УДК 519.87:621.039.5

ИДЕОЛОГИЯ И ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНО-ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЯЭУ

А.В. Клименко *, В.Л. Миронович **

**** ОФ «Институт системно-экономических исследований им. Я.В.Шевелёва»***
144001, г.Электросталь, Московская обл., ул. К.Маркса, 6а
***** Обнинский институт атомной энергетики НИЯУ МИФИ***
249040, Калужская обл., г.Обнинск, Студгородок, 1

Описана итерационная схема оптимизации системы звеньев ядерного топливно-энергетического комплекса (ЯТЭК). Одним из таких звеньев является ядерная энергетика (ЯЭ). Оптимизация параметров ядерной энергетической установки (ЯЭУ) итерационно связана с оптимизацией структуры ЯЭ как звена системы ЯТЭК. Последовательно оптимизируя звенья системы ЯТЭК, получают функции связи между звеньями – потоки материалов и их цены как функции времени. На каждой итерации при оптимизации конкретного звена внешние потоки и цены берутся из оптимизированных на этой же итерации других звеньев системы. Потоки и цены, полученные при оптимизации рассматриваемого звена на очередной итерации, передаются для оптимизации других звеньев в данной итерации. По такому же принципу оптимизируются и конкретные ЯЭУ. Последовательно оптимизируя все звенья системы ЯТЭК, добиваются сходимости планов (решений) развития и размещения всех звеньев. Так обеспечивается сходимость всех функций времени, включая потоки материалов и их цены, позволяющая найти один или несколько локально-оптимальных планов развития и размещения ТЭК России, а заодно и энергетических установок (ЭУ) на угле, газе, ЯЭУ и прочих ЭУ. Если локально-оптимальных планов счетное число, то можно выбрать наилучший из них. При поступлении новой информации относительно любого фактора математических моделей звеньев системы ЯТЭК следует заново выполнить оптимизацию с учетом сделанных затрат, строящихся и уже введенных ЭУ. Указаны проблемы системной оптимизации звеньев ЯТЭК как функционала оптимизации ЯЭУ. До настоящего времени не существует теории вырожденных задач оптимизации, хотя именно такие задачи являются реальными [1]. Одной из важных проблем в решении вырожденных задач оптимизации является проблема сходимости при оптимизации произвольного звена системы ЯТЭК к локально-оптимальному плану, согласованному с локально-оптимальными планами остальных звеньев. Не менее важной проблемой такого класса задач является возникновение повторяющихся циклов во внутренних итерациях в ходе оптимизации плана отдельного звена системы ЯТЭК. Эта особенность требует включения в алгоритмы оптимизации дополнительных алгоритмов выхода из циклов.

Ключевые слова: вырожденная задача оптимизации, система, ядерный топливно-энергетический комплекс, экономика, энергетика, энергосистема, энергоустановка, ядерная энергетическая установка, оптимальность, конкурентоспособность.

ИТЕРАЦИОННАЯ СХЕМА Я.В. ШЕВЕЛЁВА ПОЛУЧЕНИЯ ЛОКАЛЬНО-ОПТИМАЛЬНОГО ПЛАНА ДЛЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Как показано в [2, 3], ни одна из эксплуатирующихся и проектируемых перспективных ЯЭУ не оптимальна по экономическому критерию суммарных приведенных затрат на всю программу развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) России (теоретически на бесконечном интервале планирования). Как следствие, конкурентоспособность таких ЯЭУ в сравнении с ЭУ традиционной энергетики находится под угрозой.

Экономические критерии, принятые в бизнесе, например, ЧДД – чистый дисконтированный доход (NPV – Net Present Value), ВНД – внутренняя норма доходности (IRR – Internal Rate of Return), ДПО – дисконтированный период (срок) окупаемости (DPB – Discounted Payback Period), являются производными универсального критерия суммарных приведенных затрат. Они вычисляются автоматически для оптимального плана по критерию суммарных приведенных затрат, и не меняют оптимальный план.

Рассмотрим методологию оптимизации параметров ЯЭУ в системе ЯТЭК по Я.В. Шевелёву [4].

Система ЯТЭК в упрощенном виде представлена на рис. 1. Схема не является детальной, поскольку представлена лишь интегральными звеньями добычи урана, изотопного обогащения урана, изготовления ядерного топлива (фабрикация топливных элементов, кассет, сборок), ядерной энергетики (все имеющиеся и проектируемые ЯЭУ), радиохимической переработки облученного топлива, хранения и захоронения облученных материалов.

При оптимизации i-го звена системы ЯТЭК решаются задачи развития и размещения производства с технологией i, включая оптимизацию параметров как предприятий (моменты ввода предприятий в эксплуатацию, установленные мощности, режимы работы, виды технологии, потоки материалов на входе и выходе, запасы складов материалов и т.д.), так и самой технологии i (параметры геометрии, управляющие параметры и интенсивности процессов). Для этого строятся динамические модели оптимизации звеньев. На выходе решений таких моделей появляются потоки материалов и цены всех факторов модели, включая цены всех материалов. Поскольку схема оптимизации системы ЯТЭК итерационная, то на очередной итерации i-го звена в качестве внешних спросов на материалы, которые производит это звено, служат потоки материалов сырья, полученные при оптимизации $i + 1$-го звена, а внешними ценами сырья материалов на входе в звено i служат цены произведенной продукции в звене $i - 1$. В результате оптимизации i-го звена корректируются (уточняются) потоки и запасы складов для продукции этого звена, поступающей как «сырье» в звено $i + 1$ для его последующей оптимизации. Одновременно корректируются (уточняются) и цены продукции звена i, учитываемые как внешние цены сырья при оптимизации звена $i + 1$. Так, последовательно оптимизируя все звенья системы ЯТЭК, добиваются сходимости планов (решений) развития и размещения всех звеньев. В этом случае обеспечивается сходимость всех функций времени, включая потоки и цены материалов. Эта сходимость обеспечивает нахождение одного или нескольких локально-оптимальных планов развития и размещения ТЭК России. Если локально-оптимальных планов счетное число, то, сравнивая их функционалы (значения целевой функции), можно выбрать наилучший из них. При поступлении новой информации относительно любого фактора моделей звеньев системы ЯТЭК следует заново провести оптимизацию системы звеньев. Оптимизацию в этом случае следует проводить с учетом сделанных затрат, строящихся и уже введенных мощностей.

Рис. 1. Итерационная схема Я.В.Шевелёва получения локально-оптимального плана для сложных систем (на примере упрощённой системы ядерного топливно-энергетического комплекса)

Представим конспективно логику системной оптимизации параметров ЯЭУ по экономическому критерию.

• **На входе** системной оптимизации требуются

– графики внешних **цен сырья** во времени (на топливо требуемой геометрии и изотопного состава; на материалы, используемые в оборудовании ЯЭУ; на оборудование);

– **список** всех имеющихся проектов ЯЭУ, выполненных в оптимальных (насколько это возможно) ценах системы ЯТЭК.

• **На выходе** системной оптимизации формируются

– **объемы** (**потоки**) материалов оборудования ЯЭУ (топлива, требуемой конфигурации; материалов деталей и оборудования ЯЭУ);

– **структура** ЯЭ (временные графики нагрузок всех ЯЭУ), обеспечивающая оптимальную долю выработки энергии в энергосистеме во времени; на уровне энергосистемы (ТЭК) оптимизируются одновременно все ее подсистемы (угольная, нефтяная, газовая, гидро, распределительные сети, ЯТЭК и др);

– **суммарные потоки** во времени всех изотопов, всех материалов, требуемых для ЯЭУ, вошедших в оптимальный план (оптимальную структуру) развития ЯЭ;

– графики внутренних **цен производства** для потоков облученных материалов (топливные сборки, материалы оборудования), подлежащих продаже другим подразделениям ЯТЭК или экономики. Например, по этим **ценам** продаются облученные топливные сборки звену радиохимической переработки.

• **На входе** математической модели предприятия (энергоблока), отрасли, системы отраслей (энергосистемы) каждая технология и ресурс потребляются по внутренней **цене потребления**:

$$Ц_{потр.} = Ц_{сырья} + \lambda,$$

где $Ц_{сырья}$ – внешняя цена сырья, λ – здесь множитель Лагранжа потребления сырья.

Если **З** – функционал, а ***x*** – ресурс или интенсивность технологии (переменная модели), то множитель Лагранжа $\lambda = \partial\mathbf{З}/\partial\boldsymbol{x}$. Он показывает, насколько изменится величина функционала при изменении границы переменной модели или ресурса модели на единицу и является алгебраической величиной. Как видно, внутренняя цена потребления сырья $Ц_{потр.}$ отличается от внешней (прейскурантной) цены сырья на величину алгебраической добавки. Эта добавка и есть множитель Лагранжа.

• **На выходе** математической модели предприятия (энергоблока), отрасли, системы отраслей (энергосистемы) каждая технология и ресурс производят продукты по внутренней **цене производства:**

$$Ц_{произв.} = Ц_{прод.} - \lambda,$$

где $Ц_{прод.}$ – внешняя (прейскурантная) цена продукции, λ – здесь множитель Лагранжа производства продукции.

Как видно, внутренняя цена производства продукции $Ц_{произв.}$ отличается от внешней (прейскурантной) цены продукции на величину алгебраической добавки – множителя Лагранжа.

Иначе говоря, на каждой новой итерации поиска оптимума по математической модели внутренняя **цена потребления (производства)** любого фактора (материала) этой итерации определяется как сумма внешней **цены сырья (продукции)** этого фактора предыдущей итерации с алгебраическим значением **множителя Лагранжа потребления (производства)** продукции предыдущей итерации.

Итерации заканчиваются, когда на предыдущей и текущей итерациях наблюдаются совпадения значений **цен потребления сырья**, а также **цен производства продукции**, т.е. когда и для потребления сырья, и для производства продукции $\lambda = 0$. Другими словами, когда внешние цены потребления (производства) совпадают с внутренними ценами потребления (производства).

В оптимальном плане все значения множителей $\lambda = 0$. Значения $\lambda \neq 0$ допускаются в оптимальном плане лишь для внешних границ ресурсов и технологий, которые невозможно по разным причинам изменить, а переменные модели вышли на эти границы. Например, нельзя изменить температуру кипения чистого натрия в системе с заданным давлением.

Для наглядности рассмотрим (рис. 2) фрагмент оптимизации концентрации изотопа U^{235} в малом сегменте твэла, расположенного на расстоянии ***r*** от центральной оси активной зоны цилиндрического реактора и на высоте ***h*** от центральной плоскости активной зоны.

Пусть при оптимизации функционала **З** (суммарных приведенных затрат) среди вектора переменных, подлежащих оптимизации, есть переменная – концентрация ***x*** U^{235} в конкретном твэле на его высоте ***h***, расположенном в кассете на расстоянии ***r*** от центра активной зоны. Пусть на итерации *k* в модели оптимизации получен для уравнения выгорания U^{235} множитель Лагранжа $\lambda > 0$, например, $\lambda = 3{,}5$ [млн. руб./ %U^{235}], т.е. $\lambda = \partial\mathbf{З}/\partial\boldsymbol{x} = +3{,}5$ [млн. руб./%U^{235}]. Этот множитель появляется в двойственном решении задачи оптимизации.

Другими словами, $\partial\mathbf{З} = \lambda \times \partial\boldsymbol{x} = 3{,}5$ [млн. руб./%U^{235}] $\times\ \partial\boldsymbol{x}$ [%U^{235}]. Стремясь к оптимальному решению, нужно уменьшать функционал, т.е. придти к отрицательным значениям его дифференциала (вариации) $\partial\mathbf{З} < 0$. Для этого следует сделать $\partial\boldsymbol{x} < 0$.

Значит, на следующей $k+1$-ой итерации снижение концентрации U^{235} на каждый 1% в этом месте твэла приведет к улучшению решения на пути поиска оптимума, т.е. к снижению значения функционала (если функционалом являются приведенные затраты **З**) на 3,5 млн. руб.

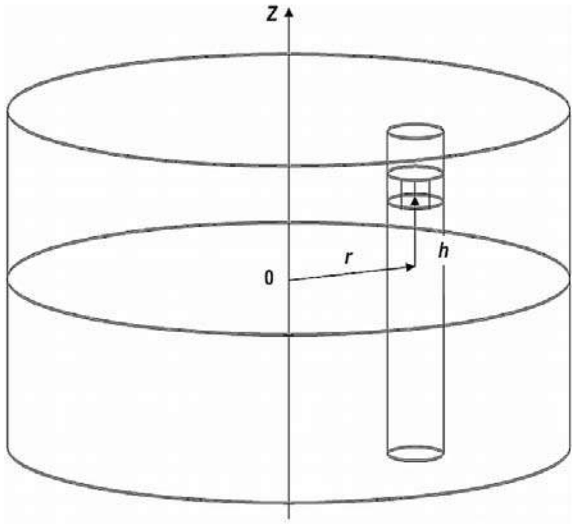

Рис. 2. Цилиндрическая активная зона ядерного реактора. На расстоянии ***r*** находится твэл, в котором оптимизируется концентрация ***x*** изотопа U^{235}. Сегмент твэла, в котором оптимизируется концентрация ***x***, находится на высоте ***h*** от центра твэла

Если же для этого случая оказалось, что множитель Лагранжа $\lambda < 0$, например, $\lambda = -3{,}5$ [млн. руб. / %U^{235}], то на следующей $k+1$-ой итерации увеличение концентрации U^{235} на каждый 1% в этом месте твэла приведет к улучшению решения на пути поиска оптимума, т.е. к снижению значения функционала на 3,5 млн. руб.

Подобным образом следует оптимизировать все параметры ЯЭУ до получения множителей Лагранжа $\lambda = 0$ для всех параметров установки.

Если оптимизированная по рассмотренной схеме ЯЭУ **входит** в оптимальный план ЯЭ как части энергосистемы, то она **может быть** конкурентоспособной на рынке.

Если же ЯЭУ вошла в оптимальный план как установка, замыкающая энергетический баланс энергосистемы, то ее конкурентоспособность окажется неустойчивой. Колебание конъюнктуры рынка (например, снижение спроса) может исключить эту ЯЭУ из оптимального плана и, следовательно, сделать ее неконкурентоспособной.

Если оптимизированная ЯЭУ **не войдет** в оптимальный план ЯЭ как части энергосистемы, то она **не сможет быть** конкурентоспособной на рынке. В этом случае следует сосредоточиться либо на другой **конструкции** (схеме) ЯЭУ, либо на другой **концепции** ЯЭУ.

Здесь уместно вспомнить слова Ясена Владимировича Шевелёва: «*Наилучшим образом спроектированная* (*оптимизированная*) *ЯЭУ может быть хуже пустого варианта, т.е. варианта, когда эта ЯЭУ не строится*».

В сложных системах по этой итерационной схеме можно получить только локально-оптимальный план.

Задача оптимизации сложных систем относится к самому сложному классу вырожденных задач оптимизации. Теории же вырожденных задач оптимизации до настоящего времени не существует. Между тем, именно такие задачи являются реальными [5, 6].

Замечание. Не следует связывать вырожденные задачи оптимизации с вырожденными матрицами. Вырожденные задачи оптимизации имеют дело с неособенными матрицами, т.е. с матрицами, имеющими обратные матрицы и, следовательно, решения. Однако природа рассматриваемых задач такова, что решения их – вырожденные, т.е. один или более компонентов базисного вектора решения равны нулю.

ПРОБЛЕМЫ СИСТЕМНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЗВЕНЬЕВ ЯТЭК

1. Проблема сходимости итераций в вырожденной задаче оптимизации произвольного i-го звена системы ЯТЭК к локально-оптимальному плану этого звена, согласованному с локально-оптимальными планами остальных звеньев системы ЯТЭК.

В терминах задачи линейного программирования, являющегося самым нижним уровнем алгоритма оптимизации нелинейной задачи [7], оптимизационная задача выглядит так:

$$\mathbf{З} = \boldsymbol{c}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \to \min \tag{1}$$

при ограничениях

$$\boldsymbol{Ax} = \boldsymbol{b}, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{r} \le \boldsymbol{x} \le \boldsymbol{s} \quad (\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s} \ge 0). \tag{3}$$

Здесь **З** – целевая функция (функционал), подлежащая оптимизации; $\boldsymbol{c}$ – вектор-столбец коэффициентов целевой функции; $\boldsymbol{A}$ – матрица условий-ограничений задачи оптимизации; $\boldsymbol{x}$ – вектор-столбец переменных задачи оптимизации; $\boldsymbol{b}$ – вектор-столбец свободных членов (правая часть ограничений); $\boldsymbol{r}, \boldsymbol{s}$ – векторы-столбцы числовых ограничений, налагаемых на переменные задачи.

Решение такой задачи $\boldsymbol{x} = \boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b}$ доставляет минимум целевой функции **З**, где $\boldsymbol{A}^{-1}$ – обратная матрица исходной матрицы $\boldsymbol{A}$. Предполагается, что система уравнений (2) и (3) совместна и решение существует.

Вырожденность оптимизационной задачи создает проблему сходимости итераций вырожденных решений между звеньями системы ЯТЭК. Поясним это.

Обычно размерность рядовой обратной матрицы $\boldsymbol{A}^{-1}$ при оптимизации произвольного звена системы ЯТЭК составляет не менее 10 000×10 000. Например, решение задачи (базис) в произвольном звене системы ЯТЭК таково.

На первой итерации

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b})^{\mathrm{T}} = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{8000}, 0, 0, 0, \ldots, x_{9000}, x_{9001}, x_{9002}, \ldots, x_{10000}\}.$$

На второй итерации

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b})^{\mathrm{T}} = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{5000}, x_{5001}, 0, 0, 0, \ldots, x_{5501}, 0, x_{5503}, \ldots, x_{6002}, \ldots, x_{9000}, \ldots$$
$$\ldots, x_{9400}, 0, 0, 0, \ldots, x_{9901}, \ldots, x_{9940}, 0, 0, 0, \ldots, x_{9971}, x_{9972}, \ldots, x_{10000}\}.$$

\- -

На пятой и шестой итерациях

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}} = (\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{b})^{\mathrm{T}} = \{x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{6000}, x_{6001}, 0, 0, 0, \ldots, x_{6501}, 0, x_{6503}, \ldots, x_{7002}, \ldots, x_{8000}, \ldots$$
$$\ldots, x_{8400}, 0, 0, 0, \ldots, x_{8901}, \ldots, x_{9940}, 0, 0, 0, \ldots, x_{9981}, x_{9982}, \ldots, x_{10000}\}.$$

Здесь для вектора решения $\boldsymbol{x}$ часть координат $x_j > 0$; $j = 1, 2, 3, \ldots, 10000$. Там, где в базисе координаты равны нулю, они указаны в явном виде.

Сходимость базисов достигается только в одной точке. Эта точка – локальный оптимум.

2. Природа вырожденных задач оптимизации приводит к **цикличности во внутренних итерациях** при оптимизации плана отдельного i-го звена системы ЯТЭК. В таком случае в алгоритмы оптимизации требуется включать дополнительные алгоритмы выхода из циклов [5 – 7].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

До сих пор ни одна ЯЭУ, ни одна ядерная технология ЯТЦ не оптимизировались по экономическому критерию в энергосистеме (ТЭК) с целью создания коммерческих ЯЭУ и ядерных технологий.

Итерационная схема Я.В. Шевелёва для поиска оптимальных планов сложных систем (включая экономику и энергетику) является, по сути, декомпозицией сложных систем на отдельные подсистемы, оптимизацией этих подсистем по критериям, согласованным с принятым основным критерием всей системы, и дальнейшей увязкой решений отдельных подсистем в единое согласованное решение всей системы. Этот метод позволяет находить локально-оптимальные планы для всей системы. Если таких планов счетное число, то среди них можно выбрать наилучший в смысле принятого общего критерия всей системы. Этот план и будет глобальным оптимумом.

При оптимизации параметров ЯЭУ как элемента системы ЯТЭК, т.е. решении прямой задачи оптимизации ЯЭУ (ее принято называть *задачей об интенсивностях технологий*), автоматически получается и решение двойственной задачи. Последнюю задачу, сопряженную к прямой задаче оптимизации, принято называть *задачей о ценах* (множителях Лагранжа). Множители Лагранжа показывают, насколько изменится оптимизируемый функционал при изменении конкретного параметра (или переменной задачи) на единицу. Этот системный факт является руководством к действию (управляющим воздействием) для дальнейшего изменения значения переменной (или ее границы) с целью оптимизации функционала. В этом и заключается суть всей оптимизации параметров ЯЭУ.

На пути реализации алгоритма оптимизации ЯЭУ приходится преодолевать сложности, связанные с поиском оптимальных планов всех звеньев ЯТЭК, с системой, поставляющей управляющие функции (цены) для оптимизации параметров ЯЭУ. Преодоление этих сложностей, связанных с природой вырожденных задач оптимизации, состоит в приведении алгоритмов сходимости решений отдельных звеньев к согласованному единому решению, а также в устранении природной цикличности алгоритмов поиска оптимальных планов отдельных звеньев.

Итерационная схема оптимизации сложной системы ЯТЭК реализована в компьютерном комплексе программ (коде) TOBAS [4, 7].

Литература

1. *Клименко А.В.* Вырожденные задачи оптимизации экономики и энергетики // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. №3. С.144-154.

2. *Клименко А.В.* Вырожденные задачи оптимизации и оптимальность ЯЭУ // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2015. №4. С. 133-143.

3. *Клименко А.В.* Вырожденные задачи оптимизации экономики и конкурентоспособность ЯЭУ. [Электронный ресурс] / – Электросталь: ОФ «Институт системно-экономических исследований им. А.Я. Шевелёва», 2015. – (CD-ROM).

4. *Шевелёв Я.В., Клименко А.В.* Эффективная экономика ядерного топливно-энергетического комплекса. – М.: РГГУ, 1996. - 736 с.

5. Линейные неравенства и смежные вопросы. / Сб.статей под ред. Г.У. Куна и А.У. Таккера. – М.: Издательство иностранной литературы, 1959. - 472 с.

6. *Гасс С.* Линейное программирование (методы и приложения). – М.: Гос. изд-во физ.-мат. литературы, 1961. - 304 с.

7. *Клименко А.В.* Математическая модель оптимизации энергосистемы и ее применение. / Монография. - М.: НИЯУ МИФИ, 2010. - 292 с.

Поступила в редакцию 16.01.2016 г.

Авторы

Клименко Анатолий Васильевич, директор Общественного фонда «Институт системно-экономических исследований им. Я.В. Шевелёва»; доктор техн. наук, профессор
E-mail: anatoly-klimenko@yandex.ru

Миронович Владимир Львович, доцент Обнинского института атомной энергетики НИЯУ МИФИ
E-mail: rio@iate.obninsk.ru

UDC 519.87:621.039.5

SYSTEM AND ECONOMIC OPTIMIZATION PROBLEMS OF NPPs AND ITS IDEOLOGY

Klimenko A.V.*, Mironovich V.L.**

*Social Fund «Ya.V. Shevelyov Institute for Systems and Economic Research»
6a K. Marx str., Elektrostal', Moscow Reg., 144001 Russia
**Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, National Research Nuclear University «MEPhI»
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

ABSTRACT

The iterative circuit design of optimization of system of links of nuclear fuel and energy complex (NFEC) is presented. One of such links is the nuclear power (NP). Optimization of parameters of a nuclear power plant (NPP) is linked is iterative with structure NP optimization as system NFEC link. Sequentially optimizing system NFEC links, gain link functions between links - material flows and their prices as time functions. On each iteration by optimization of a concrete link the external streams and the external prices are taken from optimization on the same iteration of other links of system NFEC. In turn, streams and the prices gained as a result of optimization of the observed link on some iteration, are transmitted for optimization of other links of system NFEC on the same iteration. By the same principle are optimized also concrete NPPs. So, sequentially optimizing all links of system NFEC, convergence of plans (solutions) of development and disposing of all links achieve. In this case convergence of all functions of a time, including material flows and the prices of materials is ensured. This convergence ensures determination of one or several is local-optimum plans for development and disposing of the fuel and energy complex (FEC) of Russia, and together with it and power plants (PPs) at an coal, PPs on gas, NPPs. If is local-optimum plans countable number, that, comparing their objective functionals (values of the objective function), it is possible to choose best of them. At arrival of the new information concerning any factor of mathematical models of links of system NFEC, it is necessary to make optimization of system of links anew. Optimization in this case should be conducted with allowance for the made costs which are under construction and already injected powers.

Problems of system optimization of links NFEC as functional of optimization NPP are indicated. Till now there is no theory of degenerate optimization problems. Meanwhile, such problems are real problems. One of the important problems of degenerate optimization problems is the problem of convergence of iterations by optimization of the arbitrary link of system NFEC to the is local-optimum plan of this link agreed is local-optimum plans of remaining links of system NFEC. Other important problem of degenerate optimization problems is the nature of these problems generating iterated loops in inner iterations by optimization of the plan of a separate link of system NFEC. It requires turning on in algorithms of optimization still algorithms of escaping of loops.

Keywords: degenerate optimization problem, system, nuclear fuel and energy complex, economy, power engineering, electric power system, power plant, nuclear power plant, optimality, competitive strength.

REFERENCES

1. Klimenko A.V. Vyrozhdennye zadachi optimizacii ekonomiki i energetiki [Degenerate optimization problems of economy and power]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2015, no. 3, pp. 144-154 (in Russian).

2. Klimenko A.V. Vyrozhdennye zadachi optimizacii i optimalnost' YaEU [Degenerate optimization problems and optimality of NPPs]. *Izvestia vuzov. Yadernaya energetika*. 2015, no. 4, pp. 133-143. (in Russian).

3. Klimenko A.V. Degenerate optimization problems of economy and competitive of NPPs [Electronic resource]. Elektrostal'. Social Fund «Ya.V. Shevelyov Institute for Systems and Economic Research», 2015 (CD-ROM in Russian).

4. Shevelyov Ya.V., Klimenko A.V. Effektivnaya ekonomika yadernogo toplivno-energeticheskogo kompleksa [Effective economics of the nuclear fuel and energy complex]. Moscow. RGGU Publ., 1996. 736 p. (in Russian)

5. Linejnye neraventstva i smezhnie voprosi. Sbornik statej pod redakciej H.W. Kuhn i A.W. Tucker [Linear Inequalities and Related Systems. Edited by H.W.Kuhn and A.W.Tucker. Princeton. 1956]. Moscow. Inostrannaya literatura Publ., 1959. 472 p. (in Russian).

6. Gass S.I. Linejnoe programmirovanie (metody i prilozheniya) [Gass S.I. Linear Programming. Methods and Applications. New York – Toronto – London. 1958]. Moscow. Fiziko-matematicheskaya literatura State Publ., 1961. 304 p. (in Russian)

7. Klimenko A.V. Matematicheskaya model' optimizatsii energosistemy i eyo primenenie: Monografiya [Mathematical model of optimization of an electric power system and its application. The Monography]. Moscow. NRNU MEPhI Publ., 2010. 292 p. (in Russian)

Authors

Klimenko Anatoly Vasil'evich, Director of Social Fund «Ya.V. Shevelyov Institute for Systems and Economic Research», Dr.Sci. (Engineering), Professor
E-mail: anatoly-klimenko@yandex.ru

Mironovich Vladimir L'vovich, Associate Professor
E-mail: rio@iate.obninsk.ru