

А.Н. Соколов¹, А.А. Баринов¹, А.Е. Хробостов², И.А. Коновалов², А.А. Чесноков²

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ВАРИАНТНЫХ РАСЧЕТОВ ПО ОБОСНОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДО-ВОДЯНОГО ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

¹Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова

²Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена методика проведения вариативных расчетов при проектировании перспективных комплексов систем безопасности. Изложена методология генерации наборов варьируемых технических параметров реакторной установки, а также предложены способы визуального представления пространства решений, получаемых в результате вариативных расчетов. Апробация представленной методики производилась на примере поиска пространства решений для системы аварийного расхолаживания и системы охлаждения активной зоны в условиях аварии ЛОСА при помощи связки расчетных кодов КУПОЛ-МТ-КОРСАР/BR.

Ключевые слова: вариативные расчеты, система аварийного расхолаживания, система аварийного охлаждения активной зоны, водо-водяной реактор.

Введение

На современном этапе развития атомного машиностроения одной из важнейших задач является разработка и расчетное обоснование инновационных комплексов систем безопасности (КСБ), построенных на пассивных принципах действия, в части требуемого состава систем, алгоритмов их работы и режимных параметров. Составной частью работ по обоснованию КСБ и их отправной точкой при этом должно являться определение области технических параметров реакторной установки (РУ), при которых КСБ может быть реализован и выполнять свои функции. Далее данную область параметров будем называть пространством решений, имея в виду, что каждая точка данного пространства представляет собой комбинацию технических параметров КСБ, обеспечивающих решение задачи безопасности РУ. По своей сути пространство решений представляет собой все возможные варианты корректно (с точки зрения решаемых задач) спроектированного КСБ. В то же время очевидно, что не все эти варианты являются оптимальными с той или иной точки зрения (могут содержать излишние запасы сред, быть металлоемкими, дорогими в изготовлении, нереализуемыми с точки зрения компоновки и т.д.)

Для нахождения пространства решений необходимо определить, какие функции должен выполнять КСБ, что является «критерием(-ями) успеха», какие технические параметры реакторной установки (как относящиеся непосредственно к КСБ, так и к другим системам) влияют на функционирование комплекса, какие комбинации величин технических параметров, обеспечивают выполнение комплексом своих функций?

Получение пространства решений позволяет перейти к проведению технико-экономической оптимизации параметров реакторной установки для определения оптимальных конфигураций КСБ, явлений и технических решений, требующих экспериментальной проверки и обоснования (составление плана НИОКР) и проведению анализа чувствительности и неопределенности расчетов поведения реакторной установки в аварийных режимах; которые являются следующими шагами проектирования.

В рамках данной работы рассматриваются методические задачи, встающие при нахождении пространства решений, и заключающиеся в получении наборов технических параметров РУ, необходимых для выполнения вариантных расчетов, а также визуальном

представлении пространства решений, с учетом его многомерности, для выбора целесообразных конфигураций КСБ. Рассмотрение указанных задач производилось на примере поиска пространства решений для системы аварийного расхолаживания (САР) и системы охлаждения активной зоны (САОЗ), входящих в состав КСБ интегрального реактора. исходя из моделирования постулируемой аварии с потерей теплоносителя первого контура (Loss Of Coolant Accident, LOCA) с полным мгновенным разрывом трубы наибольшего поперечного сечения (реактор-компенсатор давления) с наложением дополнительных отказов.

Описание рассматриваемого КСБ

В качестве систем безопасности рассматривается применение двух возможных вариантов комбинированных систем разработки АО «ОКБМ Африкантов», изображенных на рис. 1. Обе указанных системы позволяют осуществлять аварийный теплоотвод, а также имеют возможность совмещения функций безопасности и нормальной эксплуатации (приемника тепла для планового расхолаживания-разогрева РУ). Теплоотвод осуществляется в двух режимах:

- при работе обоих теплообменников системы. Лимит времени работы в данном режиме ограничен запасами воды, испаряемой из цистерны (ЦАР) водяного теплообменника. Достижимая мощность теплоотвода при этом максимальна и рассчитывается, исходя из необходимой мощности теплоотвода на первом этапе аварии при высоких значениях остаточных тепловыделений и высоком давлении в 1 контуре в авариях LOCA;
- при работе только воздушного теплообменника. Системы переходят в данный режим автоматически после исчерпания запасов воды в ЦАР. Достижимая мощность теплоотвода при этом значительно ниже, чем при работе с двумя теплообменниками системы, однако при этом отсутствует лимит времени работы, т.к. тепло передается неограниченному по теплоемкости конечному поглотителю – атмосферному воздуху.

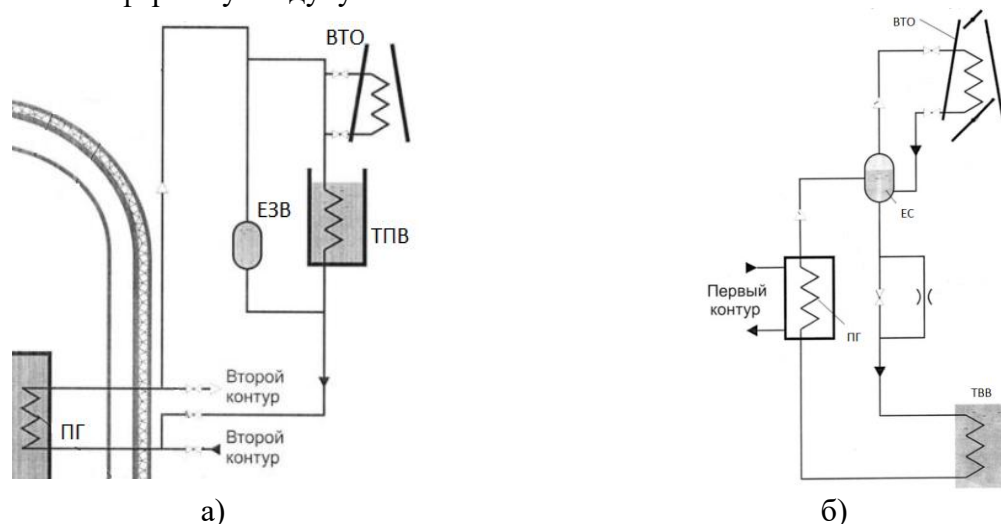


Рис. 1. Схемы вариантов систем аварийного расхолаживания:

ПГ – парогенератор; ЕЗВ – емкость запаса воды; ВТО – воздушный теплообменник-конденсатор;

ТПВ – теплообменник пар-вода; ТВВ – теплообменник вода-вода; ЕС – емкость-сепаратор

а) комбинированная система с водяным и воздушным теплообменниками-конденсаторами [1];

б) комбинированная система с воздушным теплообменником-конденсатором и низкорасположенным водяным теплообменником [2]

Системы имеют различные динамические характеристики (поведение в переходных процессах), преимущества и недостатки, определяющие целесообразность применения того или иного варианта для конкретного проекта. Предложенная САОЗ аналогична пассивному каналу САОЗ головной реакторной установки РУ РИТМ-200, примененной для атомного ледокола типа «Арктика». Схема системы представлена на рис. 2.

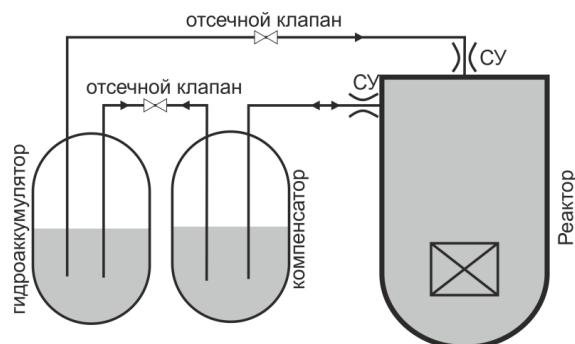


Рис. 2. Схема системы аварийного охлаждения активной зоны, совмещенной с системой компенсации давления

САОЗ состоит из гидроаккумулятора (ГА) и трассы «гидроаккумулятор-реактор» с отсечной арматурой и сужающим устройством между ними. В нормальной эксплуатации ГА выполняет функции компенсации давления, для чего гидроаккумулятор соединен с компенсатором давления (КД) по воде трассой с отсечной арматурой. При возникновении аварийного сигнала по падению давления первого контура закрывается отсечная арматура на трассе «КД-ГА» и открывается арматура на трассе «ГА-реактор». Конкретный алгоритм ввода системы в работу может меняться в проекте. При снижении давления в реакторе возникает превышение давления в ГА над давлением в реакторе и за счет перепада давлений возникает расход, компенсирующий истечение из реактора в разрыв. Тем самым, уровень в реакторе поддерживается необходимым для обеспечения однофазной циркуляции по 1 контуру (через верхние переливные окна парогенератора ПГ). Охлаждение активной зоны за счет работы САОЗ происходит за счет низкой температуры недогретой воды, приходящей из ГА в реактор. В реакторе вода может нагреваться до линии насыщения при давлении в 1 контуре и испаряться, осуществляя теплосъем от активной зоны и уходя в разрыв в виде пара. Таким образом, рассматриваемые системы имеют ряд параметров, варьируемых в широком диапазоне и оказывающих наибольшее воздействие на работоспособность данных систем, что обуславливает целесообразность применения изложенной далее методологии.

Методика вариантных расчетов

Генерацию точек K -мерного пространства параметров целесообразно производить в нормализованном виде $\overline{P}_i^k \in [0,1]$, где каждая размерность свернута в единичный отрезок. Таким образом облегчается визуализация и анализ распределений параметров, в то время как получение конкретной расчетной комбинации из нормализованного вида производится при помощи перенормировки на соответствующие диапазоны изменения параметров $P_i^k = \overline{P}_i^k \cdot (P_{\max}^k - P_{\min}^k) + P_{\min}^k$.

Наибольшее развитие методы вариантных расчетов получили в задачах инженерной многопараметрической оптимизации. По этой причине дальнейшее рассмотрение ведется в терминах задач оптимизации несмотря на то, что решаемая в рамках отчета задача поиска

пространства решений является лишь предшествующим для оптимизации шагом. Введем специфическую для данной задачи терминологию и обозначения.

D – K -мерное непрерывное пространство поиска;

x – набор (вектор) размерности K варьируемых параметров $x \in D \subset \mathfrak{R}^K$. Как правило каждый варьируемый параметр набора имеет свой физически обусловленный диапазон значений $x_i \in [x_i^0, x_i^1]$, который нормируется путем преобразования $\frac{x_i - x_i^0}{x_i^1 - x_i^0}$ в единичный

отрезок $[0,1]$ для удобства представления. Таким образом 0 соответствует нижней границе диапазона i -го параметра, а 1 – верхней границе.

$f(x)$ – целевая функция. Это некоторая величина, отвечающая конкретному набору (вектору) варьируемых параметров (примером может служить вес крыла самолета в зависимости от его параметров: размеров, грузоподъемности, скорости, мощности двигателей и т.д.).

Бюджет расчетов N – максимальное число вариантных расчетов, доступное инженеру для проведения расчетного анализа, который обусловлен различными факторами, главные из которых – доступное процессорное время и средняя вычислительная сложность одного расчета.

$X(1:N)$ – план вариации, представляющий собой некоторую совокупность векторов x в количестве N штук, сгенерированных для проведения вариантных расчетов. X является дискретным подмножеством D .

Генерация наборов параметров для вариантных расчетов может выполняться с использованием нескольких подходов.

Вариация задачи с K параметрами может быть выполнена в т.н. полнофакторном подходе. При этом, если диапазон каждого параметра представляется при помощи n значений, то полное число расчетных вариантов равняется $\prod_{i=1}^K n = n^K$. Полнофакторное

пространство поиска в случае $K=3$ может быть представлено (в нормированном виде) как единичная кубическая область с равномерным заполнением точками плана вариации (рис. 3).

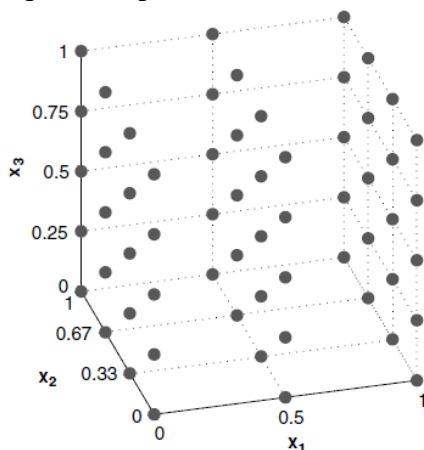


Рис. 3. Пространство поиска для $K=3$ параметров в полнофакторном подходе для 3, 4 и 5 вариаций соответственно

Естественно, что для многокритериальных задач число точек для исследования пространства поиска в полнофакторном подходе растет экспоненциально. Еще одним недостатком данного подхода является планов вариации строго определенного размера (например, нельзя «уложить» бюджет из доступных 17-ти расчетов в рамки данного подхода для K -параметрической задачи, т.к. простое число 17 не может быть получено перемножением K чисел больше 1 и меньше 17-ти). Преимуществом полнофакторного подхода является наилучшая «заполняемость» пространства поиска вариантными комбинациями, по-

сколькx план вариации полностью регулярен. Другим подходом является т.н. метод латинского гиперкуба (Latin Hypercube Sampling, LHS), при котором доступный бюджет из N расчетов распределяют по пространству поиска таким образом, чтобы получались однозначные и регулярные проекции из N точек на каждую его размерность (рис. 4).

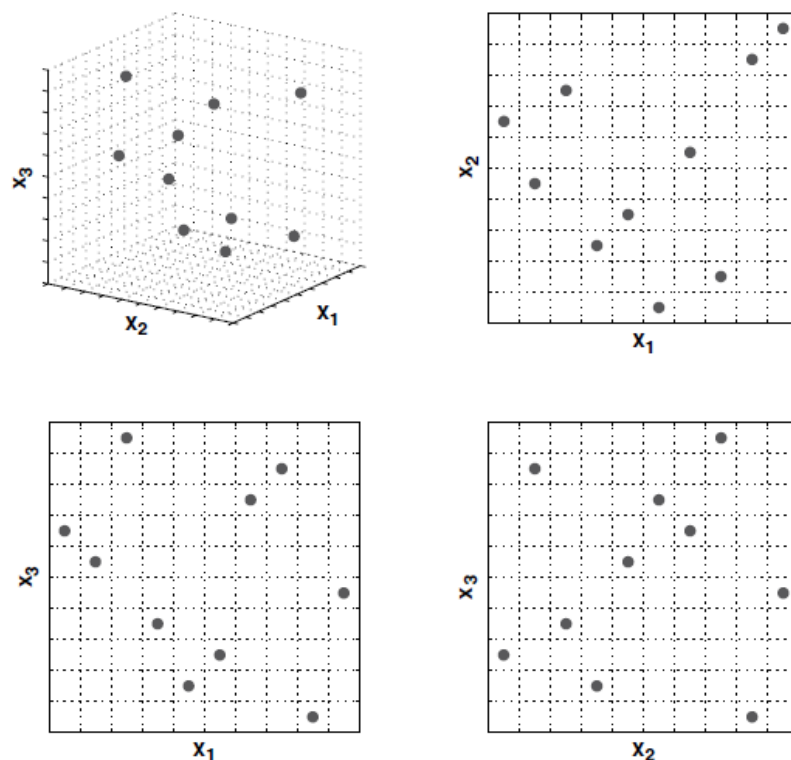


Рис. 4. Пространство поиска для $K=3$ параметров в подходе латинского гиперкуба (бюджет из $N=10$ вариантных расчетов, показан один из возможных вариантов)

Недостатком такого подхода является существование множества различных комбинаций (планов вариации), удовлетворяющих данному условию, причем их число резко растет вместе с ростом числа параметров и вариантных разбиений (например, в пространстве $K=2$ параметров для $N=4$ точек число возможных комбинаций равно 576, а уже для $N=8$ точек – 108 776 032 459 082 956 800, не говоря о задачах с большим числом параметров). Данный недостаток приобретает значимость в том свете, что в отличие от полнофакторного метода, «заполняемость» пространства методом латинского гиперкуба может быть недостаточной (так, например, для $K=2$ -мерной задачи требованиям разбиения удовлетворяет набор из вариантных расчетов, стоящих на любой диагонали квадрата, что, конечно, не оптимально с точки зрения заполнения области). Таким образом, для данного разбиения требуется:

а) генерация комбинаций параметров согласно требованиям латинского гиперкуба, что является отдельной задачей вследствие большого числа возможных комбинаций;

б) диагностика конкретных вариантов комбинаций на «заполняемость» пространства поиска, для чего существует ряд критериев (критерий максимина Джонсона [3] или тай-брейк Морриса и Митчела [4]). При неудовлетворительном заполнении необходимо подобрать другую комбинацию параметров. Как правило, вычислительная сложность подбора комбинации из N расчетов с приемлемым заполнением при помощи подхода латинского гиперкуба весьма велика, поэтому ограничиваются определенным количеством процессорного времени на поиск комбинаций и выбирают наилучшую из получившихся. Методы генерации плана вариации в данном подходе, а также метрика для их сравнения подробно описана в [5]. Существует также подход к составлению плана вариации при

помощи генератора случайных чисел [6] – в этом случае генерируемый план вариации оказывается максимально нерегулярным (как по отдельным проекциям, так и в целом по пространству). Такой подход оправдан при исследовании вероятностного распределения целевой функции, например при исследованиях робастности. Однако, как правило, для задач с небольшим бюджетом вычислений такой подход дает крайне неравномерную заполняемость пространства поиска, что негативно сказывается на показателности вариантных расчетов, в том числе – с точки зрения поиска пространства решений. В некоторых случаях, однако, строго регулярное распределение является нежелательным – например, при наличии гармонического отклика целевой функции на некоторые параметры.

В данной работе был выбран метод латинского гиперкуба, вследствие ограниченности бюджета вычислений (N порядка 100), достаточно большой ($K=4$) размерности пространства поиска и относительно высокой вычислительной сложности расчетов (один расчет занимает порядка 6,5 часов процессорного времени на ПК с Core i5-3450 8Gb ОЗУ в режиме загрузки 4 ядер).

Методология определения пространства решений для КСБ при аварийных ситуациях, связанных с LOCA

Задачей начального этапа ставилось определение критериев успеха при поиске пространства решений, под которыми в рамках данной работы подразумевается сохранение значения определенного численного параметра, характеризующего состояние РУ и/или систем, в указанном диапазоне в течение рассматриваемого промежутка времени. Выполнение критерия успеха для того или иного сочетания параметров означает принадлежность данного сочетания к пространству решений. В настоящем анализе критерием успеха принимается поддержание уровня над а.з. не ниже верхнего среза чехла кассет ПГ в течение расчетного (3 суток) интервала времени. Такой выбор обусловлен тем, что в авариях с потерей теплоносителя первого контура (LOCA) сохранение температуры топливной матрицы и оболочки ТВЭЛов в допустимых пределах гарантируется при сохранении уровня внутри реактора над верхним срезом активной зоны в течение необходимого времени.

На следующем этапе была определена номенклатура варьируемых параметров РУ, составляющих пространство поиска (табл. 1).

Таблица 1

Номенклатура и диапазоны варьируемых параметров применительно к поиску пространства решений для САР и САОЗ

№	Наименование параметра	Обозначение
1	Относительная полная мощность САР при температуре 1 контура на выходе а.з. 300 °С и наличии однофазной циркуляции по 1 контуру в диапазоне 5-7% от расхода на номинальном уровне мощности	_kNSar
2	Запас воды в цистерне теплообменника вода-вода (ЦАР)	_mv0Tvv
3	Объем ГА САОЗ, совмещенных с системой КД	_vGa
4	Эквивалентный диаметр дроссельной шайбы, через который осуществляется проливка ГА в разрывной аварии	_dDrossGa

Таким образом, поиск пространства решений осуществляется в $K = 4$ -мерном пространстве поиска. Для проведения вариантных расчетов использовалась итерационная расчетная модель в коде КОРСАР/BR [7], составленная по объектному принципу и состоящая из трех моделей: парогенерирующего блока, системы компенсации давления (включающей ГА САОЗ) и системы залива кессона реактора водой.

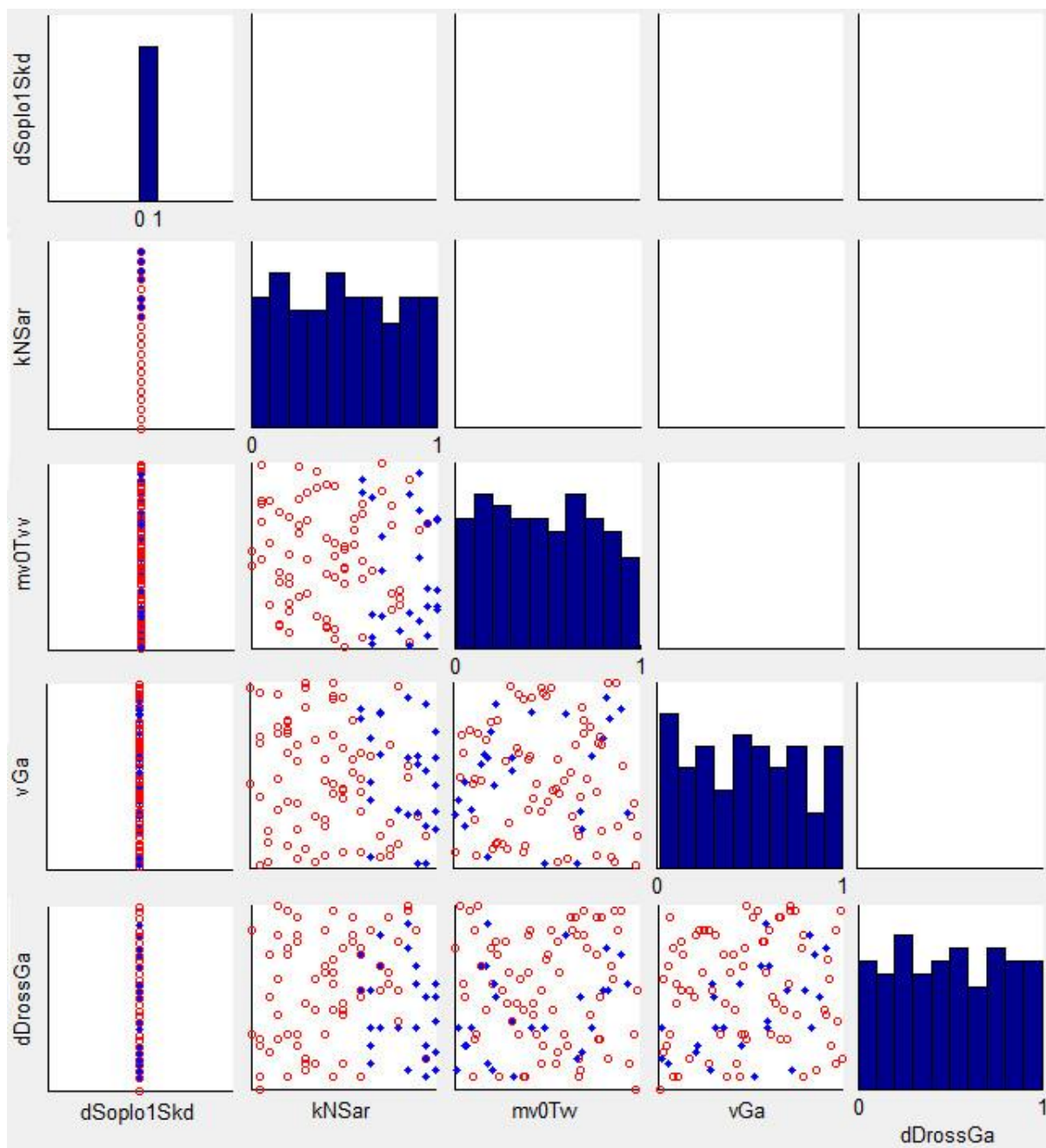


Рис. 5. $K=5$ параметрическое пространство поиска с вариацией 4-х параметров

Итерационная расчетная модель создана в следующих предпосылках:

- 4 петли 1 контура моделируются эквивалентно (предполагается симметрия параллельных внутриреакторных трактов). Распределение объема воды 1 контура, геометрические параметры, основные массы металлоконструкций приведены в соответствии с проектными значениями;
- мощность остаточных тепловыделений задавалась в виде объемного источника тепла в эквивалентной металлоконструкции а.з. и определялась по формуле Пологих [8] для первых 72 часов после сброса АЗ реактора с учетом предыстории его работы на номинальном уровне мощности.

Для выполнения вариантных расчетов в автоматизированном режиме в ходе работы была создана утилита Uq. Утилита Uq позволяет производить формирование необходимых

сочетаний варьируемых параметров, подготовку расчетной директории, пакетный запуск и обработку результатов расчетов на нескольких ядрах ПК. Утилита адаптирована для проведения вариантных расчетов при помощи связки кодов КУПОЛ-МТ-КОРСАР/BR с текстовой зоной задания. Генерация расчетных комбинаций в рамках данной работы осуществлялась по методу LHS с бюджетом в 100 расчетов.

Обработка результатов расчетов производилась при помощи пакетного запуска утилитой Uq программы-обработчика (получение временных реализаций расчетных параметров при помощи утилиты KUTIL2 кода КОРСАР/BR) и набора скриптов пакета Matlab (группировка и отбор реализаций по критериям успеха, визуализация пространства параметров и основных зависимостей). В качестве критериев успеха для данной серии расчетов было принято одновременное выполнение следующих условий:

- 1) расчет достиг конца интервала моделирования (72 часа = 259200 сек) аварии;
- 2) уровень в реакторе не опускался ниже 0,7 отн.ед. над а.з. за время моделирования.

Анализ результатов

Для визуального представления результатов проведенных вариантных расчетов было выбрано несколько форматов сводных диаграмм. На рис. 5 представлены двумерные проекции комбинаций параметров из полного пространства поиска и подмножества пространства решений (закрашенные точки), определенного в ходе вариантных расчетов. Визуализация результатов расчетов по достигнутому времени выполнения представлена на рис. 6.

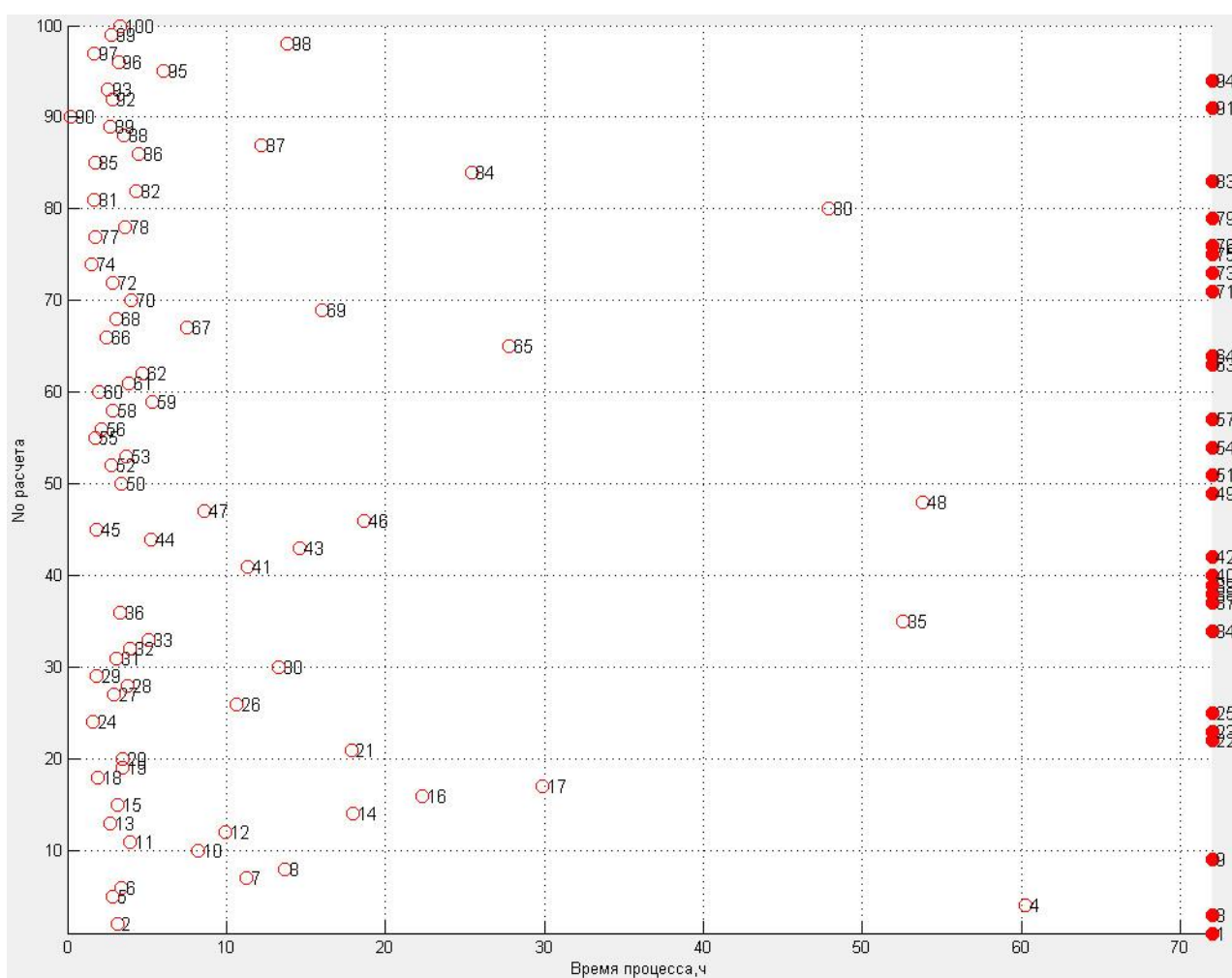


Рис. 6. Распределение расчетов по достигнутому времени выполнения

Отобранные по критерию успеха расчеты образуют подмножество из пространства решений (26 расчетов). Полученные результаты могут быть использованы как непосредственно (для обоснования того или иного сочетания параметров систем при проектировании), так и являться основой для дальнейшей технической или технико-экономической оптимизации. Для решения оптимизационной задачи необходимо сформулировать целевую функцию, максимизация или минимизация которой при существующих ограничениях на изменения параметров будет означать достижение оптимального решения. Естественно, что оптимальная точка (комбинация варьируемых параметров) принадлежит пространству решений. Наиболее простой пример оптимизации может быть проведен путем задания целевой функции согласно следующему выражению (1):

$$F(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^K x_k W_k, \quad (1)$$

где x_k – нормированное значение k -го параметра из комбинации ($x_k \in [0,1]$), W_k – вес k -го параметра в сумме (может быть как отрицательным так и положительным числом). Пользуясь, в качестве примера, данной целевой функцией при единичных весах параметров, можно найти минимальное ее значение на полученном множестве решений по трем параметрам: объем ГА, запас воды в ЦАР, суммарная мощность САР (что может быть интерпретировано как удорожание системы с ростом вышеперечисленных параметров, каждый из которых в равной мере оказывает влияние на ее стоимость). Таким образом, целевая функция оптимизации может принимать различный вид, состав и веса параметров в которой должны выбираться исходя из задач проектирования при помощи подходящего метода обобщения экспертных оценок.

Заключение

Была апробирована методология проведения вариантных расчетов по выбору параметров систем безопасности. Несмотря на поверочный характер каждого отдельного расчета (проверка критериев успеха той или иной комбинации технических параметров), данная методология является инструментом проектирования, который может быть использован для решения многопараметрических инженерных задач. Методология адаптирована для проведения расчетов по связке системных LP-кодов КОРСАР/BR-КУПОЛ-МТ.

Дальнейшая работа направлена на уточнение итерационной расчетной модели путем добавления в нее модели ЗО, а также проведения поверочных расчетов отдельных вариантов КСБ, принадлежащих пространству решений, по полной интегральной модели РУ повышенной вычислительной сложности, включающей реалистичные модели САР, активной зоны, ЗО, СЗКРВ и ряда других элементов.

Библиографический список

1. Патент РФ RU153272U1, 10.07.2015. Энергетическая установка // Патент России №153272 / Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Соколов А.Н.
2. Патент РФ RU152416U1, 27.05.2015. Система аварийного отвода тепла // Патент России №152416 / Пахомов А.Н., Хизбуллин А.М., Соколов А.Н., Шмелев Д.И., Пейч Н.Н.
3. **Johnson, M.E.** Minimax and maximin distance designs / M. E. Johnson, L. M. Moore, D. Ylvisaker // Journal of Statistical Planning and Inference. – 1990. – No. 26. – P. 131-148.
4. **Morris, M.D.** Exploratory designs for computational experiments / M. D. Morris, T. J. Mitchell // Journal of Statistical Planning and Inference. – 1995. – No. 43. – P. 381-402.
5. **Forrester, A.I.J.** Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide / A.I.J. Forrester, A. Sóbester, A.J. Keane // University of Southampton, UK, 2008.

6. **Santner, T.J.** The Design and Analysis of Computer Experiments, Springer-Verlag / T.J. Santner, B. Williams, W. Notz // Berlin. – 2003.
7. **Филин, Р.Д.** Программный комплекс КОРСАР/BR для расчетов в обоснование безопасности реакторов блочной и интегральной компоновки и реакторов типа ВВЭР / Филин Р.Д., Мигров Ю.А., Коротчаев В.Г., Артемов В.Г., Артемова Л.М., Бенедиктов Д.В., Пискарев А.В., Шемаев Ю.П., Гудошников А.Н. // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – ФГУП «НИИ им. А. П. Александрова» – 2015. – № 2 (2). – С. 6-14.
8. **Грибин А.А.** Остаточное энерговыделение продуктов деления U235 тепловыми нейтронами / А.А. Грибин, Б.Г. Пологих // Атомная энергия. – 1981. – Т. 51. – №1. с. 16-19.

*Дата поступления
в редакцию: 08.10.2020*

A.N. Sokolov,¹ A.A. Barinov¹, A.E. Khrobostov², I.A. Konovalov², A.A. Chesnokov²

METHODOLOGY OF VARIANT CALCULATIONS FOR RATIONALE OF SAFETY SYSTEMS PARAMETERS OF PWR

¹Afrikantov OKB Mechanical Engineering

²Nizhniy Novgorod State Technical University n. a. R.E. Alekseev

Purpose: Authors present the methodology of finding and visualization the results of variant calculations

Method of work: A theoretical framework is integrating simplified design models of PWR systems and algorithms of generating variable technical parameters sets of these systems

Findings: Conducted variant calculations using emergency cooling system and emergency core cooling system as examples. Combinations of search space parameters, as well as the distribution of calculations by the achieved execution time are displayed graphically in the form of diagrams

Conclusions: The presented methodology is a design tool that can be used to solve multi-parameter engineering problems. The methodology has been adapted to carry out calculations for a bunch of system LP-codes KORSAR/BR – KUPOL-MT. A series of calculations were performed to determine the solution space for the emergency cooling system and emergency core cooling system included in the complex of safety systems/

Key words: variable calculations, emergency cooling system, emergency core cooling system, pressurized water reactor.