

УДК 621.311.22

## **Эффективный подход к оптимизации параметров сложных теплоэнергетических установок**

**А.М. Клер, П.В. Жарков, Н.О. Епишкин**

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск*

E-mail: pzharkov@isem.sei.irk.ru

Разработан новый подход к решению задач оптимизации непрерывных параметров теплоэнергетических установок, основанный на такой организации оптимизационного процесса, при которой решение системы уравнений, описывающих теплоэнергетическую установку, достигается только в конечной точке оптимизационного процесса. На примере оптимизации параметров угольного энергоблока на суперсверхкритические параметры пара показана эффективность предлагаемого подхода по сравнению с ранее используемым, в котором система уравнений решалась на каждой итерации оптимизационного процесса.

**Ключевые слова:** оптимизация параметров теплоэнергетических установок, угольный энергоблок на суперсверхкритические параметры.

Теплоэнергетические установки (ТЭУ) играют значительную роль в электроэнергетике России и мира в настоящее время и будут ее играть в обозримом будущем. Строительство и эксплуатация ТЭУ связана со значительными капиталовложениями и существенными эксплуатационными затратами. Следует отметить, что энергетическая и экономическая эффективность ТЭУ в значительной мере определяется их технологической схемой, параметрами технологических связей между элементами схемы и внутренними конструктивными параметрами элементов. В связи со сложностью технологических схем ТЭУ и разнообразием физико-химических процессов, протекающих в их элементах, основным способом исследования становятся математическое моделирование и схемно-параметрическая оптимизация. Практически единственным эффективным инструментом решения таких оптимизационных задач являются градиентные методы нелинейной оптимизации. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН на протяжении длительного периода проводится разработка и использование градиентных методов для задач оптимизации параметров различных энергетических установок [1–4].

Ограничения-равенства оптимизационной модели ТЭУ представляют собой системы, включающие большое число нелинейных алгебраических и трансцендентных уравнений. Эти системы имеют одну важную особенность, являющуюся следствием того, что каждый элемент технологической схемы ТЭУ соединен технологическими связями (потоками рабочих тел и теплоносителей) напрямую (а не через другие элементы) лишь с небольшим числом элементов технологической схемы. Эта особенность состоит в том, что в каждое уравнение входит лишь малая часть переменных модели. Данное обстоятельство позволяет таким образом спланировать вычислительный процесс (т.е. определить порядок расчета отдельных уравнений), что большинство переменных будут определяться «по цепочке»

и не потребуют задания начального приближения, в то время как число переменных, требующих задания начального приближения, будет невелико [5]. Это позволяет свести расчет модели ТЭУ к решению эквивалентной системы уравнений небольшой размерности. Исходя из сказанного, систему ограничений-равенств оптимизационной модели ТЭУ можно представить в следующем виде:

$$z = \Psi(x, y), \quad (1)$$

$$H(x, y, z) = 0, \quad (2)$$

где  $x \in E^n$  — вектор независимых переменных, подлежащих выбору,  $z \in E^k$  — вектор переменных, вычисляемых по цепочке,  $y \in E^s$  — вектор переменных, вычисляемых итерационно и требующих задания начального приближения,  $\Psi$  —  $k$ -мерная векторная функция,  $H$  —  $s$ -мерная векторная функция. Отметим, что  $s \ll k$ . Подставляя (1) в (2), получим

$$H(x, y, \Psi(x, y)) = 0. \quad (3)$$

Выражение (3) можно представить в виде векторной функции

$$\Phi(x, y) = 0. \quad (4)$$

Разрешив выражение (4) относительно  $y$ , получим

$$y = \Phi^{-1}(x). \quad (5)$$

где  $\Phi^{-1}$  — векторная функция, определение которой сводится к решению системы уравнений, как правило, методами Зейделя или Ньютона, при этом требуется задание начального приближения для  $y$ . С учетом (5) выражение (1) может быть представлено как

$$z = \Psi(x, \Phi^{-1}(x)) \text{ или } z = \Phi^{-1}(x). \quad (6)$$

Используя выражения (5) и (6), целевую функцию задачи оптимизации  $F(x, y, z)$  удобно представить в виде

$$F(x, y, z) = F(\Phi^{-1}(x), \Phi^{-1}(x)) = f(x). \quad (7)$$

Аналогичным образом можно представить ограничения-неравенства  $G(x, y, z) \geq 0$  оптимизационной модели:

$$G(x, y, z) = \varphi(x, \Phi^{-1}(x), \Phi^{-1}(x)) = \varphi(x) \geq 0. \quad (8)$$

С учетом приведенных соотношений задачу нелинейной оптимизации, например, на минимум  $f(x)$ , можно представить в виде

$$\min_x f(x) \quad (9)$$

при условиях

$$\varphi(x) \geq 0, \quad (10)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad (11)$$

где  $\underline{x}$  и  $\bar{x}$  — вектора, компоненты которых задают границы диапазона изменения соответствующей компоненты вектора  $x$ . Следует заметить, что при каждом обращении к расчету  $f$  и  $\varphi$  требуется решать систему уравнений (1) и (2).

Такой «прямой» подход имеет недостатки, которые заключаются в больших затратах вычислительных ресурсов; невозможности проведения расчета, если в стартовой либо в какой-то промежуточной точке итерационного процесса система (1), (2) не имеет решения; наличии сильного влияния погрешности решения системы (1), (2) на результаты оптимизации.

В связи с этим предложен новый, эффективный подход к решению задачи (9)–(11). Этот подход дает возможность обойтись без решения системы (1), (2) на каждой итерации

оптимизационного процесса, позволяет совместить решение системы с процессом оптимизации и достичь решения системы с требуемой точностью в оптимальной точке. Для этого каждое уравнение системы (2) представляется в виде

$$\delta_j = h_j(x, y, z), \quad j = 1, \dots, s, \quad (12)$$

где  $\delta_j$  — невязка  $j$ -го уравнения системы (2). Для каждого  $\delta_j$  вводится два ограничения-неравенства:

$$q_j^- = \Theta + \delta_j/\varepsilon_j \geq 0, \quad (13)$$

$$q_j^+ = \Theta + \delta_j/\varepsilon_j \geq 0, \quad (14)$$

где  $\Theta$  — вспомогательный оптимизируемый параметр,  $\varepsilon_j$  — величина, которой должен достичь модуль невязки  $\delta_j$  для того, чтобы система (1), (2) могла считаться решенной. Отметим, что  $\delta_j/\varepsilon_j$  является относительной невязкой  $j$ -го уравнения системы (2).

В рассматриваемом «непрямом» подходе оптимизируемыми параметрами являются компоненты векторов  $x, y$  и вспомогательный параметр  $\Theta$ . В первую очередь рассмотрим задачу поиска допустимого решения при котором с требуемой точностью решена система (1), (2) и удовлетворяются условия (10), (11). Для этого решается задача минимизации вспомогательного параметра  $\Theta$

$$\min_{x, y, \Theta} \Theta, \quad (15)$$

при условиях

$$Q^+(x, y, z, \Theta) \geq 0, \quad (16)$$

$$Q^-(x, y, z, \Theta) \geq 0, \quad (17)$$

$$G(x, y, z) \geq 0, \quad (18)$$

$$z = \Psi(x, y), \quad (19)$$

$$\underline{x} \leq x \leq \bar{x}, \quad (20)$$

$$\underline{y} \leq y \leq \bar{y}, \quad (21)$$

$$0 \leq \Theta, \quad (22)$$

где  $Q^+$  и  $Q^-$  —  $s$ -мерные векторные функции,  $j$ -е компоненты которых равны  $q_j^+$  и  $q_j^-$  соответственно. Назовем ее задачей I. Легко увидеть, что ограничения-неравенства, входящие в  $Q^+$ , обеспечивают уменьшение в процессе минимизации  $\Theta$  модулей относительных невязок, имеющих знак «+», а ограничения-неравенства, входящие в  $Q^-$ , обеспечивают уменьшение в процессе минимизации  $\Theta$  модулей относительных невязок, имеющих знак «-».

Обозначим переменные в точке решения этой задачи через  $x^D, y^D, z^D$ . Если все компоненты векторных функций  $Q^+(x^D, y^D, z^D)$  и  $Q^-(x^D, y^D, z^D)$  не больше 1, и  $G(x^D, y^D, z^D) \geq 0$ , то исходная задача оптимизации (9)–(11) имеет допустимое решение. В противном случае допустимого решения, при котором выполняются ограничения-неравенства и ограничения-равенства с требуемой точностью, нет.

Рассмотрим следующую задачу: задано некоторое значение целевой функции  $F^3$ . Требуется найти такие  $x^c, y^c, z^c$  при которых система (1), (2) удовлетворяется с требуемой точностью, задаваемой параметрами  $\varepsilon_j, j = 1, 2, \dots, s$ , система ограничений-неравенств (10) выполняется и соблюдается условие

$$F(x^c, y^c, z^c) - F^3 \leq \varepsilon^F, \quad (23)$$

где  $\varepsilon^F$  — требуемая точность приближения к заданному значению  $F^3$  сверху. Для этого в задачу (15)–(22) добавим вспомогательное ограничение на невязку целевой функции вида

$$q^F = \Theta - (F(x^c, y^c, z^c) - F^3)/\varepsilon^F \geq 0. \quad (24)$$

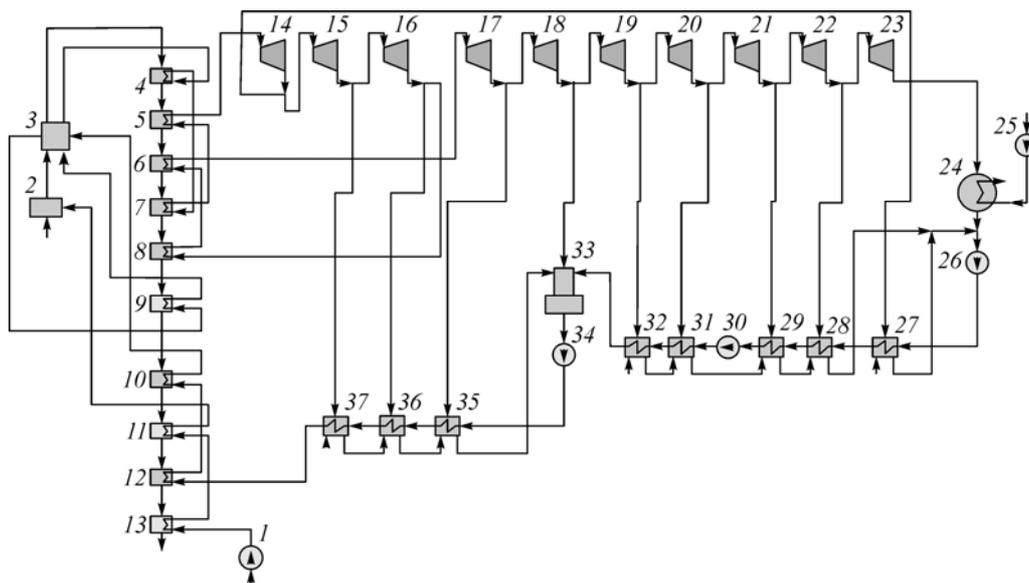
Назовем ее задачей П. Очевидно, что если в допустимой точке задачи П  $\Theta \leq 1$ , то условие (23) будет выполняться наряду с условиями, определяющими точность решения системы (1), (2). Следует отметить, что если для ограничений-равенств учитываются ограничения на относительные невязки как «сверху», так и «снизу», то для ограничений на целевую функцию учитывается только ограничение «сверху». Это не препятствует получению допустимых решений со значением  $\Theta \leq 1$  при которых  $F \leq F^3$ .

На основе решения задачи I и задачи П может быть построен следующий алгоритм вычислительного процесса решения исходной задачи. Решается задача I. Обозначим целевую функцию в точке решения через  $F^0$ . Для  $i = 1, 2, \dots$  определяется  $F^i = F^{i-1} - \Delta F$ ,  $i = 1, 2, \dots$ . Полагается  $F^3 = F^i$  и решается задача П. Процесс продолжается до тех пор, пока не найдется  $i$  такое, что при  $F^{i-1}$  вспомогательный параметр  $\Theta$  в точке решения задачи П будет отвечает условию  $\Theta \leq 1$ , а при  $F^i$  этот же параметр в точке решения указанному условию отвечать не будет. Очевидно, что оптимальное значение целевой функции  $F$  находится в интервале  $[F^{i-1}, F^i]$ . После локализации интервала, в котором находится оптимальное решение, его поиск осуществляется методом половинного деления.

Значение функции  $F^{i-1}$  полагается равным  $F'$ , а значение функции  $F^i$  полагается равным  $F''$ . Определяется  $F^T = (F' + F'')/2$ . Решается задача П при  $F^3 = F^T$ . Если в точке решения  $\Theta \leq 1$ , то  $F'$  полагается равным  $F^T$ , в противном случае  $F''$  полагается равным  $F^T$ . Возвращаемся к определению нового значения  $F^T$ . Процесс продолжается до тех пор, пока не выполнится условие  $(F' - F'') < \gamma$ . В этом случае в качестве оптимального значения целевой функции принимается  $F'$ , а в качестве оптимального значения параметров  $x, y, z$ , принимаются параметры  $x', y', z'$ , найденные в точке решения задачи, при котором получено значение  $F'$ . Предлагается рассмотренный подход к оптимизации параметров энергоустановок, основанный на минимизации относительных невязок, назвать непрямым-невязочным подходом.

Для демонстрации применения описанного выше непрямого-невязочного подхода, сводящегося к минимизации невязок, рассмотрим задачу оптимизации параметров угольного энергоблока мощностью 660 МВт. Следует отметить, что угольные энергоблоки, рассчитанные на суперсверхкритические параметры пара, считаются в настоящее время перспективными источниками энергии, сжигающими твердое топливо. Исследованию таких установок посвящено достаточно большое число работ, выполненных как в нашей стране, так и за рубежом (см., например, [6–9]). При этом все исследования энергоблоков проводились различными модификациями методов направленного перебора, позволяющими выбирать лишь небольшое число параметров. Такими же методами проводились исследования энергетических установок других типов (парогазовых и газотурбинных) на органическом топливе [10–15]. Использование подходов, подобных рассматриваемому в настоящей статье, для оптимизации непрерывных параметров теплоэнергетических установок или каких-либо других сложных технических систем в российских и зарубежных работах авторов неизвестно.

В ИСЭМ СО РАН для оптимизации значительного числа параметров ТЭУ был разработан эффективный градиентный метод «с памятью», обеспечивающий решение задачи оптимизации параметров с минимальным числом обращений к трудоемкому расчету технологической схемы ТЭУ [2]. При этом решалась задача (9)–(11). В настоящей работе решалась задача оптимизации параметров угольного энергоблока, расчетная технологическая схема которого приведена на рисунке, с применением указанного прямого и нового



Расчетная технологическая схема паротурбинной установки мощностью 660 МВт.

1 — дутьевой вентилятор, 2 — камера сгорания парового котла, 3 — топка парового котла, 4 — конвективный пароперегреватель первой ступени, 5 — конвективный пароперегреватель третьей ступени, 6 — промежуточный пароперегреватель третьей ступени, 7 — конвективный пароперегреватель второй ступени, 8 — промежуточный пароперегреватель второй ступени, 9 — зона максимальной теплоемкости, 10 — водяной экономайзер второй ступени, 11 — воздухоподогреватель второй ступени, 12 — водяной экономайзер первой ступени, 13 — воздухоподогреватель первой ступени, 14–23 — отсеки паровой турбины, 24 — конденсатор паровой турбины, 25 — циркуляционный насос, 26, 30 — конденсатные насосы первого и второго подъема давления конденсата, 27 — сальниковый подогреватель, 28, 29, 31, 32 — подогреватели низкого давления, 33 — деаэрактор, 34 — питательный насос, 35–37 — подогреватели высокого давления.

непрямого-невязочного подходов. При этом важно подчеркнуть, что в обоих случаях использовался один и тот же метод решения задачи нелинейного математического программирования «с памятью» и один и тот же программно-вычислительный комплекс. Различие состояло лишь в том, что в одном случае решалась задача (9)–(11), а в другом — задачи I и II. Для энергоблока с применением прямого и непрямого-невязочного подхода, основанного на минимизации относительных невязок, решались две задачи: максимизация КПД нетто и минимизация удельных капиталовложений.

Была построена математическая модель, включающая 997 информационно-входных (задаваемых) параметров, 918 информационно-выходных (вычисляемых) параметров, в том числе 23 параметра, вычисляемых итерационно и требующих задания начального приближения (компоненты вектора  $y$ ). Построение модели энергоблока проводилось с помощью разработанного в ИСЭМ СО РАН программно-вычислительного комплекса «Система машинного построения программ» [16], который на основе графически заданной технологической схемы установки и математических моделей ее элементов строил программу расчета установки и позволяет формировать задачи оптимизации ее параметров. В качестве материала для изготовления поверхностей нагрева последних ступеней пароперегревателей котельного агрегата рассматривалась сталь марки 10X16H16B2МБР. Для решения системы уравнений (5) при прямом подходе использовался метод Зейделя. В качестве независимых оптимизируемых параметров было принято 90 параметров, включающих давление и температуру острого пара и пара промперегрева, расход острого пара, давление пара в отборах на регенерацию и в конденсаторе турбины, прирост энтальпии теплоносителя в тепловоспринимающих поверхностях нагрева котла, толщины

и шаги труб этих поверхностей, массовые скорости теплоносителя и др. При оптимизации учитывалось 167 ограничений-неравенств, включающих ограничения на температуру и механические напряжения металла труб теплообменников, температуру продуктов сгорания на выходе из топки котла, температуру росы для первой ступени воздухоподогревателя, концевые температурные напоры теплообменников, ограничение на влажность на выходе из последнего отсека турбины и др.

В исходной точке решения задачи (назовем ее точка 0) были произвольно заданы значения оптимизируемых параметров и начальные значения итерационно-вычисляемых параметров. Эта точка оказалась недопустимой, в ней нарушалось 30 ограничений-неравенств. При использовании непрямого-невязочного подхода в результате решения задачи 1 была получена допустимая точка 2. Использование прямого подхода не позволило найти допустимой точки, где бы соблюдались все ограничения-неравенства. Итерационный процесс оптимизации остановился в недопустимой точке, обозначенной как точка 1, в которой было нарушено 25 ограничений-неравенств.

Полученная допустимая точка 2 была принята как стартовая при решении задач оптимизации на максимум КПД и на минимум удельных капиталовложений. Обе оптимизационные задачи решались с использованием прямого и непрямого-невязочного подходов. Результаты решения указанных оптимизационных задач представлены в таблице. Как видно, предлагаемый непрямо-невязочный подход позволил из точки 0 найти

Таблица

Результаты оптимизации энергоблока

	Исходная точка решения задачи (точка 0)	Минимизация невязок системы уравнений (ввод в допустимую область)		Максимум КПД		Минимум удельных капиталовложений	
		Прямой подход (точка 1)	Непрямой-невязочный подход (точка 2)	Прямой подход	Непрямой-невязочный подход	Прямой подход	Непрямой-невязочный подход
КПД нетто, %	–	–	46,84	47,98	48,45	44,19	44,03
Удельные капиталовложения, дол./кВт	–	–	3728,7	5865,8	5310,7	1936,8	1920,3
Давление ост-рого пара, МПа	38,17	28,05	36,17	36,99	37,22	15,77	15,70
Температура ост-рого пара, °С	732	651	731	744	749	671	670
Давление пара промежут-очного перегрева, МПа	7,43	7,55	5,23	5,25	4,88	4,46	4,30
Температура пара промежут-очного перегрева, °С	626	600	582	567	577	641	615
Расход ост-рого пара, кг/с	423,4	480,7	434,2	431,7	427,2	475,8	500,1
Полезная элек-трическая мощ-ность, МВт	628	628,8	617,5	622	626	655,7	673
Время расчета, мин	–	19	15	30	22	21	16
Количество нарушаемых ограничений-неравенств, шт	30	25	0	0	0	0	0

допустимую точку 2, а из нее найти лучшее допустимое значение критериев оптимизации, чем прямой подход. При этом на оптимизационные расчеты было затрачено меньше время.

При решении задач оптимизации параметров теплоэнергетических установок иногда возникают ситуации, когда при произвольном выборе в начальной точке значений оптимизируемых параметров решение системы уравнений (5) отсутствует. Старт оптимизационного процесса прямым методом из такой точки невозможен, применение непрямого-невязочного подхода позволяет из нее начать решение оптимизационной задачи. Для проверки работоспособности непрямого-невязочного подхода значения оптимизируемых параметров в исходной точке 0 выбирались таким образом, чтобы система уравнений (5) не имела решений. Для этого в качестве начальных значений массовых скоростей пара в первой и второй ступенях промежуточного пароперегревателя вместо  $600 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  были заданы значения, равные  $1200 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ . Из-за больших гидравлических сопротивлений в промежуточном пароперегревателе система уравнений (5) не имела решения. Использование непрямого-невязочного подхода позволило решить оптимизационную задачу из этой точки. Это объясняется тем, что решение системы (5) достигается только в конечной оптимальной точке процесса оптимизации.

Следует обратить внимание на то, что решение, в котором обеспечивается максимум КПД, достигается при высоких давлениях острого пара (36 МПа), а решение, в котором обеспечивается минимум удельных капиталовложений, — при весьма низких давлениях острого пара (16 МПа) (см. таблицу). Получение последнего результата оказалось возможным лишь за счет совместной оптимизации параметров отдельных элементов, в первую очередь толщины стенок труб теплообменных поверхностей котла. Это позволило учесть, что при снижении давления, с одной стороны, падает КПД, а с другой — уменьшается масса металла труб и снижаются капиталовложения.

Таким образом, можно сформулировать следующие утверждения.

1. Предложен новый не прямой-невязочный подход к оптимизации параметров теплоэнергетических установок, основанный на такой организации итерационного процесса оптимизации, при котором решение системы уравнений, описывающей процессы, протекающие в элементах установки, и технологические связи между этими элементами, достигается с требуемой точностью лишь в оптимальной точке.

2. Достоинством рассматриваемого подхода является способность стартовать из начальной точки, в которой отсутствует решение системы ограничений-равенств задачи оптимизации.

3. Эффективность предлагаемого подхода продемонстрирована на примере оптимизации параметров угольного энергоблока на суперсверхкритические параметры пара.

4. Показано, что не прямой-невязочный подход обеспечивает более устойчивый процесс ввода в допустимую область и позволяет лучше приближаться к оптимальной точке, чем прямой подход, кроме того, обеспечивается выигрыш по времени решения оптимизационных задач.

### Список литературы

1. Kler A.M., Potanina Yu.M., Maximov A.S. Accounting for the variable nature of heat loads in optimizing cogeneration combined heat and power plants // *Thermal Engng.* 2012. Vol. 59, No. 7. P. 550–556.
2. Клер А.М., Захаров Ю.Б., Потанина Ю.М. Согласованная оптимизация параметров охлаждаемой проточной части газовой турбины и параметров цикла ГТУ и ПРУ // *Теплофизика и аэромеханика.* 2014. Т. 21, № 3. С. 401–410.
3. Клер А.М., Захаров Ю.Б. Оптимизация параметров цикла ГТУ и конструктивных параметров проточной части газовой турбины с охлаждаемыми сопловыми и рабочими лопатками // *Теплофизика и аэромеханика.* 2012. Т. 19, № 4. С. 449–459.
4. Kler A.M., Potanina Y.M. Technical and economic studies on the optimization of prospective coal-fired power stations // *Intern. J. of Global Energy Iss. UK: Inderscience Enterprises Ltd.* 2003. Vol. 20, No. 4. P. 340–352.

5. Клер А.М., Деканова Н.П., Скрипкин С.К. и др. Математическое моделирование и оптимизация в задачах оперативного управления тепловыми электростанциями. Новосибирск: Наука, 1997. 120 с.
6. Тугов А.Н., Шварц А.Л., Котлер В.Р. Отечественные котельные установки на повышенные параметры пара : состояние и перспективы // Электрические станции. 2014. № 1. С. 9–13.
7. Тумановский А.Г., Алтухов М.Ю., Шварц А.Л., Авруцкий Г.Д., Вербовецкий Э.Х., Туголуков Е.А., Смышляев А.А., Хомёнок Л.А., Скоробогатых А.Н. Разработка пылеугольного энергоблока на сверхкритические параметры пара мощностью 660 МВт // Электрические станции. 2010. № 1. С. 18–27.
8. Саламов А.А. Новейший в Германии энергоблок ультраСКД // Энергетика за рубежом. 2011. № 2. С. 3–8.
9. Wang L., Yang Y., Dong Ch., Morosuk T., Tsatsaronis G. Parametric optimization of supercritical coal-fired power plants by MINLP and differential evolution // Energy Conversion and Management. 2014. Vol. 85. P. 828–838.
10. Sanjay Y. Investigation of effect of variation of cycle parameters on thermodynamic performance of gas-steam combined cycle // Intern. J. Energy. 2011. Vol. 36, No. 1. P. 157–167.
11. Jordal K., Bolland O., Björn F.M., Torisson T. Optimization with genetic algorithms of a gas turbine cycle with H<sub>2</sub>-separating membrane reactor for CO<sub>2</sub> capture // Intern. J. of Green Energy. 2005. Vol. 2, No. 2. P. 167–180.
12. Srinivas T. Thermodynamic modelling and optimization of a dual pressure reheat combined power cycle // Sadhana. 2010. Vol. 35, No. 5. P. 597–608.
13. Bojici L., Neaga C. Technical optimization of a two-pressure level heat recovery steam generator // U.P.B. Sci. Bull. Series D. 2012. Vol. 74, No. 2. P. 209–216.
14. Kavanagh R.M., Parks G.T. A systematic comparison and multi-objective optimization of humid power cycles. P. I. Thermodynamics // ASME J. of Engng for Gas Turbines and Power. 2009. Vol. 131. P. 041701-1–041701-10.
15. Toffolo A., Lazaretto A. Evolutionary algorithms for multi-objective energetic and economic optimization in thermal system design // Energy. 2002. Vol. 27, № 6. P. 549–569.
16. Клер А.М., Деканова Н.П., Щёголева Т.П. и др. Методы оптимизации сложных теплоэнергетических установок. Новосибирск: Наука, 1993. 116 с.

*Статья поступила в редакцию 19 марта 2015 г.,  
после доработки — 22 мая 2015 г.*