

ПОСТРОЕНИЕ ДЕТЕРМИНИРОВАННЫХ АНАЛОГОВ ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ СЦЕНАРИЕВ РАЗВИТИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

В. С. Окунев

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана, Москва (e-mail: en7@power.bmstu.ru)

Предложен способ построения детерминированных аналогов для решения задач оптимального проектирования ядерных энергетических установок в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций, основанный на предварительном анализе временной зависимости функционалов, характеризующих аварийные режимы.

Ключевые слова: оптимизация; детерминированные аналоги; неопределенности исходной информации; маловероятные аварийные режимы, сопровождающиеся отказом аварийной защиты.

CONSTRUCTION OF THE DETERMINISTIC ANALOGS FOR OPTIMAL DESIGNING OF NUCLEAR REACTOR UNITS UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY OF EMERGENCY DEVELOPMENT SCENARIOS

V. S. Okunev

Bauman Moscow State Technical University, Moscow
(e-mail: en7@power.bmstu.ru)

The method of construction of deterministic analogs for solving problems of optimal designing of nuclear power units under conditions of uncertainty of scenarios of emergency development is offered. This method is based on the preliminary analysis of temporal dependence of the functionals characterizing emergency operation and the analysis of aggravation and neutralization of emergency conditions (with their superposition). In comparison to usage of uniformly distributed sequences for choosing points of area of the initial data uncertainty, in which the deterministic analogs should be formed, the offered method possesses the higher efficiency and accuracy.

Keywords: optimization, deterministic analogs, uncertainties of the initial information, anticipated transient without scram.

Переход к крупномасштабной ядерной энергетике, ожидаемый в нашей стране к середине XXI столетия, требует разработки реакторов нового поколения, обладающих свойством самозащищенности от тяжелых аварий. По своим физико-техническим принципам реакторы на быстрых нейтронах (быстрые реакторы) с жидкометаллическим теплоносителем обладают большим потенциалом в повышении безопасности — возможностью исключения тяжелых аварий [1, 2].

Требование исключения потенциально возможных тяжелых аварий в задачах оптимального проектирования может быть формализовано в виде ограничений для ряда функционалов, характеризующих аварийные режимы работы реактора. К числу таких функционалов (назовем

их функционалами безопасности) относятся максимальные температуры компонентов активной зоны реактора (топлива, теплоносителя, оболочек ТВЭЛОВ), максимальная мощность реактора, давление в полости ТВЭЛА (для сбора газообразных продуктов деления) и др., рассчитанные для аварийных режимов. В первую очередь необходимо рассматривать наиболее опасные аварийные ситуации, сопровождаемые отказом аварийной защиты (известные в литературе под аббревиатурой ATWS (Anticipated Transient Without Scram)).

Начальный этап проектирования ядерной энергетической установки, на котором обычно проводят оптимизационные исследования, характеризуется большими неопределенностями. Неопределенности присущи ядерно-физическим, теплофизическим, прочностным свойствам материалов. Они могут быть связаны с технологическими неточностями при изготовлении элементов конструкции реактора, со стоимостью материалов.

Задачам оптимального проектирования безопасных реакторов присущи неопределенности в коэффициентах и эффектах реактивности (наибольшие неопределенности связаны с расширением опорного коллектора и достигают 20 % [3]). Большие неопределенности могут быть связаны с поведением реактора в аварийных ситуациях с неопределенностями сценариев развития аварийных режимов, зависящих в свою очередь от неопределенностей коэффициентов и эффектов реактивности. Неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций оказывают гораздо большее влияние на выбор оптимальной компоновки активной зоны, поскольку ограничения для функционалов, характеризующих аварийные режимы, как правило, активны. Стремление получить безопасную компоновку реактора уже на начальном этапе проектирования требует учета неопределенностей сценариев развития аварийных ситуаций [4].

Формулировка задачи. Задачу оптимизации активной зоны в условиях неопределенности сценариев развития аварийных режимов удобно сформулировать как задачу с неопределенными данными (когда известна область допустимых значений данных и отсутствует информация о вероятности распределения данных в этой области).

Задачу оптимального проектирования (в общем случае многокритериальную) в условиях неопределенности исходных данных можно сформулировать в следующем виде. Найти вектор управления $\mathbf{u} = \{u_k\}$ с компонентами из области определения U

$$u_k^{\min} \leq u_k \leq u_k^{\max}, \quad k = 1, 2, \dots, K,$$

при которых функционалы $F_i(\mathbf{u})$ принимают оптимальные значения

$$F_i(\mathbf{u}) \rightarrow \text{opt}(\min \vee \max), \quad i = 1, 2, \dots, I,$$

и выполняются ограничения для ряда функционалов $F_i(\mathbf{u})$:

$$F_i(\mathbf{u}) \leq F_i^{\max}, \quad i = I + 1, I + 2, \dots, J.$$

Здесь F_i^{\max} — максимально допустимые значения соответствующих функционалов. Все функционалы зависят от вектора управления, вектора исходных данных $\mathbf{w} = \{w_n\}$ из области определения $w_n^{\min} \leq w_n \leq w_n^{\max}$ ($n = 1, 2, \dots, N$) и переменных состояния, удовлетворяющих уравнениям, которые описывают поле плотности потока нейтронов, температуры компонентов активной зоны, изменение нуклидного состава топлива и др. с заданными дополнительными (начальными и граничными) условиями (непрерывности плотности потока нейтронов и непрерывности плотности тока нейтронов на границах раздела двух сред, равенства нулю плотности потока на экстаполированной границе, заданной концентрации атомных ядер на начало работы реактора и др.). Исходные данные \mathbf{w} неопределенны. Будем считать, что диапазон изменения данных w_n определяется лицом, принимающим решение из общих соображений, т.е. известны w_n^{\min} и w_n^{\max} ($n = 1, 2, \dots, N$).

Следует отметить, что методические положения по выполнению оптимизационных расчетов в энергетике при неоднозначности исходных данных были сформулированы к концу 1970-х годов [5]. В это же время сотрудниками МИФИ, ФЭИ и Курчатовского института были получены первые оценки влияния неопределенностей исходных данных на оптимальную компоновку активной зоны быстрого реактора [6]. В качестве единственного критерия оптимальности рассматривался один из натуральных (коэффициент воспроизводства, время удвоения системы реакторов и др.) или экономических (стоимость произведенной электроэнергии, капитальные вложения в АЭС и др.) показателей АЭС с быстрым реактором с натриевым охлаждением (БН), а в качестве ограничений — ограничения для функционалов, характеризующих режим работы реактора на номинальной мощности.

Задачи оптимизации активной зоны быстрых реакторов с ограничениями, включая ограничения для функционалов безопасности (максимальные температуры компонентов активной зоны, мощность и др.), соответствующие наиболее опасным аварийным режимам работы реактора, сопровождающимся отказом аварийной защиты, впервые решены автором настоящей работы [7]. С помощью расчетно-оптимизационного комплекса ДРАКОН-М [7] впервые получены результаты решения таких задач в условиях неопределенности исходной информации. Результаты представлены в работе [8].

Модель активной зоны. Предполагается, что активная зона реактора на быстрых нейтронах, окруженная отражателем (зонами воспроизводства или экраном из не воспроизводящего материала), имеет

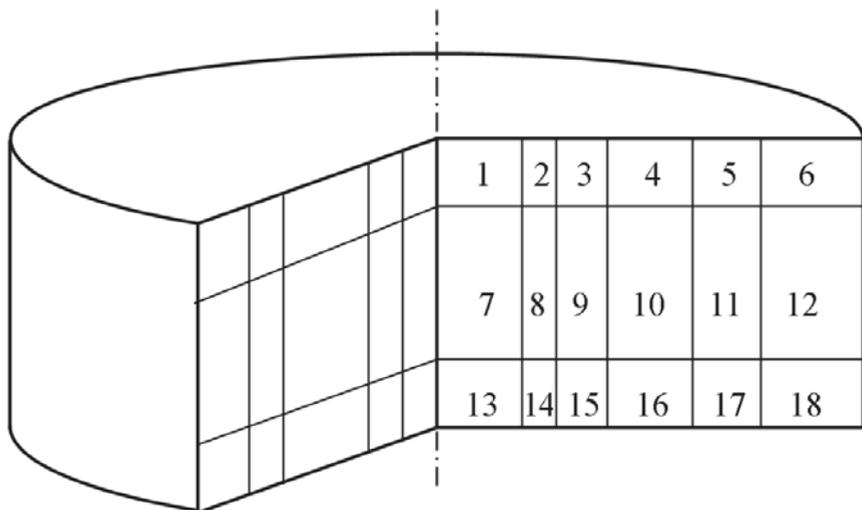


Рис. 1. Типичная схема традиционной компоновки активной зоны быстрого реактора типа БН:

1, 3–6 — верхняя торцевая зона воспроизводства (верхний торцевой экран); 7, 9 — зона малого обогащения; 10–12 — зоны среднего и большого обогащения и боковая зона воспроизводства (боковой экран); 13, 15–18 — нижняя торцевая зона воспроизводства (нижний торцевой экран); 2 — кольцевая зона системы управления и защиты и верхний торцевой экран; 8 — зона малого обогащения и система управления и защиты; 14 — кольцевая зона системы управления и защиты и нижний торцевой экран

цилиндрическую форму и разделена на несколько гомогенных (однородных по составу) зон по радиусу и высоте (рис. 1). В числе компонентов вектора управления — диаметр и высота топливного столба, диаметр твэла, толщина подслоя (гелиевого или жидкометаллического) между топливом и оболочкой, толщина оболочки твэла, обогащение и плотность (пористость) топлива, шаг решетки твэлов (при заданном расположении твэлов в узлах треугольной или квадратной решетки), массовый расход теплоносителя, объемные доли стенок тепловыделяющих сборок, вытеснителей, межкассетного теплоносителя — для каждой зоны реактора. Среди ограничений задачи оптимального проектирования рассматриваются максимальные температуры топлива, теплоносителя, оболочек твэлов, давление в полости для сбора газообразных продуктов деления, максимальная линейная нагрузка на твэлы (удельное энерговыделение с единицы длины твэла) для каждой зоны (или для выбранных пользователем зон), средний подогрев теплоносителя в реакторе, эффективный коэффициент размножения нейтронов ($k_{эф} = 1$), доплеровский и плотностной коэффициенты реактивности, коэффициент воспроизводства и др. В число ограничений входят ограничения для функционалов безопасности: большинства перечисленных выше функционалов, соответствующих выбранным пользователем аварийным режимам работы реактора (в том числе комбинациям аварийных режимов из числа ATWS), а также для максимальной мощности реактора в аварийных режимах, сопровождающихся увеличением мощности. Для каждого выбранного аварийного

режима учитываются две группы функционалов безопасности. Первая характеризует аварийные переходные процессы. Вторая — новые установившиеся (квазистационарные) в результате действия обратных связей по реактивности (температурных и мощностного эффектов реактивности) состояния реактора. Пустотный эффект реактивности (для учета аварийной ситуации LOCA WS, см. табл. 1) может быть включен в число ограничений задачи или рассматриваться как критерий оптимальности. Удобно рассматривать два функционала, характеризующих этот эффект. Один из них соответствует осушению центральной части активной зоны (геометрические размеры осушенной зоны задаются пользователем), причем с точки зрения максимальной введенной реактивности наиболее опасный сценарий реализации пустотного эффекта связан не с полным осушением центральной части активной зоны, а с уменьшением плотности теплоносителя в ней до 25...30% от номинальной (зависит от компоновки активной зоны [9, 10]). Другой функционал — пустотный эффект реактивности, реализующийся при осушении всей активной зоны, менее опасен, но регламентирован нормативной документацией (правилами ядерной безопасности и общими положениями обеспечения безопасности атомных станций [11, 12]). Первый из функционалов, характеризующих пустотный эффект, следует рассматривать в качестве критерия оптимальности, второй — включить в число ограничений задачи.

Переменные состояния, от которых зависят функционалы оптимизационной задачи, определяются на основе решения следующих уравнений. Стационарный расчет основан на решении многогруппового уравнения диффузии нейтронов в приближении условно-критического реактора в $R-Z$ -геометрии:

$$\nabla_r [D_k(r, z) \nabla_r \Phi_k(r, z)] + \nabla_z [D_k(r, z) \nabla_z \Phi_k(r, z)] - \Sigma_{ad(k)}(r, z) \Phi_k(r, z) + \sum_{l=1}^k \Sigma_d^{(l \rightarrow k)}(r, z) \Phi_l(r, z) + \chi_k / k_{\text{эф}} \sum_{l=1}^K [\nu_f^{(l)} \Sigma_f^{(l)}(r, z)] \Phi_l(r, z) = 0.$$

Здесь D — коэффициент диффузии; Φ — плотность потока нейтронов; Σ_{ad} — сечение поглощения и увода нейтрона из данной энергетической группы (индекс k); Σ_d — сечение перевода нейтрона из одной энергетической группы в другую; Σ_f — сечение деления; ν_f — число нейтронов, рождающихся при одном делении ядра; χ — спектр нейтронов деления; $k_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент размножения нейтронов. Предполагается, что реактор состоит из I радиальных ($i = 1, 2, \dots, M$) и J аксиальных ($j = 1, 2, \dots, N$) зон (в уравнении эти индексы не указаны). В пределах каждой зоны (i, j) свойства среды постоянны.

**Возмущения и соответствующие им группы аварийных режимов,
(сопровождающихся отказом аварийной защиты)**

Возмущение	Аварийный режим	Обозначение, используемое в зарубежной литературе*
$\delta\rho > 0$	Неконтролируемое увеличение мощности реактора (ввод ограниченной величины положительной реактивности)	TOP WS — Transient Overpower Without Scram
$\delta G > 0$	Переохлаждение теплоносителя вследствие увеличения производительности циркуляционных насосов (увеличение расхода теплоносителя)	OVC WS — Overcooling Accident Without Scram (Pump Overspeed)
$\delta G < 0$	Нарушение принудительной циркуляции теплоносителя (уменьшение расхода теплоносителя), например, в результате обесточивания главных циркуляционных насосов первого контура	LOF WS — Loss of Flow Without Scram
$\delta T_{\text{вх}} > 0$	Переохлаждение теплоносителя при подключении “холодной” резервной петли (уменьшение температуры теплоносителя на входе в активную зону)	OVC WS (Inlet Temperature Chilled)
$\delta T_{\text{вх}} < 0$	Нарушение теплоотвода от первого контура (увеличение температуры теплоносителя на входе в активную зону)	LOHS WS — Loss of Heat Sink Without Scram
	Потеря теплоносителя (осушение активной зоны или ее части)	LOCA WS — Loss of Coolant Accident Without Scram

* Аббревиатуры используются и в отечественной литературе, так как аналогичные обозначения в ней отсутствуют.

Изменение нуклидного состава описывается уравнением

$$d\rho_{i,j,l}(t) = \left[\int_0^{T_{i,j}} \rho_{i,j,l}(t) dt \right] / T_{i,j},$$

где $\rho_{i,j,l}(t)$ — концентрация l -го нуклида в зоне (i, j) ; $T_{i,j}$ — кампания зоны.

Многогрупповое уравнение диффузии нейтронов и уравнения изменения нуклидного состава решаются итерационно. Для расчета коэффициентов чувствительности используется вариационный подход [7].

В рамках теплогидравлического расчета оцениваются максимальные температуры топлива и оболочек ТВЭЛов в зонах реактора; максимальная линейная нагрузка на ТВЭЛы в зонах; температура теплоно-

сителя на выходе из каждой радиальной зоны; средние температуры теплоносителя, оболочек ТВЭЛОВ и топлива в каждой зоне; средняя по реактору температура теплоносителя; перепад давления теплоносителя по высоте реактора и напор-расходная характеристика насоса. Энерговыведение рассчитывается с учетом реакций деления и захвата.

Аварийные процессы моделируются в приближении точечной нейтронной кинетики с учетом обратной связи по средним температурам. При этом зависимости от времени t средних температур топлива $T_T(t)$ и теплоносителя $T_{ТН}(t)$ оцениваются в каждой зоне реактора в предположении, что в любой момент времени имеются установившиеся температуры при характерных для каждой из рассматриваемых аварийных ситуаций законах изменения входной температуры теплоносителя $T_{ВХ}(t)$, внешнего воздействия $\delta\rho(t)$ на реактивность и расхода теплоносителя $G(t)$. В результате находятся моменты времени $t_w, t_{ТН}, t_{об}, t_T$, когда максимальны мощность и соответствующие средние температуры (теплоносителя, оболочек ТВЭЛОВ, топлива). Максимальная температура теплоносителя

$$T_{ТН}^{\max}(r, t_{ТН}) = T_{ВХ}(t_{ТН}) + w(t_{ТН})/G(t_{ТН}) \max_z [\Delta T_{ТН}^{(0)}(r, z)].$$

Максимальная температура топлива и оболочек ТВЭЛОВ

$$T_{T, об}^{\max}(r, t_{T, об}) = T_{ВХ}(t_{T, об}) + \max_z [\Delta T_{ТН}^{(0)}(r, z)] w(t_{T, об})/G(t_{T, об}) + \Delta T_{T, об}^{(0)}(r, z) w(t_{T, об}),$$

где w и G — отнесенные к номинальным значениям мощности и расхода соответственно; $\Delta T_{ТН}^{(0)}$ — подогрев теплоносителя при работе реактора на номинальной мощности.

Вводятся температурные коэффициенты реактивности по топливу и теплоносителю (как приращения реактивности, соответствующие изменению температуры топлива или теплоносителя на 1 К).

Исходная многокритериальная задача сводится к задаче математического программирования посредством перевода всех, кроме одного, функционалов из числа критериев оптимальности в ограничения. Такая процедура обычно используется при формулировке и решении задач оптимизации активной зоны [13–15].

Решение задачи математического программирования в детерминистской постановке. Практические задачи оптимизации реакторов (с нелинейными функционалами) относятся к задачам нелинейного программирования. Существуют различные методы их решения. Простейший из них основан на линеаризации задачи, т.е. аппроксимации нелинейной зависимости $F_i(\mathbf{u})$ отрезками линейных функционалов. (Высокая точность аппроксимации обеспечивается за счет сокращения интервалов разбиения по \mathbf{u} .) После этого задача решается

одним из методов линейного программирования. В настоящей работе задача математического программирования в детерминистской постановке решается методом последовательной линеаризации [16]. Этот метод не требует предварительного преобразования и сохраняет неклассический характер задачи. Метод реализуется в форме шагового процесса поиска оптимума, имеющего начало в некоторой точке, определяемой выбранным значением вектора управления. Изменение значений управлений на каждом шаге поиска оптимума осуществляется решением задачи линейного программирования, формулируемой с помощью линеаризации функционалов задачи.

В основе метода — построение последовательности управлений, полученных в результате итераций: $\mathbf{u}^{(1)}, \mathbf{u}^{(2)}, \dots, \mathbf{u}^{(j)}, \dots \in U$ ($U : u_k^{\min} \leq u_k \leq u_k^{\max}, k = 1, 2, \dots, K$), улучшающей (в данном случае минимизирующей) значение целевого функционала. Переход от итерации к итерации осуществляется с помощью выбора вариации $\delta \mathbf{u}^{(j)} : \mathbf{u}^{(j+1)} = \mathbf{u}^{(j)} + \delta \mathbf{u}^{(j)}, \delta \mathbf{u}^{(j)} \ll \mathbf{u}^{(j)}$. Основное условие проведения итераций — выполнение ограничений $u_k^{\min} \leq (u_k^{(j)} + \delta u_k^{(j)}) \leq u_k^{\max}$ (где $k = 1, 2, \dots, K$) и соблюдение в первом приближении условий $F_i(u_k^{(j)} + \delta u_k^{(j)}) \leq F_i^{\text{доп}}, i = 1, 2, \dots, I$. Подробное описание метода приведено в работе [16].

Аварийные режимы работы быстрого реактора. Неопределенность сценариев развития аварийных ситуаций. Все аварийные режимы работы быстрого реактора с жидкометаллическим теплоносителем могут быть инициированы изменениями (возмущениями) расхода G теплоносителя, температуры $T_{\text{вх}}$ теплоносителя на входе в активную зону, реактивности ρ . При проектировании реактора обычно рассматривают несколько десятков аварийных режимов. В оптимизационных исследованиях все аварийные режимы предлагается объединить в небольшое число групп (см. табл. 1). Классификационный признак такого объединения — возмущение, инициирующее аварийный режим. В отдельную группу выделена аварийная ситуация с осушением активной зоны или ее части, инициированная, например, кипением натриевого теплоносителя, разгерметизацией оболочек твэлов и выходом газообразных продуктов деления в теплоноситель и другими событиями.

В этом случае (при такой классификации) неопределенность сценариев развития аварийных ситуаций определяется неопределенностью возмущения ($\delta G, \delta T_{\text{вх}}, \delta \rho$), инициирующего тот или иной режим, неопределенностью времени внесения возмущения, закона, по которому изменяется значение возмущения с течением времени (обычно рассматриваются мгновенные возмущения, линейный, экспоненциальный

или гиперболический закон), неопределенностью времени запаздывания того или иного возмущения (при наложении аварийных ситуаций). Эти неопределенности входят в состав вектора w исходных данных.

Для сокращения размерности из задачи оптимизации исключаются ограничения для некоторых функционалов, в том числе функционалов безопасности (не являющихся активными ограничениями). С этой целью проводится предварительное ранжирование аварийных ситуаций (из числа LOF WS, TOP WS, LOHS WS, OVC WS и их комбинаций) по степени опасности (значимости с точки зрения первоочередного рассмотрения). Процедура основана на решении вспомогательной дискретной многокритериальной задачи на основе принципа максимина и представлена в работе [7].

Понятие детерминированного аналога. В некоторых простейших случаях задачу стохастического программирования (задачу с вероятностно-определенными данными) можно свести к детерминированным аналогам (задачам в детерминистской постановке [17, 18]). Вместо исходной задачи (например, на минимум F) рассматривают задачу минимизации математического ожидания MF или максимизации вероятности события, что выражается неравенством $F \leq F^{\max}$.

Подобный подход, связанный со сведением исходной задачи к задачам в детерминистской постановке можно использовать и для решения задач с неопределенными данными. Строго говоря, детерминистический подход [2, 19] требует анализа всех точек (в общем случае бесконечного числа точек) области неопределенности исходных данных. Реализация детерминистического подхода к обоснованию безопасности при наличии неопределенностей требует решения бесконечного числа задач в детерминистской постановке. Чтобы решение исходной задачи стало возможным, необходимо попытаться свести задачу с неопределенными данными к конечному числу детерминированных задач. Такая процедура правомерна, если выбор конечного числа точек из области неопределенности исходных данных представителен и для исключенных из рассмотрения точек заведомо выполняются ограничения $F_i(\mathbf{u}) \leq F_i^{\max}$ для всех функционалов, характеризующих аварийные ситуации (в том числе ATWS и их комбинации), не исключенные детерминистически.

В результате решения задачи математического программирования в условиях неопределенности исходных данных можно получить область неопределенности критерия оптимальности, представляющую собой бесконечное множество значений F , соответствующих каждой точке области неопределенности исходных данных (рис. 2). Решением задачи в условиях неопределенности будет объединение решений бесконечного числа задач в детерминистской постановке,

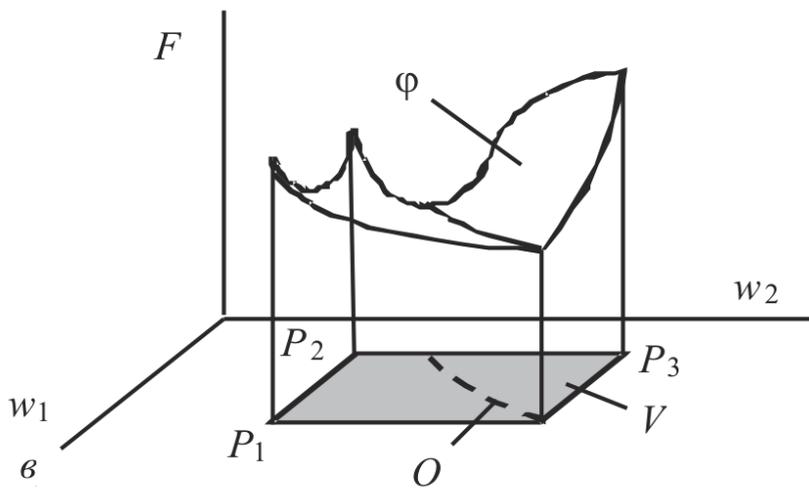
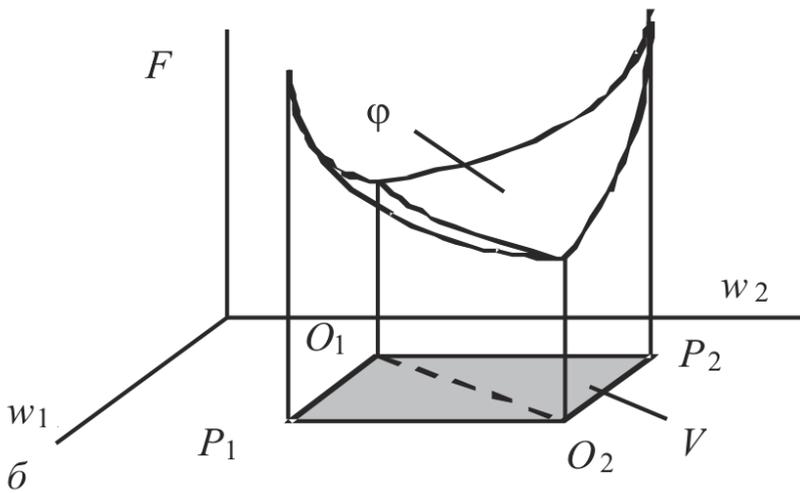
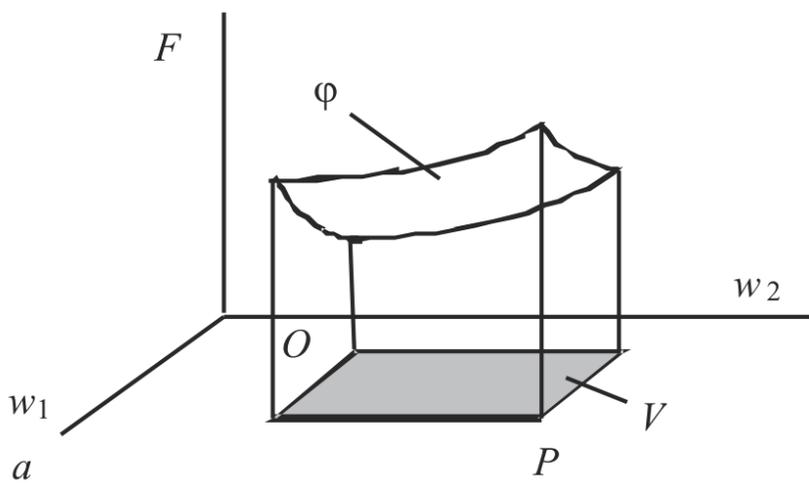


Рис. 2. Вид решения φ задачи минимизации функционала F (пустотный эффект реактивности) в условиях неопределенности исходных данных w_1 и w_2 :

точки O, O_1, \dots — оптимистичные варианты; точки P, P_1, \dots — пессимистичные варианты; V — область неопределенности исходных данных

соответствующих каждой точке области неопределенности исходных данных исходной задачи. Совокупность бесконечного множества задач в детерминистской постановке можно считать детерминистским эквивалентом исходной задачи с неопределенными данными. Обычно используют дискретный набор точек из области неопределенности исходных данных и решают конечное число задач в детерминистской

постановке. Совокупность конечного множества задач в детерминистской постановке будем считать детерминистским аналогом задачи с неопределенными данными. (Это не является детерминистским аналогом в традиционном понимании [17].)

Традиционный способ выбора точек области неопределенности исходных данных, в которых необходимо формулировать задачи в детерминистской постановке. Точки области неопределенности исходных данных, в которых формулируют задачи в детерминистской постановке, можно выбрать на основе равномерно распределенных последовательностей. Такие процедуры описаны в работе [20] и реализованы для решения задач оптимизации компоновки активной зоны реактора типа БН-800 в условиях неопределенности исходных данных авторами работ [7, 8]. Чем ближе эти точки расположены к точкам, соответствующим реальным локальным (глобальным) минимумам или максимумам критерия оптимальности, тем удачнее (представительнее) выбор этих точек.

Алгоритм нахождения координат точек, равномерно распределенных в N -мерном единичном кубе, с использованием ЛП τ -последовательностей, представлен в работе [20]. Авторами работы [21] предлагается учитывать дополнительное требование: координаты точек выбирать таким образом, чтобы минимальное расстояние между точками было максимальным (рис. 3, б).

Общий вид области неопределенности исходных данных и критерия оптимальности. На рис. 2 показан общий вид области неопределенности исходных данных (V) и целевого функционала (φ) для разных компонент вектора исходных данных [7, 8]. Для определенности решалась задача математического программирования на минимум пустотного эффекта реактивности в реакторе типа БН-800 со смешанным мононитридным топливом. Учитывались ограничения

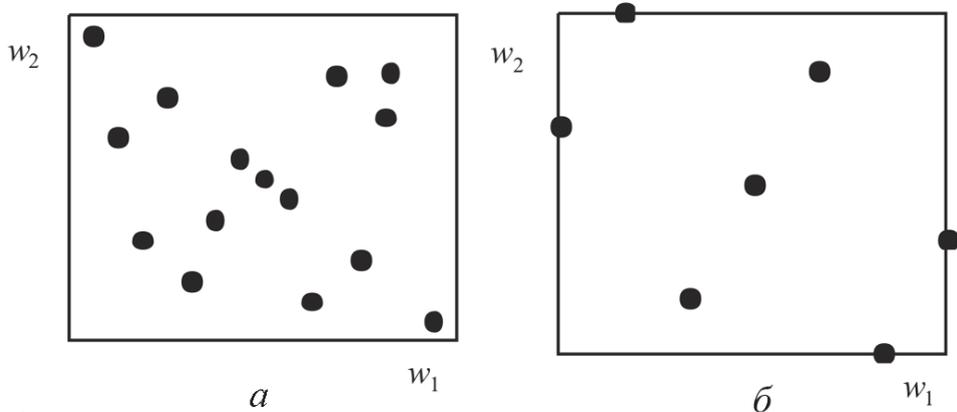


Рис. 3. Выбор равномерно распределенных точек в единичном квадрате (в области неопределенности V) с помощью ЛП τ -последовательности (а) и дополнительного требования максимизации минимального расстояния между точками (б) (по данным [20, 21])

для функционалов, характеризующих аварийный режим, инициированный одновременным вводом положительной реактивности и обесточиванием главных циркуляционных насосов при отказе аварийной защиты (максимальных температур топлива и теплоносителя в зонах реактора, максимальной мощности и др.).

Следует отметить, что форма области φ неопределенности функционала F , представленная на рис. 2, в редко встречается в практических задачах. Она соответствует широкому диапазону изменения неопределенных данных. В данном случае w_2 — возмущение δG расхода теплоносителя — может быть и положительным (что соответствует аварийному режиму OVC WS), и отрицательным (LOF WS). Одна из групп ограничений для функционалов безопасности определяет самозащищенность реактора от возмущения (изменения) расхода, причем $\delta G > 0$ и $\delta G < 0$. Задача в такой постановке обладает свойством разложимости. Эту группу ограничений можно представить в виде двух групп ограничений: для функционалов, описывающих процессы $\delta G > 0$ (режим OVC WS) и $\delta G < 0$ (режим LOF WS). Такая процедура позволит свести анализ области φ неопределенности, имеющей сложную форму (см. рис. 2, в) к анализу области более простой формы (рис. 2, а или б).

Пессимистичный вариант. В задачах оптимизации характеристик безопасности быстрого реактора, например минимизации пустотного эффекта реактивности, часто важно знать не область неопределенности критерия оптимальности, а лишь одно решение, соответствующее пессимистичному варианту, т.е. наиболее неблагоприятному варианту развития событий (аварийной ситуации), определяемому критерием Вальда (минимаксных затрат) выбора рационального решения или критерием Гурвица при нулевом показателе оптимизма [22, 23]. Это характерно для детерминистического метода обоснования безопасности [2, 19]. В этом случае исходную задачу в условиях неопределенности целесообразно и в ряде случаев можно свести к единственной задаче в детерминистской постановке. Пессимистичный вариант выбирается на основе дополнительных исследований аварийных режимов (несколько расчетов, как правило не более 10) с помощью программы FRISS, входящей в оптимизационный комплекс ДРАКОН-М [7].

Возможность сокращения числа точек области неопределенности исходных данных, в которых необходимо формулировать задачи в детерминистской постановке. Нейтрализация и усугубление аварийных ситуаций при их наложении. Сокращение числа точек области неопределенности исходных данных, в которых необходимо формулировать и решать оптимизационные задачи в детерминистской

постановке, без ухудшения точности решения исходной задачи в условиях неопределенности (в том числе сценариев развития аварийных ситуаций) возможно при наличии дополнительной информации.

Необходимая дополнительная информация может быть получена из общих соображений и на основе предварительного анализа усугубления или нейтрализации аварийных ситуаций при их наложении. Например, известно, что увеличение времени внесения возмущения или уменьшение по абсолютному значению вносимого возмущения, как правило, приводит к уменьшению максимальных значений наиболее значимых функционалов безопасности (температур компонентов активной зоны, мощности и др.) в аварийном переходном режиме. Также известно, что при наложении отдельных возмущений, инициирующих аварийные режимы, они могут нейтрализовать друг друга или усугубить ситуацию [7].

Следует отметить, что при наложении аварийных ситуаций возможно не только нейтрализация или усугубление, но и промежуточные случаи, когда наблюдается усугубление аварийной ситуации с точки зрения одного или нескольких функционалов безопасности и ее нейтрализация — с точки зрения других функционалов безопасности. Например, в быстрых реакторах большой мощности с диоксидным топливом в аварийных режимах LOF WS и TOP WS максимальные температуры теплоносителя и оболочек ТВЭЛОВ сначала увеличиваются с течением времени, достигают максимальных значений, затем уменьшаются в результате действия обратных связей по реактивности и стабилизируются на постоянном уровне (квазистационарный режим). В режиме LOF WS максимальная температура топлива и мощность уменьшаются с течением времени, а в режиме TOP WS сначала увеличиваются. При одновременном наложении этих режимов в зависимости от того, какой из них доминирует, максимальная температура топлива и мощность реактора могут увеличиваться или уменьшаться. Доминирование того или иного режима при их наложении определяется, главным образом, значениями возмущений, инициирующих каждый режим, временем внесения возмущений и законами, по которым они вносятся. В итоге при наложении одних и тех же режимов можно выделить область (в координатах δw) возможного превышения максимально допустимого значения температуры топлива, область нейтрализации аварийных режимов, область возможного превышения максимально допустимых значений температур теплоносителя и оболочек ТВЭЛОВ. В общем случае область нейтрализации аварийных режимов

при их наложении соответствует условию $\sum_{n=1}^N \delta \rho_n < \delta \rho_n$, где $\delta \rho_n$ — изменение реактивности системы вследствие n -го возмущения, N —

число возможных возмущений (аварийных режимов). Условие усугубления аварийных режимов при их наложении можно сформулировать в виде $\sum_{n=1}^N \delta\rho_n > \delta\rho_n$, т.е. суммарная реактивность от внесения разных возмущений превышает реактивность от внесения одного (любого) из них. При $\sum_{n=1}^N \delta\rho_n = \delta\rho_n$ наложение аварийных режимов не изменит (не нейтрализует и не усугубит) ситуацию. О нейтрализации и усугублении аварийных режимов при их наложении можно судить по виду проекции области самозащищенности реактора — области максимально допустимых изменений δG , $\delta T_{\text{вх}}$, $\delta\rho$, минимально допустимых времен внесения каждого возмущения (при заданных законах изменения во времени) [7]. Например, при анализе наложения аварийных ситуаций LOF WS и TOP WS проекция области самозащищенности в координатах $\delta G - \delta\rho$ может быть построена на основе нескольких (~ 10) расчетов по программе FRISS.

При рассмотрении наложений аварийных режимов можно выделить оптимистичные и пессимистичные варианты развития событий (точки O и P соответственно на рис. 2), причем, и оптимистичных, и пессимистичных вариантов может быть много. Дополнительная информация (о нейтрализации аварийных режимов при их наложении) позволит исключить из рассмотрения некоторые точки области неопределенности исходных данных, следовательно, уменьшить число детерминированных аналогов, сократив тем самым время решения исходной задачи с неопределенными данными [4].

Другая особенность связана с тем, что точки, в которых формируют детерминированные аналоги, полученные с использованием, равномерно-распределенных последовательностей (рис. 3), не всегда адекватно описывают реальные процессы, т.е. при небольшом числе точек не совпадают с реальными (рис. 4) оптимистичными и пессимистичными вариантами (локальными и глобальными минимумами и максимумами целевого функционала на рис. 2). Это иллюстрирует рис. 3 — даже при выборе пятнадцати точек с помощью ЛПТ-последовательности для построения детерминированных аналогов ни одна из них не совпадает с реальным (см. рис. 4) оптимистическим или пессимистическим сценарием развития событий задачи, решение которой представлено на рис. 2, а. Для другой задачи (см. рис. 2, б) лишь три точки из пятнадцати принадлежат прямой, на которой расположен реальный оптимум (прямая $O_1 - O_2$ на рис. 2, б, рис. 4, б), соответствующий оптимистическому варианту развития событий. При этом ни одна из пятнадцати точек ЛПТ-последовательности не совпадает с пессимистичными вариантами (точки P_1 и P_2 на рис. 4, б).

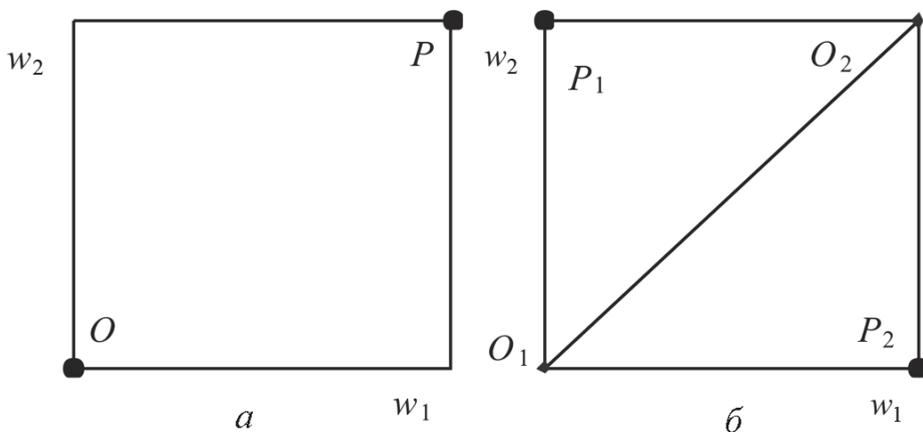


Рис. 4. Выбор точек для построения детерминистских аналогов на основе анализа усугубления и нейтрализации аварийных режимов. Точки совпадают с реальными оптимистичными и пессимистичными вариантами:

a и *б* — варианты, соответствующие рис. 2, *a* и *б*

Предварительный анализ нейтрализации и усугубления аварийных режимов (при их наложении) и временной зависимости функционалов безопасности позволяет свести исходную задачу с неопределенными данными, характеризующими сценарии развития аварийных ситуаций к небольшому числу задач в детерминистской постановке (в наиболее простых случаях к двум задачам (см. рис. 2, *a*) [4]. Причем точки области неопределенности исходных данных, полученные таким способом, наиболее представительны — наиболее адекватно описывают реальные события и всегда совпадают с реальными оптимистичными и пессимистичными вариантами. Таким образом, предложенный способ, основанный на идеях феноменологического метода анализа безопасности и идеях решения многокритериальных задач, является наиболее эффективным при построении детерминированных аналогов для решения задач оптимального проектирования ЯЭУ в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций.

В табл. 2 представлены результаты решения задачи минимизации пустотного эффекта реактивности в реакторе типа БН-800 с мононитридным топливом, соответствующие пессимистичному и оптимистичному вариантам (см. рис. 2, *a*) развития аварийных режимов LOF WS и TOP WS. Через черту приведены значения параметров для зоны малого и большого обогащения соответственно. Звездочкой отмечены значения, равные предельно допустимым.

Эффективность предложенного подхода. Эффективность предложенного подхода можно оценить, исходя из характерного времени проведения комплексного оптимизационного расчета и времени моделирования аварийных режимов.

Время проведения одной итерации решения задачи математического программирования в детерминистской постановке методом последовательной линеаризации с пересчетом коэффициентов чувствительности всех функционалов (около 30) задачи к компонентам вектора

Результаты решения задачи минимизации пустотного эффекта в условиях неопределенности исходной информации

Неопределенные данные, основные управления и функционалы задачи	Вариант	
	пессимистичный	оптимистичный
Параметры, значения которых точно не определены: время выбега ГЦН, с введенная реактивность, β (эффективная доля запаздывающих нейтронов)	40 0,9	120 0,3
Компоненты вектора управления: обогащение топлива, % диаметр топливного брикета, мм относительный шаг решетки ТВЭЛОВ объемная доля, %: чехлов ТВС межкассетного теплоносителя радиальные размеры зон, м высота активной зоны, м массовый расход теплоносителя, г/(м ² ·с)	13,3/14,0 7,3 1,206/1,209 5,89 6,96 1,00*/0,75 0,664 3267/4054	14,0/13,5 1,223/1,161 5,04 6,29 1,00*/0,91 0,532 3000*/3665
Функционалы: пустотный эффект (критерий оптимальности), % $k_{эф}/k_{эф}$ максимальные температуры, К: топлива в режиме работы на номинальной мощности оболочки ТВЭЛА в режиме работы на номинальной мощности теплоносителя в переходном режиме теплоносителя в установившемся режиме максимальная линейная нагрузка на ТВЭЛЫ в номинальном режиме, Вт/см доля естественной циркуляции, %	0,8143 1436 900*/862 1074/1157* 1032/1108 451/470 17/12	0,5666 1772/1774 892/900* 1110/1157* 1097/1144 879/877 22/16

управления (около 10) и время моделирования одного аварийного режима приблизительно соотносятся как 80:1. При характерном числе итераций (20–60), необходимых для решения оптимизационной задачи, и при числе отдельных расчетов параметров реактора в заданном аварийном режиме (заданной комбинации аварийных режимов) для выявления нейтрализации и усугубления режимов при их наложении

не более 5–10, соотношение затрат времени $[80 \times (20 \dots 60)] : [1 \times (5 \dots 10)] = (1600 \dots 4800) : (5 \dots 10)$ или 160...960, т.е. два-три порядка.

При использовании, например, 15 точек (выбранных на основе равномерно-распределенных последовательностей) области неопределенности исходных данных, в которых формулируют и решают задачи в детерминистской постановке, необходимо провести 15 оптимизационных расчетов без дополнительного моделирования аварийных режимов. При использовании предложенного подхода обычно приходится проводить от одного до трех оптимизационных расчетов (в детерминистской постановке) при дополнительных исследованиях аварийных режимов (5–10 расчетов). Таким образом, соотношение затрат времени на решение исходной задачи с неопределенными данными традиционным и предложенным способами составит $[15 \times (160 \dots 960)] : [(1 \dots 3) \times (160 \dots 960) + (5 \dots 10)]$ или приблизительно 5...15 раз. (И это только при двух данных, значения которых не определены.) На самом деле несколько больше, так как дополнительные исследования усугубления или нейтрализации аварийных режимов при их наложении позволяют уменьшить число ограничений задачи (за счет уменьшения числа ограничений для функционалов безопасности, не являющихся активными) и, соответственно, уменьшить время решения задачи оптимизации. При этом точность выявления, например, пессимистичного варианта при использовании равномерно распределенных последовательностей гораздо хуже и требуется увеличение числа точек области неопределенности исходных данных, в которых необходимо провести оптимизационные расчеты в детерминистской постановке.

Предложенный подход может быть использован в любых других оптимизационных комплексах. Подход соответствует феноменологическому анализу безопасности [19]. Использование такого способа построения детерминистских аналогов проиллюстрировано на примерах оптимизации активных зон быстрых реакторов с жидкометаллическим охлаждением, для которых в принципе достижимы идеалы естественной безопасности. Для энергетических реакторов других типов (например, ВВЭР, РБМК) оптимизационные задачи с ограничениями для функционалов, характеризующих все аварийные ситуации типа ATWS, не исключенные детерминистически, не имеют решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Н е т р а д и ц и о н н ы е концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) / В.В. Орлов, Е.Н. Аврорин, Е.О. Адамов и др. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. Вып. 4. – С. 317–329.

2. O r l o v V. V., et al. Deterministic safety of cityplace BREST Reactors / Proc. 11-th Int. Conf. on Nucl. Engrg., ICON-11. JSME/ASME, Shinjuku, Tokio, Japan, 2003. (CD-ROM file ICON-11-36412).
3. S a f e t y analysis for the Loss-of-Flow and Loss-of-Heat Sink without Scram Tests in EBR-II / W.K. Lehto, Fryer R.M., Dean E.M. et al. // Nucl. Eng. and Design, 101, 35–44 (1987).
4. О к у н е в В. С. Эффективный подход к решению задач проектирования РУ в условиях неопределенности сценариев развития аварийных ситуаций // Научная сессия МИФИ-2006. Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2006. – Т. 8. – С. 91–92.
5. М е т о д и ч е с к и е положения по выполнению оптимизационных (техно-экономических) расчетов в энергетике при неоднозначности исходной информации / Л.С. Попырин и др. – М., Иркутск: АН СССР, 1977. – 52 с.
6. Н е к о т о р ы й опыт использования программы РОКБАР для оценки влияния неточности исходных констант на оптимизацию быстрых реакторов / В.Г. Илюнин, В.М. Мурогов, А.И. Новожилов, С.А. Субботин, А.Н. Шмелев // Методы математического моделирования и комплексной оптимизации энергетических установок в условиях неполной определенности исходной информации. – Иркутск: СЭИ СОАН СССР, 1977. – С. 125–134.
7. К у з ь м и н А. М., О к у н е в В. С. Использование вариационных методов для решения задач обеспечения и обоснования естественной безопасности реакторов на быстрых нейтронах. – М.: МИФИ, 1999.
8. К у з ь м и н А. М., О к у н е в В. С. Решение задачи оптимизации самозащищенных реакторов в условиях неопределенности исходной информации // Атомная энергия. – 1997. – Т. 82. Вып. 4. – С. 254–264.
9. О к у н е в В. С. О возможности дальнейшего повышения безопасности реакторов типа БН-П4 // Новая технологическая платформа атомной отрасли. Материалы XVI семинара по проблемам физики реакторов. – Москва, 3–7 сентября 2010 г. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – С. 179–181.
10. О к у н е в В. С. Об использовании MN- и МОХ-топлива с добавками бериллия в быстрых реакторах большой мощности // Научная сессия МИФИ-2008. Сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2008. – Т. 1. – С. 99–100.
11. П р а в и л а ядерной безопасности реакторных установок атомных станций ПБЯ РУ АС-89 // Атомная энергия. – 1990. – Т. 69. – Вып. 6. – С. 155–158.
12. О б щ и е положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97 // Атомная энергия. – 1997. – Т. 83. – Вып. 6. – С. 469–476.
13. О к у н е в В. С. Максимизация мощности быстрого реактора со свинцово-висмутовым теплоносителем // Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. Вып. 3. – С. 234–241.
14. О к у н е в В. С. О принципиальной возможности разрешения конфликта между повышением мощности и безопасностью реактора на быстрых нейтронах // Сб.: Безопасность АЭС и подготовка кадров. VII Международная конф. (Обнинск, 8–11 октября 2001 г.): Тезисы докладов. – Обнинск: ИАТЭ, 2001. – С. 20–21.
15. О к у н е в В. С. К вопросу о физических ограничениях мощности реактора на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем // Изв. РАН. Энергетика. – 2002. – № 6. – С. 42–51.
16. Х р о м о в В. В., К у з ь м и н А. М., О р л о в В. В. Метод последовательной линеаризации в задачах оптимизации реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат, 1978.
17. Е р м о л ь е в Ю. Н. Методы стохастического программирования. – М.: Наука, 1976.
18. У с ы н и н Г. Б., К а р а б а с о в А. С., Ч и р к о в В. А. Оптимизационные модели реакторов на быстрых нейтронах. – М.: Атомиздат. – 1981.

19. У о л т е р А., Р е й н о л ь д с А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
20. С о б о л ь И. М., С т а т н и к о в Р. Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981.
21. Б е л я е в Б. Н. и др. Отбор заданного числа точек, равномерно расположенных в n -мерном кубе // Учет неопределенности исходной информации. – Иркутск, 1973. – С. 78–83.
22. В о л к о в И. К., З а г о р у й к о Е. А. Исследование операций: Учеб. для вузов / Под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002.
23. М у ш и к Э., М ю л л е р П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 208 с.

Статья поступила в редакцию 18.11.2011