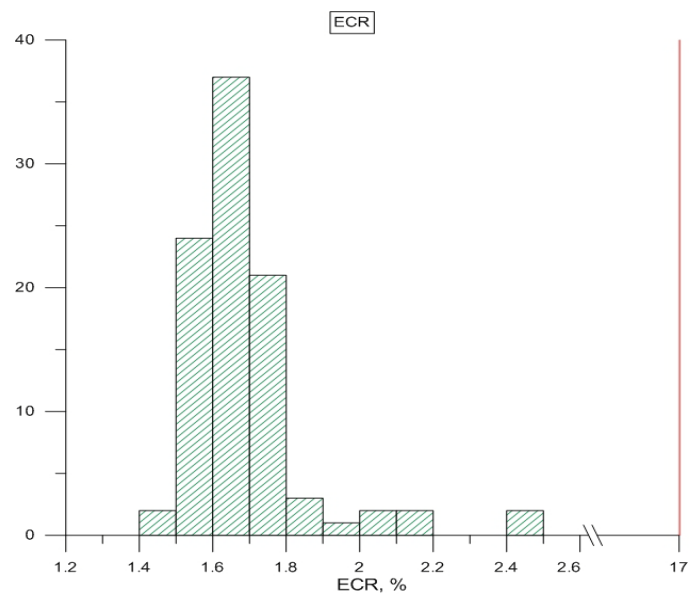


Рис. 5.5. Гистограмма распределения результатов 93 расчетов ECR

Описана программная реализация общей блок-схемы решения задачи в виде программного кода (комплекса). Для него выполнен тестовый вероятностный расчет с учетом наиболее значимых параметров задачи. В коде реализован многовариантный расчет решения задачи. Код оснащен разработанным графическим интерфейсом для представления полученных результатов ВР.

В комплексе реализована возможность выбора коммуникативных схем связей между кодами START-3, RAPTA-5.2, RELAP и, соответственно, выбора структуры итерационного цикла для последовательного уточнения входных данных, получаемых из перечисленных программ, и определения критерия прекращения итераций.

Разработанный код соответствует процедурам CSAU/EMDAP и позволяет получать реалистические оценки основных критериальных параметров твэлов, в частности, для условий LOCA, максимальной температуры оболочки PCT, максимальной эквивалентной степени окисления оболочки ECR, с оценкой их неопределенностей в виде доверительного интервала и заданного уровня доверия. Комплекс включает программные коды START-3 и RAPTA-5.2 и интерфейсные данные кода RELAP.

Проведены тестовые расчеты по разработанному комплексу с использованием файлов эффективных коэффициентов теплоотдачи (со случайным множителем) и температур теплоносителя в LOCA, полученных в результате расчета по коду RELAP.

Тестовый пример показал работоспособность разработанного комплекса.

Список литературы

1. US Federal Law 10 Code of Federal Regulation. Part 50 and Appendices.
2. Boyack B., et al., Quantifying reactor safety margins // Nuclear Engineering and Design, 1990, vol. 119, issue 1, pp. 1-117.
3. Young M.Y., et al., Application of code scaling applicability and uncertainty methodology to the large break loss of coolant // Nuclear Engineering and Design, 1998, vol. 186, issue 1, pp. 39-52.
4. Zhang J., et al., Application of the WCOBRA/TRAC best-estimate methodology to the AP600 large-break LOCA analysis // Nuclear Engineering and Design, 1998, vol. 186, issue 1, pp. 279-301.
5. Ortiz M.G., Ghan L.S. Uncertainty analysis of minimum vessel liquid inventory during a small break LOCA in a Babcock and Wilcox Plant: an Application of the CSAU methodology using the RELAP5/MOD3 computer code // Rep, NUREC/CR-5818, EGG-2665, Idaho National Engineering Lab., ID (1992).
6. Best estimate safety analysis for nuclear power plants: uncertainty evaluation // Safety reports series No. 52. International Atomic Energy Agency, Vienna, 2008.
7. H. Glaeser, GRS Method for Uncertainty and Sensitivity Evaluation of Code Results and Applications, Science and Technology of Nuclear Installations, 2008.
8. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Методы численного анализа математических моделей. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 591 с.
9. Медведев А.В., Богатырь С.М., Корицын Л.В., Кузнецов В.И., Лаговский В.Б., Хвостов Г.А., Бибилашвили Ю.К. СТАРТ-3: Программа для прочностного и теплофизического расчета полномасштабного твэла в базовых и маневренных режимах работы твэлов тепловых и быстрых реакторов, ФНР ЯРБ, регистрационный номер 76 паспорта аттестации программного средства от 22.09.97.

10. Программное средство РАПТА-5.2. НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, паспорт аттестации ПС № 299 от 29.09.2011.
11. RELAP/SCDAPSIM/MOD3.4 Code Manual. Innovative Systems Software, LLC, 2003.
12. U.S. Nuclear Regulatory Commission, "Standard Review Plan", NUREG-0800, Rev.3.
13. Wilks S.S., Determination of sample sizes for setting tolerance limits //Annals of Mathematical Statistics, 1941, vol. 12, pp. 91-96.
14. Pal L. and Makai M., Remarks on statistical aspects of safety analysis of complex systems //KEKI Atomic Energy Research Institute H-1525 Budapest 114 POB 49 Hungary, 2002.
15. Glaezer H., Uncertainty evaluation of thermal-hydraulic code results //Best estimate methods in nuclear installation safety analysis, (Proc. Int. Mtg. Washington, DC, 2000), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2000) CD-ROM.
16. Wickett T., et al., Report of the uncertainty methods study for advanced best estimate thermal hydraulic code applications, 2 vols, Rep. NEA/CSNI R(97)35, OECD, Paris (1998).
17. Depisch F., Seeberger G., Blank S., "Application of best-estimate methods to LOCA in a PWR" // paper presented at OECD/CSNI Seminar on Best Estimated Methods in Thermal-hydraulic Safety Analysis, Ankara, 1998.
18. Luxat J.C., et. Al., Development and application of Ontario Power Generation`s best estimate nuclear safety analysis methodology // Best Estimated Methods in Nuclear Installations Safety Analysis (Be-2000) (Proc. Int. Mtg Washington, DC, 2000), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2000) CD-ROM.
19. Sills H.E., et al., Best estimate methods for safety margin assessments // Best Estimated Methods in Nuclear Installations Safety Analysis (Be-2000) (Proc. Int. Mtg Washington, DC, 2000), American Nuclear Society, La Grange Park, IL (2000) CD-ROM.
20. Н.П. Бусленко, Д.И. Голенко, И.М. Соболев, В.Г. Срагович, Ю.А. Шрейдер. Метод статистических испытаний (метод Монте-Карло). М.:Физматгиз. 1962. 332 с.
21. С.М. Ермаков, Г.А. Михайлов. Курс статистического моделирования. М.: Наука, Физматлит. 1976. 320 с.
22. И.М. Соболев. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, Физматлит. 1973. 312 с.
23. С. Уилкс. Математическая статистика. М.: Наука, Физматлит. 1967. 632 с.
24. Press, W. H. et al. Numerical Recipes in FORTRAN: the art of scientific computing. 2 Ed. Cambridge University Press. 1992. Chapter 7.
25. Д. Кнут. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2. Получисленные алгоритмы. М.: Мир. 1977. 726 с.
26. M. Matsumoto and T. Nishimura, "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator", ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation Vol. 8, No. 1, January pp.3-30 (1998)
[DOI:10.1145/272991.272995](https://doi.org/10.1145/272991.272995)
27. М. Абрамовиц, И. Стиган. Справочник по специальным функциям. М.:Наука, Физматлит. 1979. 832 с.
28. Г. Крамер. Математические методы статистики. М.: Мир. 1975. 648 с.

29. B.E. Boyackatal. Phenomenon Identification and Ranking Tables (PIRTs) for Loss-of-Coolant Accidents in Pressurized and Boiling Water Reactors Containing High Burnup Fuel //NUREG/CR-6744, LA-UR-00-5079, 2001.
30. L.E. Hochreiter et al. Dispersed Flow Heat Transfer Under Reflood Conditions in a 49 Rod Bundle: Test Plan and Design — Results From Tasks 1-10. PSU ME/NE – NRC-04-98-041 (Draft NUREG/CR-6671), Pennsylvania State University, 2000.
31. M.E. Nissley et al. Realistic Large-Break LOCA Evaluation Methodology Using the Automated Statistical Treatment of Uncertainty Method (ASTRUM) //WCAP-16009-NP, Westinghouse Electric Company, 2003.
32. Realistic Large Break LOCA Methodology for Pressurized Water Reactors, EMF-2103(NP), Rev.0. Framatome ANP Richland, 2001.

Оглавление

Введение и постановка задачи	3
1. Краткий обзор вероятностных методик	6
2. Методика вероятностных расчетов	8
3. Структура кода CaPpaPI	12
4. Графический интерфейс программного кода CaPpaPI	18
4.1. Постпроцессор	18
4.2. Графическая среда сопровождения серии испытаний	24
5. Примеры работы программного кода CaPpaPI	28
5.1. Тестирование программного кода	28
5.2. Проведение тестового расчета горячего твэла в аварии LOCA с использованием заданных функций распределения для ключевых параметров, моделей и интерфейсных данных	30
5.2.1. Алгоритм и программная реализация статистической методики анализа LOCA с использованием кодов START-3, RAPTA-5.2, RELAP	30
5.2.2. Учет неопределенности расчета интерфейсных параметров кодом RELAP	30
5.2.3. Учет неопределенности распределения мощности в активной зоне реактора	32
5.2.4. Учет неопределенностей ключевых параметров и моделей твэла для анализа LOCA	32
5.2.5. Результаты тестового расчета	35
Заключение	35
Список литературы	37