

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КОСМИЧЕСКИХ ЯДЕРНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЕКТНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ

**А.Г. Юферов, В.А. Линник, М.А. Николаев**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» им. А.И. Лейпунского*

*249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, д. 1*



Целью работы является анализ влияния КПД и среднеэнтропийных температур на удельную массу космической энергоустановки и удельную площадь холодильника-излучателя с учетом тепловых потерь и массовых коэффициентов подсистем. В качестве инструмента параметрического анализа используются функции чувствительности удельных характеристик к вариациям проектных переменных. Показано, что функции чувствительности представляют собой критериальные соотношения, определяющие области оптимальности и подобия КЯЭУ различных типов. Для конкретизации допустимых интервалов изменения проектных переменных предложена форма записи удельных характеристик с явными взаимозависимостями как целевых функций, так и проектных переменных. Полученные результаты демонстрируют одноэкстремальную зависимость рассмотренных удельных характеристик от обобщенных проектных переменных. Это делает обоснованной постановку оптимизационной задачи по указанным критериям технического уровня КЯЭУ.

**Ключевые слова:** космические ядерные энергетические установки, параметрический анализ, функции чувствительности, критерии технического уровня.

Сравнительный анализ различных конструкций космических ядерных энергетических установок (КЯЭУ) является необходимым этапом обоснования проектных решений [1–3]. Для сравнения и оптимизации удобно использовать целевые функции в виде отношения «затраты/полезный эффект». Подобные удельные характеристики учитывают как положительные, так и негативные факторы и позволяют в одном масштабе выполнять оптимизацию и сопоставление КЯЭУ различных типов и различной мощности [4].

Применительно к оценке технического уровня КЯЭУ сегодня наиболее важными являются такие критерии, как удельная площадь холодильника-излучателя (ХИ) на единицу полезной мощности (УПХИ) и удельная масса энергоустановки на единицу полезной мощности (УМаМо). Эти целевые функции отражают как массогабаритные характеристики КЯЭУ, так и эффективность преобразования энергии. Поэтому величины УМаМо и УПХИ в значительной степени определяют возможность вывода установки в космос с помощью существующих носителей и соответствие КЯЭУ це-

© А.Г. Юферов, В.А. Линник, М.А. Николаев, 2015

левому назначению как источника энергии.

В работе параметрический анализ и оптимизация УМаМо и УПХИ рассматриваются в пространстве термодинамических параметров (в частности, КПД и среднеэнтальпийных температур), которые можно представить в виде обобщённых проектных переменных (ОПП). При этом принимаются во внимание тепловые потери и массовые коэффициенты подсистем КЯЭУ, что позволяет уточнить полученные ранее результаты [5, 6] по оценке влияния термодинамических параметров на удельные характеристики. В качестве инструмента параметрического анализа используются функции чувствительности удельных характеристик к вариациям проектных переменных. Показано, что коэффициенты чувствительности могут использоваться как критериальные соотношения, определяющие области оптимальности и подобия КЯЭУ различных типов с точки зрения УМаМо и УПХИ.

При этом следует подчеркнуть, что для конструктора недостаточно получить некоторую «оптимальную» точку в пространстве проектных переменных. Для должного обоснования проекта ему необходима развернутая информация, описывающая поведение конструкции в различных точках области  $D$  допустимых значений проектных переменных. В частности, необходимо установить

- наличие и распределение экстремумов в области  $D$ ;
- стоимость достижения оптимума из точки базового проекта;
- градиенты и изолинии проектных характеристик в области  $D$ .

Как правило, подобная информация позволяет обнаружить некоторые новые закономерности в поведении целевых функций, т.е. уточнить или упростить теорию и методы расчёта в соответствующей предметной области.

Задача сканирования области проектных переменных традиционно решается посредством вариантных расчетов. При соответствующем увеличении числа рассматриваемых точек в области  $D$  и надлежащей их расстановке параметрический анализ методом вариантных расчетов превращается в эффективный алгоритм решения оптимизационных задач путем «полного перебора» [7, 8]. При этом стандартные алгоритмы поиска глобального экстремума оказываются излишними, а на первый план выступают проблемы рационального выбора точек многомерной области  $D$  и обозримого представления результатов вариантных расчетов на основе планирования вычислительного эксперимента, например, по методике ортогонального центрального композиционного планирования [7, 9]. В частности, для уменьшения размерности задачи и ограничения области  $D$  формируются некоторые функции – обобщенные проектные переменные [7], явно или опосредованно связанные с первичными проектными переменными – геометрией, размерами и параметрами материального состава изделия. Каждой точке пространства ОПП соответствует некоторая область изменения первичных проектных переменных. Подобная иерархия проектных переменных может содержать несколько уровней, обеспечивая последовательную детализацию зависимостей целевых функций от проектных переменных различных уровней. Оптимальные точки, найденные на одном уровне, определяют допустимую область поиска оптимума на детализирующем уровне.

## **УДЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КЯЭУ И ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ОПП**

В работе в качестве обобщенных проектных переменных используется ряд термодинамических параметров, в пространстве которых выполняется параметрический анализ УПХИ ( $\varphi_x = F_x/N$ , где  $F_x$  – площадь излучающей поверхности ХИ,  $N$  – полезная мощность) и УМаМо ( $\gamma_{эу} = G_{эу}/N = G_{эу}(Q_n \cdot \eta)$ , где  $G_{эу}$  – суммарная масса КЯЭУ,  $Q_n$  – мощность нагревателя,  $\eta$  – реальный КПД энергоустановки). Принятый выбор проектных переменных не требует конкретизации конструкции КЯЭУ и используе-

мого термодинамического цикла, т.е. позволяет получить результаты, справедливые для любых типов КЯЭУ.

Эффективность преобразования энергии будет охарактеризована более детально, если ввести явно интенсивность тепловых потерь  $Q_n$  и записать выражение для реального КПД в виде

$$\eta = 1 - (Q_n - Q_x - Q_n) / Q_n = \eta_t - \eta_n, \quad (1)$$

где  $\eta_t = 1 - (Q_n - Q_x) / Q_n$  – КПД установки без учета потерь (термический КПД);  $\eta_n = Q_n / Q_n$  – доля тепловых потерь. Полезно также ввести в рассмотрение коэффициент идеальности  $k_{ид} = 1 - \eta_n$  и коэффициент теплосброса  $r = Q_x / Q_n \equiv 1 - \eta_t$ . При  $k_{ид} = 1$  в энергоустановке нет тепловых потерь помимо теплоотвода в используемом термодинамическом цикле. Коэффициент идеальности удобно применять в задачах параметрического анализа, поскольку он определяет интервал изменения реального КПД:  $0 \leq \eta \leq k_{ид}$ .

Для характеристики температур холодильника и нагревателя используем среднеэнтропийные значения:  $T_{x^{сэ}} = Q_x / (s_1 - s_2)$  – среднеэнтропийная температура холодильника;  $T_{n^{сэ}} = Q_n / (s_1 - s_2)$  – среднеэнтропийная температура нагревателя, где  $(s_1, s_2)$  – интервал изменения энтропии в термодинамическом цикле, реализованном в энергоустановке. Отсюда следует выражение термического КПД через среднеэнтропийные температуры:

$$\eta_t \equiv (Q_n - Q_x) / Q_n = (T_{n^{сэ}} - T_{x^{сэ}}) / T_{n^{сэ}}.$$

Все введенные выше величины можно трактовать как обобщенные проектные переменные. Их взаимосвязь позволяет вводить в качестве проектных переменных величины, акцентирующие внимание на закономерностях, представляющих особый интерес: общая эффективность КЯЭУ, близость реального цикла к идеальному, возможность приближения к КПД Карно, температурные закономерности и т.д.

С формально-математической точки зрения относительно любой из этих переменных допустимо искать минимум УМаМо и УПХИ в предположении постоянства значений других ОПП или с учетом их взаимосвязи. Однако для практического достижения оптимума путем реального изменения конструкции следует, очевидно, в качестве варьируемой проектной переменной выбирать ту ОПП, изменение которой может быть выражено (исходя из теории процессов, происходящих в установке) в терминах размеров, состава или формы изделия.

## СТАНДАРТИЗАЦИЯ ЦЕЛЕВЫХ ФУНКЦИЙ

Под стандартизацией целевых функций понимается их приведение к форме с явными взаимозависимостями как целевых функций, так проектных переменных. Это позволяет конкретизировать допустимые интервалы изменения переменных. Так, после некоторых преобразований УПХИ и УМаМо записываются в виде

$$\Phi_x = (k_{ид} / \eta - 1) / E_x, \quad (2)$$

$$\gamma_{эу} = \Phi_x \cdot P_x + P_{пр} / \eta, \quad (3)$$

где  $E_x \equiv Q_x / F_x = \sigma \varepsilon_c (T_{x^{сэ}})^4$  – эффективность теплосброса посредством ХИ, кВт/м<sup>2</sup>;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\varepsilon_c$  – эффективная степень черноты ХИ;  $P_x \equiv G_x / F_x$  – массовый коэффициент холодильника, кг/м<sup>2</sup>;  $P_{пр} \equiv G_{пр} / Q_n$  – массовый коэффициент подсистем КЯЭУ за вычетом холодильника;  $G_{эу} = G_x + G_{пр}$ . Обратим внимание, что массовый коэффициент ХИ дан в единицах кг/м<sup>2</sup>, а массовый коэффициент прочих подсистем – в единицах кг/кВт.

На уровне детальности рассмотрения, принятом в данной работе, т.е. в рамках

соотношений (1) – (3), различные модификации энергоустановки, которые можно выполнить для минимизации УМаМо и УПХИ, отражаются в изменении соотношения величин  $Q_x$ ,  $Q_n$  или температур нагревателя и холодильника. Связать конструктивные изменения с долей потерь и массовыми коэффициентами в явной математической форме, как правило, не удастся. Поэтому в качестве варьируемых ОПП в данном случае естественно использовать только КПД и эффективность теплосброса, рассматривая долю потерь  $\eta_n$  и массовые коэффициенты  $P_x$ ,  $P_{np}$  как фиксированные параметры, указывающие принадлежность КЯЭУ к определенному классу. Воплощение условий минимума в реальной конструкции приводит, как правило, к изменению доли потерь  $\eta_n$  и массовых коэффициентов  $P_x$ ,  $P_{np}$ . Если эти изменения приемлемы, то оптимизация завершается. В противном случае необходимо установить условия минимума при новых значениях  $\eta_n$ ,  $P_x$ ,  $P_{np}$ . Такой итерационный процесс позволяет учесть нелинейную зависимость УМаМо и УПХИ от параметров  $\eta_n$ ,  $P_x$ ,  $P_{np}$ .

Как следует из приведенных выше формул, эффективность теплосброса и КПД связаны через среднеэнтропийную температуру холодильника. Чтобы «развязать» эти переменные, введем в формулы (1), (2) среднеэнтропийную температуру нагревателя  $T_{nc}$ . Получим следующие выражения для удельной площади холодильника и удельной массы КЯЭУ как функций реального КПД:

$$\varphi_x = 1 / [E_n (k_{ид} - h)^3 \eta], \quad (4)$$

$$\gamma_{эу} = \varphi_x \cdot P_x + P_{np} / \eta. \quad (5)$$

Полученные выражения можно записать в терминах термического КПД, коэффициента теплосброса или среднеэнтропийных температур, используя линейную связь этих величин:

$$\eta = 1 - r - \eta_n = \eta_t - \eta_n = k_{ид} - r = k_{ид} - T_{xc} / T_{nc}. \quad (6)$$

Из (6) видно, что в процессе варьирования фигурирующих здесь проектных переменных следует соблюдать допустимые пределы варьирования: для термического КПД  $\eta_t \in [\eta_n, 1]$ ; для температуры холодильника  $T_{xc} < k_{ид} \cdot T_{nc}$ ; для реального КПД и коэффициента теплосброса  $r \in [0, k_{ид}]$ . Величину  $E_n = \sigma \cdot \varepsilon_c \cdot (T_{nc})^4$  в формуле (4) условимся называть *эффективностью теплосброса при температуре нагревателя* (ЭТН), поскольку выражение для  $E_n$  аналогично формуле для эффективности холодильника  $E_x$ .

В форме (5) УМаМо является функцией шести аргументов:  $\eta_t$ ,  $\eta_n$ ,  $T_{nc}$ ,  $\varepsilon_c$ ,  $P_x$ ,  $P_{np}$ . Параметрический анализ естественно ограничить классом ЭУ с определенной мощностью первичного нагревателя. В рассматриваемой постановке для этого достаточно зафиксировать температуру нагревателя. После этого величина  $E_n$  будет зависеть только от степени черноты холодильника. Теперь рассматриваемые удельные характеристики удобно трактовать как функции только двух проектных переменных – ЭТН  $E_n$  (или степени черноты  $\varepsilon_c$ ) и КПД  $\eta$  (или  $\eta_t$ ,  $r$ ,  $T_{xc}$ ), считая остальные параметры внешними.

### ФУНКЦИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ КРИТЕРИЕВ УМАМО И УПХИ

Стоимость достижения оптимума (например, из точки базового проекта) определяется чувствительностью используемых критериев к вариации проектных переменных. Для упрощения вместо УПХИ будем рассматривать обратную величину – мощность КЯЭУ, отнесенную к площади холодильника. Согласно формуле (4), эту удельную характеристику можно записать в виде  $n_{уд} = E_n r^3 \eta$ . Соответствующее уравнение чувствительности в относительных отклонениях

$$\delta n_{уд} = dn_{уд} / n_{уд} = \delta E_n + 3\delta r + \delta \eta.$$

Выражение для вариации УПХИ отличается только знаком:  $\delta\varphi_x = -\delta\eta_{уд}$ . Далее, поскольку  $\eta = 1-r-\eta_n$ , то уравнение чувствительности для реального КПД есть

$$\delta\eta = -(1/\eta) \cdot (r \cdot \delta r + \eta_n \cdot \delta\eta_n), \quad (7)$$

и уравнение чувствительности для УПХИ детализируется следующим образом:

$$\delta\varphi_x = -\delta E_n - (3 - r/\eta) \cdot \delta r + (\eta_n/\eta) \cdot \delta\eta_n. \quad (8)$$

Соотношение (8) позволяет сделать ряд заключений о влиянии вариаций проектных переменных  $r$  (коэффициент теплосброса) и  $\eta_n$  (доля тепловых потерь) на удельную площадь холодильника.

Во-первых, видно, что наличие тепловых потерь всегда негативно влияет на УПХИ. Масштаб этого влияния определяется коэффициентом  $(\eta_n/\eta)$ , который для реальных установок близок к единице. Таким образом, можно сказать, что приближенно относительная вариация тепловых потерь приводит к такой же относительной вариации УПХИ.

Рассмотрим второе слагаемое в выражении (8). Полагая, что величина ЭТН  $E_n$  зафиксирована, тепловые потери равны нулю или учитываются в совокупной мощности теплосброса  $Q_x$ , получим

$$\delta\varphi_x = -(3 - r/\eta) \cdot \delta r = -(3 - r/(1-r)) \cdot \delta r.$$

Из определения коэффициента теплосброса  $r = Q_x/Q_n$  и его связи с термическим КПД следует, что величину  $r$  желательно уменьшать. Однако это не всегда благоприятно сказывается на удельной площади холодильника. Действительно, относительные вариации УПХИ и коэффициента теплообмена связаны множителем  $M = (4r - 3)/(1 - r)$ , который равен нулю при  $r = 3/4$  (т.е. при реальном КПД  $\eta = 25\%$ ). В окрестности этой точки вариации КПД не влияют на удельную площадь холодильника-излучателя.

В области  $r > 0.75$  ( $\eta < 0.25$ ) множитель  $M$  положителен. При уменьшении  $r$  уменьшается и УПХИ, что является положительным результатом, при этом увеличивается и КПД. В области  $r < 0.75$  ( $\eta > 0.25$ ) множитель  $M$  отрицателен, в таком случае при уменьшении  $r$  величина  $\delta r < 0$ , так что  $\delta\varphi_x > 0$ , т.е. УПХИ увеличивается, что нежелательно. Таким образом, находясь в области  $\eta < 0.25$ , можно выполнять оптимизацию КЯЭУ и по критерию увеличения реального КПД, и по критерию минимизации УПХИ, не вступая в противоречие. Отметим, что эта область КПД характерна для большинства типов современных КЯЭУ.

Для удельной массы КЯЭУ из (5) получаем в абсолютных отклонениях:

$$d\gamma_{эу} = P_x d\varphi_x + \varphi_x dP_x + dP_{пр}/\eta - (P_{пр}/\eta^2) d\eta$$

или через относительные вариации проектных переменных:

$$d\gamma_{эу} = P_x \varphi_x \cdot (\delta\varphi_x + \delta P_x) + P_{пр}/\eta \cdot (dP_{пр} - \delta\eta).$$

Применив соотношения (7), (8), получим

$$d\gamma_{эу} = P_x \varphi_x \cdot (\delta P_x - \delta E_n) + (P_{пр}/\eta) \cdot \delta P_{пр} + (\gamma_{эу} \eta_n/\eta) \cdot \delta\eta_n - [3P_x \varphi_x - (\gamma_{эу} r/\eta)] \cdot \delta r. \quad (9)$$

Последняя формула позволяет оценить влияние вариаций проектных переменных на удельную массу. Так, видно, что вариации  $\delta P_x$ ,  $\delta E_n$  весят одинаково, но дают противоположный вклад в вариацию удельной массы. Следовательно, для снижения удельной массы путем увеличения мощности КЯЭУ или повышения температуры нагревателя (что отразится в увеличении абсолютного значения  $\delta E_n$ ) заведомо необходимо, чтобы массовый коэффициент холодильника увеличился на меньшую долю, чем величина ЭТН  $E_n$ .

Влияние прочего оборудования на УМаМо характеризует вариация массового коэффициента  $\delta P_{пр}$ . Обычно эта вариация анализируется при оптимизации состава полезной нагрузки. Ее коэффициент влияния равен  $P_{пр} / \eta$ , так что при низких КПД вклад  $\delta P_{пр}$  в вариацию  $d\gamma_{эу}$  может стать весьма существенным. Влияние тепловых потерь на УМаМо аналогично рассмотренной выше ситуации с УПХИ. Относительные вариации  $\delta\gamma_{эу}$  и  $\delta\eta_n$  связаны коэффициентом влияния  $\eta_n/\eta$ .

В предположении постоянства прочих проектных переменных из (9) получаем следующее соотношение, связывающее относительные вариации коэффициента теплосброса и УМаМо:

$$d\gamma_{эу} = [(r/\eta) - 3\gamma_x] \cdot \delta r. \quad (10)$$

Введение относительной массы холодильника  $g_x = G_x / G_{эу}$  приводит к тому, что коэффициент влияния

$$C = [(r/\eta) - 3\gamma_x] \quad (11)$$

не зависит от абсолютных масс, температур и мощностей, реализованных в энергоустановке. Следовательно, полученные соотношения (10), (11) справедливы для любых классов КЯЭУ, имеющих в качестве подсистемы холодильник-излучатель. Подчеркнем, что при выводе соотношения (10) не использовались какие-либо упрощающие предположения.

Если тепловые потери включить в общий теплосброс, т.е. не разделять основной холодильник и систему терморегулирования, то соотношение (10) запишется в виде

$$d\gamma_{эу} = [r/(1-r) - 3\gamma_x] \cdot \delta r. \quad (12)$$

Этот случай можно трактовать и как отсутствие потерь, т.е. рассматривать КЯЭУ как идеальную.

Уравнение (12) позволяет проанализировать влияние вариации коэффициента теплосброса на вариацию удельной массы в координатах  $(r, \gamma_x)$ .

Здесь коэффициент чувствительности  $C = [r/(1-r) - 3\gamma_x]$  положителен в области  $\gamma_x < r/[3(1-r)]$ . В этой области уменьшение коэффициента теплосброса (отрицательная вариация  $\delta r$ ) приводит к уменьшению удельной массы. Реальный КПД при этом возрастает. В области  $\gamma_x > r/[3(1-r)]$  удельная масса уменьшается с увеличением коэффициента теплообмена (отрицательный коэффициент чувствительности и положительная вариация  $\delta r$ ). Однако при этом падает КПД. Минимум УМаМо достигается, очевидно, на линии  $\gamma_x = r/[3(1-r)]$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Выполнен параметрический анализ двух критериев технического уровня космических энергоустановок: удельной массы КЯЭУ (удельной массы на единицу полезной мощности – УМаМо) и удельной площади холодильника-излучателя (удельной площади ХИ на единицу полезной мощности – УПХИ). Параметрический анализ проводился в терминах обобщенных проектных переменных, в качестве которых использовался КПД и такие связанные с КПД проектные переменные, как коэффициент теплосброса и среднеэнтропийные температуры.

2. Показана тесная взаимосвязь УМаМо и УПХИ. Определенная детализация искоемых зависимостей достигнута путем введения массовых коэффициентов холодильника и прочего оборудования, а также доли тепловых потерь. В процессе анализа эти величины рассматривались как внешние фиксированные параметры. Нелинейная зависимость целевых функций от этих параметров учитывается посредством итерационной процедуры поиска оптимума УМаМо, уточнения массовых коэффици-



ентов для оптимальной конструкции, корректировки значения оптимума и повторения этих операций до получения приемлемых значений.

3. Полученные результаты демонстрируют одноэкстремальную зависимость рассмотренных удельных характеристик от обобщенных проектных переменных. Это делает обоснованной постановку оптимизационной задачи по этим критериям, т.е. вывод условий минимума УМаМо и УПХИ.

4. Для оценки «весомости» проектных переменных выведены коэффициенты чувствительности критериев УМаМо и УПХИ, характеризующие линеаризованную связь между вариациями критериев и проектных переменных. Коэффициенты чувствительности задают направление к точке оптимума и поэтому широко используются в различных алгоритмах оптимизации. Однако, как показано в работе, непосредственный анализ коэффициентов чувствительности может дать конструктору более содержательную информацию, чем поиск единственной оптимальной точки.

5. Используемые в качестве проектных переменных величины являются весьма общими и во многих случаях сами выступают как оптимизируемые критерии. В частности, при прочих равных условиях всегда желательна максимизация КПД. Из анализа функций чувствительности получено, что возможна одновременная оптимизация по КПД и УМаМо в области значений реального КПД  $\eta < 0.25$ , которая характерна для большинства типов современных КЯЭУ.

6. Современные КЯЭУ находятся далеко от области минимума УМаМо. В этом смысле УМаМо не является достаточно содержательным критерием совершенства КЯЭУ. Тем не менее, его анализ позволяет найти некоторые закономерности, определяющие возможные направления совершенствования конструкции в терминах вариации КПД и среднеэнтропийных температур. Получение более практических рекомендаций требует привязки найденных соотношений к конкретным термодинамическим циклам и конструкциям КЯЭУ. Для этого необходимо получение явных зависимостей КПД, среднеэнтропийных температур и массовых коэффициентов от первичных проектных переменных, определяющих геометрию и материальный состав узлов и элементов КЯЭУ.

### Литература

1. Квасников Л.А., Белик А.А. Выбор основных параметров энергетической установки и её систем. М.: МАИ, 1986.
2. Романов А.В. Теория комплексной оптимизации проектирования космических аппаратов с ядерными термоэмиссионными энергетическими установками. СПб.: НПО «Профессионал», 2010.
3. Забудько А.Н., Линник В.А., Раскач Ф.П. Сравнение и анализ характеристик термоэмиссионных реакторов-преобразователей различного типа для космических ЯЭУ. Препринт ФЭИ-3025. Обнинск, 2004.
4. Линник В.А., Пупко В.Я., Раскач Ф.П., Юферов А.Г. Методика оценки технического уровня космических ЯЭУ. Препринт ФЭИ-2115. Обнинск, 1990.
5. Калафати Д.Д. Анализ параметров термодинамических циклов космических ядерных энергетических установок. // Атомная энергия, 1967, т. 22, вып. 6. С. 432-439.
6. Кокорев Л.С., Харитонов В.В. Теплогидравлические расчеты и оптимизация ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1986.
7. Юферов А.Г., Овчаренко М.К., Бологов П.М. Теория возмущений первого порядка в задаче организации вариантных нейтронно-физических расчетов ядерных реакторов. Препринт ФЭИ - 2850. Обнинск, 2000.
8. Юферов А.Г., Николаев М.А. Алгоритмы организации вариантных проектных расчетов. // Научно-технический вестник Поволжья, 2013, вып.6. С. 388-393.
9. Ионкин В.И. Нейтронно-физические характеристики реакторов космических устано-

вок: автореф. дисс. д-ра техн. наук. Обнинск, 2001.

Поступила в редакцию 28.01.2014 г.

#### Авторы

Юферов Анатолий Геннадьевич, начальник отдела

E-mail: anatoliy.yuferov@mail.ru

Линник Владимир Александрович, ведущий научный сотрудник

Николаев Максим Александрович, аспирант

E-mail: ba-by@yandex.ru

UDC 629.7

## PARAMETRIC ANALYSIS OF SPACE NUCLEAR POWER PLANTS IN THERMODYNAMIC DESIGN VARIABLES

Yuferov A.G., Linnik V.A., Nikolaev M.A.

JCS State Scientific Center of Russian Federation – Institute for Physics and  
Power Engineering.

1, Bondarenko sq., Obninsk, Kaluga reg., 249033 Russia

#### ABSTRACT

The purpose of the work is to analyze the influence of the efficiency and the temperatures on a specific mass of space power plant and a specific area of cooler-radiator with taking into account the heat losses and mass subsystems. As a tool for parametric analysis the sensitivity function of the specific characteristics to a variation of design variables is used. It is shown that the sensitivity function can be used as a criterion defining the area of optimality and similarity of the SNPS different types. To specify allowable ranges of design variables the form of the specific characteristics with the clear interdependencies of the objective functions and design variables is proposed. These results demonstrate the uniextremal dependence of specific characteristics of the generalized design variables. It makes valid statement of optimization problem under these criteria of technical level SNPS.

**Key words:** space nuclear power plants, parametric analysis, sensitivity function, criteria of technical level.

#### REFERENCES

1. Kvasnikov L.A., Belik A.A. *Vybor osnovnykh parametrov energeticheskoy ustanovki i ego system* [Selection of the main parameters of the power plant and its systems]. Moscow, MAI Publ. 1986. 50 p. (in Russian).
2. Romanov A.V. *Teoriya kompleksnoy optimizatsii proektirovaniya kosmicheskikh apparatov s yadernymi termoemissionnymi energeticheskimi ustanovkami* [The theory of complex optimization of the design of spacecraft with nuclear power plants thermionic]. SPb., NPO «Professional». 2010. 474 p. (in Russian).
3. Zabud'ko A.N., Linnik V.A., Raskach F.P. *Sravnenie i analiz harakteristik termoemissionnykh reaktorov-preobrazovateley razlichnogo tipa dlya kosmicheskikh YaEU*: Preprint GNC RF-FEI-3025. [Comparison and analysis of a thermionic converter reactor for various types of space nuclear power]. Obninsk, FEI Publ., 2004 (in Russian).
4. Linnik V.A., Pupko V.Ya., Raskach F.P., Yuferov A.G. *Metodika ocenki tehnikeskogo urovnya kosmicheskikh YaEU*: Preprint GNC RF-FEI-2115. [Methodology to evaluate the technical level of space nuclear power]. Obninsk, FEI Publ., 1990 (in Russian).
5. Kalafati D.D. *Analiz parametrov termodinamicheskikh ciklov kosmicheskikh yadernykh*



*energeticheskikh ustanovok* [Analysis of the parameters of thermodynamic cycles of space nuclear power plants]. *Atomic Energy*. 1967, v. 22, no. 6, pp. 432–439.

6. Kokorev L.S., Haritonov V.V. *Teplogidravlicheskie raschety i optimizaciya yadernyh ener-geticheskikh ustanovok* [Thermal-hydraulic calculations and optimization of nuclear power plants]. Moscow, Energoatomizdat Publ. 1986. 248 p. (in Russian).

7. Yuferov A.G., Ovcharenko M.K., Bologov P.M. *Teoriya vozmushhenij pervogo porjadka v zadache organizacii variantnyh nejtronno-fizicheskikh raschetov yadernyh reaktorov*: Preprint GNC RF-FEI-2850. [First-order perturbation theory in the problem of the organization of neutron-physical calculations variants of nuclear reactors]. Obninsk, FEI Publ., 2000 (in Russian).

8. Yuferov A.G., Nikolaev M.A. *Algoritmy organizacii variantnyh proektnyh raschetov* [Algorithms for organization of the variant design calculations]. *Nauchno-tehnicheskij vestnik Povolzh'ya*. 2013, no. 6, pp. 388–393 (in Russian).

9. Ionkin V.I. *Neytronno-fizicheskie harakteristiki reaktorov kosmicheskikh ustanovok. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Neutron-physical characteristics of the reactor space installations. Dr. tech. sci. diss.]. Obninsk, 2001. 65 p. (in Russian).

### Authors

Yuferov Anatolij Gennad'yevich, Head of Department

E-mail: anatolij.yuferov@mail.ru

Linnik Vladimir Aleksandrovich, Leading Researcher

Nikolaev Maxim Aleksandrovich, PhD Student

E-mail: ba-by@yandex.ru