

УДК 621.311.22

Разработка методики совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в системе расчета показателей тепловой экономичности оборудования ПГУ-ТЭС

А.П. Зимин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, С.Д. Горшенин, В.А. Буданов, А.Е. Барочкин
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: lgv83@yandex.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Известна методика совместного сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах, позволяющая учитывать различную степень достоверности определения отдельных параметров исходной информации, технологические и метрологические ограничения по всем или выбранным узлам. Актуальным является реализация этой методики при решении задачи расчета фактических и номинальных показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС в условиях промышленной эксплуатации.

Методы и материалы: Математическая модель структуры потоков в технологических подсистемах ТЭС разработана на основе теории графов. Задача совместного сведения материальных и энергетических балансов по узлам тепловой схемы формулируется в рамках концепции многокритериальной многопараметрической регуляризации потоков энергии и теплоносителя. Для численного решения задачи методом статистического программирования использован метод замены нескольких критериев интегральным.

Результаты: Разработана методика совместного сведения материальных и энергетических балансов в тепловой схеме энергоблока действующей парогазовой ТЭС, позволяющая учитывать связи по потокам энергии между отдельными технологическими подсистемами. Полученная методика реализована в виде программного модуля и интегрирована в систему расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС по данным технического учета. Выявлено влияние метода сведения материальных и энергетических балансов на фактические и номинальные значения показателей тепловой экономичности отдельных агрегатов и ТЭС в целом.

Выводы: Предложенная методика совместного сведения материальных и энергетических балансов в тепловой схеме ТЭС по данным технического учета и средства ее компьютерной реализации позволили существенно увеличить степень достоверности расчета фактических показателей тепловой экономичности отдельных агрегатов, а также обеспечить существенно более полное совпадение фактических и номинальных значений технико-экономических показателей как по отдельным агрегатам, так и по ТЭС в целом.

Ключевые слова: некорректная задача, метод регуляризации, векторная регуляризация, материальный баланс, энергетический баланс, матричная формализация, графы, матрица инцидентности, многокритериальная оптимизация, статистическое программирование, тепловая экономичность ТЭС.

Development of a method of joint calculation of material and energy balances based on technical accounting data in the system of combined cycle power plant equipment thermal efficiency indicators calculation

A.P. Zimin, G.V. Ledukhovsky, V.P. Zhukov, S.D. Gorshenin, V.A. Budanov, A.E. Barochkin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: The method of joint calculation of material and energy balances in energy systems is well known. This method allows for accounting various reliability degrees of determining individual parameters of input information, technological and metrological limits for all or selected nodes. It is quite urgent now to implement this methodology to solve the problem of calculating the actual and nominal indicators of thermal efficiency of thermal power plant equipment under industrial operation.

Materials and methods: The mathematical model of flow structure in technological subsystems of heat power plants is developed based on the graph theory. The problem of joint calculation of material and energy balances for the thermal scheme nodes is formulated within the concept of multi-criteria multi-parameter regularization of energy and material flows. To numerically solve the problem by the method of statistical programming, we applied the method of replacement of several criteria by a single integral criterion.

Results: A method has been developed for the joint calculation of material and energy balances in the thermal scheme of a power unit of a combined-cycle thermal power plant. The method allows accounting for the connections along the energy flows between the individual technological subsystems. The method is implemented as a software module, integrated into the thermal efficiency calculation system of the thermal power plant equipment according to the technical accounting data. We have determined the influence of the method of reducing material and energy balances to the actual and nominal values of the heat efficiency of individual units and the thermal power plant as a whole.

Conclusions: The proposed method of joint calculation of material and energy balances in the thermal scheme of heat power plants based on technical accounting data and the software module for its computer implementation have greatly increased the reliability of calculating the actual thermal efficiency indicators of individual units and ensured a more complete coincidence of actual and nominal thermal efficiency indicators both for individual units and for the heat power plant as a whole.

Key words: incorrect problem, regularization method, vector regularization, material balance, energy balance, matrix formalization, graphs, incidence matrix, multi-criteria optimization, statistical programming, heat power plant thermal efficiency.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.2.005-012

Введение. Действующие нормативные документы энергетической отрасли¹ предписывают сведение материальных и энергетических балансов по данным технического учета (результатам измерения параметров потоков теплоносителей по участкам тепловой схемы) как предварительный этап расчета показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. Вместе с тем порядок сведения балансов, установленный указанными документами, имеет существенные недостатки: 1) материальный и энергетический балансы сводятся последовательно, при этом параметры потоков теплоносителей оказываются неувязанными с тепловой мощностью соответствующих потоков; 2) при сведении материального баланса исходная невязка баланса распределяется поровну между приходной и расходной частями соответствующих балансовых уравнений, что не учитывает разную степень достоверности (метрологические характеристики соответствующих приборов, точность тех или иных экспертных оценок) определения отдельных показателей; 3) сведение материального баланса предписывается лишь по одному из контуров тепловой схемы – от средств измерения расхода питательной воды до средств измерения расхода свежего пара турбоагрегатов, при этом за рамками рассмотрения остаются не менее значимые системы, например теплофикационная установка, паропроводы собственных нужд.

Перечисленные недостатки являются следствием необходимости введения упрощений при сведении балансов в целях обеспечения возможности проведения практических расчетов персоналом производственно-технических отделов ТЭС. Однако со времени ввода в действие указанных нормативных документов в практической работе персонала ТЭС произошли существенные изменения: на большинстве электростанций разрабатываются и совершенствуются системы автоматизированного технического учета и расчета технико-экономических показателей. Это открывает возможности повышения объек-

тивности результатов расчетов путем более обоснованного сведения материальных и энергетических балансов.

Ранее нами разработан метод совместного сведения материальных и энергетических балансов в энергетических системах в условиях некорректности исходной информации [1], предусматривающий разработку модели структуры потоков в системе на основе теории графов, формулировку оптимизационной задачи в рамках концепции регуляризации Тихонова и ее численное решение методом статистического программирования. Задачей настоящего этапа исследований является практическая реализация разработанного метода в составе программно-технического комплекса действующей парогазовой ТЭС.

Объектом исследования является ТЭС «Международная» (г. Москва), состоящая из двух энергоблоков парогазового цикла ПГУ-110 и ПГУ-116. В состав каждого энергоблока входят две газотурбинные установки, два двухконтурных котла-утилизатора без дожигания топлива, одна противодавленная паровая турбина двух давлений с утилизацией пара в сетевых подогревателях и один пиковый водогрейный котел. Энергоблоки имеют слабые поперечные связи по сетевой воде. Работа энергоблоков по электрическому графику нагрузок обеспечивается суховоздушными градирнями, в которых осуществляется отвод избыточной теплоты от потока сетевой воды. Основным и резервным топливом ТЭС является природный газ. Исходное состояние технического учета и отчетности ТЭС характеризуется наличием развитой системы автоматизированного сбора и хранения результатов измерений большинства требуемых для расчета технико-экономических показателей параметров. Однако по отдельным участкам тепловой схемы периодически, а по некоторым участкам систематически наблюдались сверхнормативные невязки материальных балансов (более 3 %, в ряде случаев – до 20 %).

Методы исследования. Методы исследования и основные результаты рассмотрим применительно к энергоблоку № 1 (ПГУ-110). На рис. 1, 2 показаны выделенные участки тепловой схемы (подсистемы), в данном случае включающие пароводяной тракт и технологическую схему сетевой воды (цифрами на рисунках обозначены номера узлов, необходимые для дальнейших расчетов). Разработка математической модели структуры потоков для каждой подсистемы, алгоритмов со-

¹ РД 34.08.552-95. Методические указания по составлению отчета электростанции и акционерного общества энергетики и электрификации о тепловой экономичности оборудования: разраб. АО «Фирма ОРГРЭС»; утв. Министерством топлива и энергетики; СО 153-34.09.110. Руководящие указания по сведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разраб. ОРГРЭС; утв. «Союзглавэнерго»; введ. в действие с 01.01.62 г.

вместного сведения материальных и энергетических балансов выполнена согласно [1]. Для описания каждой подсистемы используется направленный граф $G = (X, V)$ [2]. В качестве узлов (x_i) графа рассматриваются точки смешения и распределения потоков, а в качестве ветвей (v_j) – трубопроводы связи между ними. На рис. 3, 4 приведены структуры графов, соответствующих показанным на рис. 1, 2 участкам схемы.

Структура схемы для рассматриваемой подсистемы описывается матрицей инцидентности графа A размера $n \times m$ (n – число строк мат-

рицы, равное числу узлов графа; m – число столбцов матрицы, равное числу ветвей графа). Матрица формируется по следующим правилам: если начало j -й ветви графа соответствует i -му узлу, то элемент матрицы равен единице ($a_{ij} = 1$); если конец j -й ветви графа соответствует i -му узлу, то элемент матрицы равен минус единице ($a_{ij} = -1$). Произведение матрицы A и вектора расходов V определяет в элементах матрицы $\Delta G = AV$ небаланс массы в соответствующих узлах.

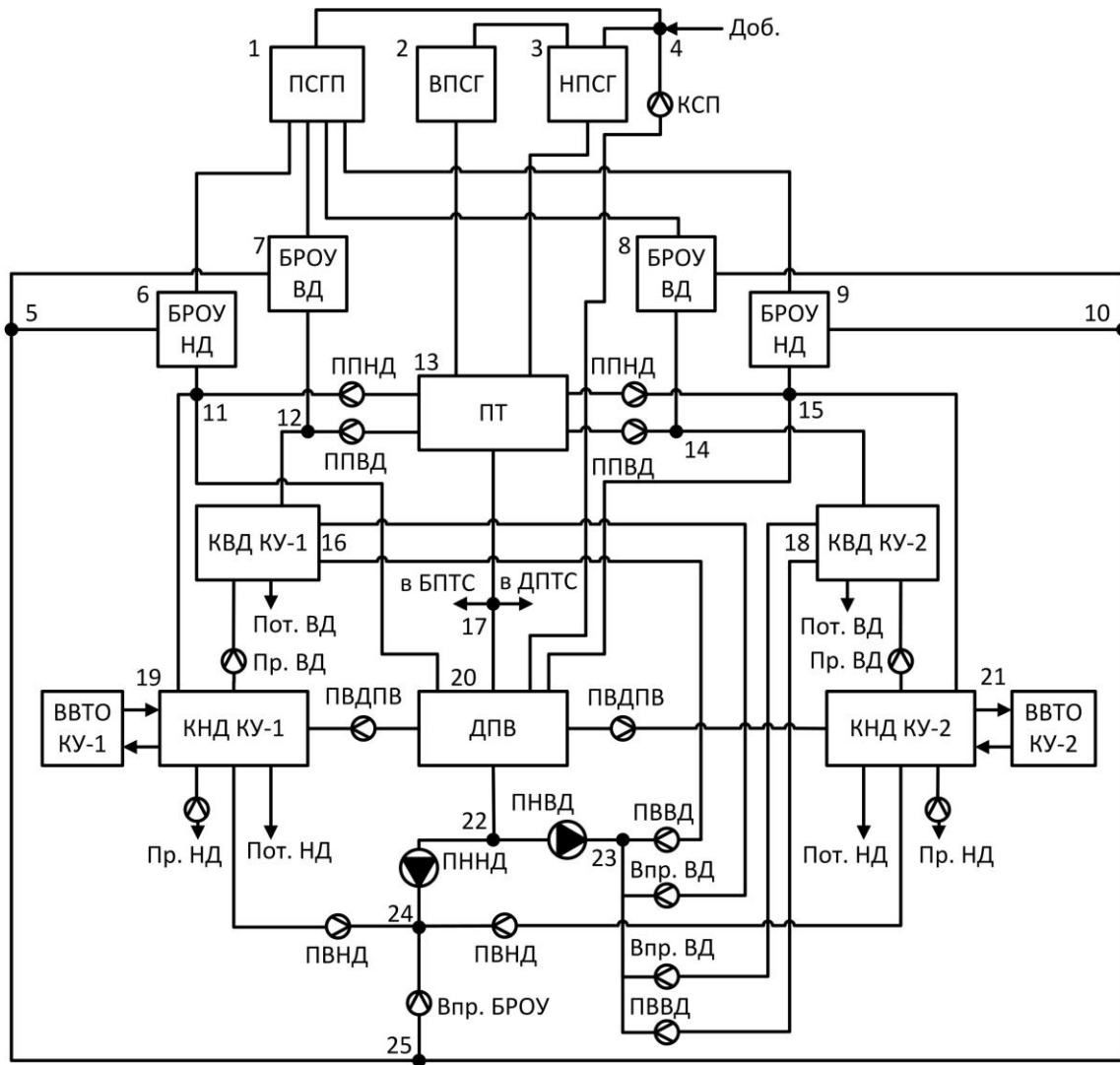


Рис. 1. Тепловая схема энергоблока № 1 (ПГУ-110), подсистема № 1 «пароводяной тракт»: Доб. – ввод добавочной воды; НПСГ, ВПСГ и ПСГП – сетевые подогреватели соответственно нижний, верхний и пиковый; КСП – конденсат сетевых подогревателей; BROU ВД и BROU НД – быстродействующие редуционно-охладительные установки контуров соответственно высокого и низкого давления; ПТ – паровая турбина; ППВД и ППНД – перегретый пар контуров соответственно высокого и низкого давления; КВД и КНД – тракты соответственно высокого и низкого давления котлов-утилизаторов; КУ-1 и КУ-2 – котлы-утилизаторы соответственно № 1 и 2; в БПТС – в бак подпитки теплосети (на паровую подушку); в ДПТС – греющий пар в деаэратор подпитки теплосети; Пот. ВД и Пот. НД – потери теплоносителя из пробоотборных точек котлов-утилизаторов по контурам соответственно высокого и низкого давления; Пр. ВД и Пр. НД – продувка контуров соответственно высокого и низкого давления КУ; ДПВ – деаэратор питательной воды; ПВДПВ – подвод греющей воды в ДПВ; ПНВД и ПННД – питательные насосы соответственно высокого и низкого давления; ПВДВ и ПВДН – питательная вода контуров соответственно высокого и низкого давления КУ; Впр. ВД и Впр. BROU – впрыск питательной воды соответственно в пароперегреватель высокого давления и BROU; ВВТО – водо-водяной теплообменник для нагрева сетевой воды; \odot – средство измерения расхода

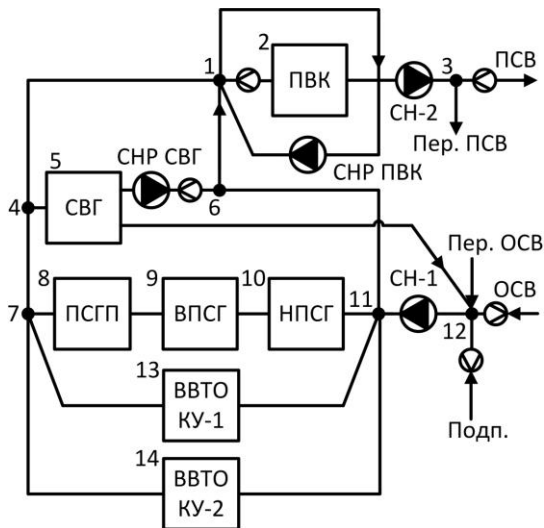


Рис. 2. Тепловая схема энергоблока № 1 (ПГУ-110), подсистема № 2 «сетевая вода»: ПВК – пиковый водогрейный котел; СН-1, 2 – сетевые насосы соответственно первого и второго подъема; СНР – сетевой насос рециркуляции; СВГ – суховоздушная градирня; ПСВ и ОСВ – прямая и обратная сетевая вода соответственно; Пер. – переток по сетевой воде между энергоблоками; Подп. – подпитка теплосети; прочие обозначения соответствуют рис. 1

столбец, учитывающая внешние для подсистемы потоки энергии.

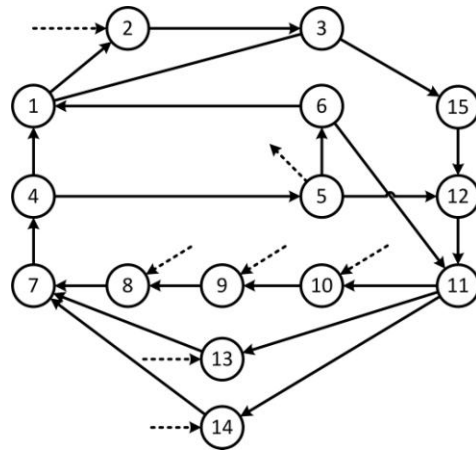


Рис. 4. Структура графа для подсистемы № 2 по рис. 2: 15 – узел, обозначающий внешнюю для подсистемы среду; прочие номера узлов соответствуют обозначениям на рис. 2; пунктирными линиями со стрелками обозначены подводы и отводы энергии по подсистеме, не связанные с подводами или отводами теплоносителя (подвод теплоты в ВПСГ, НПСГ, ПЦСП, ВВТО, ПВК; отвод теплоты в СВГ)

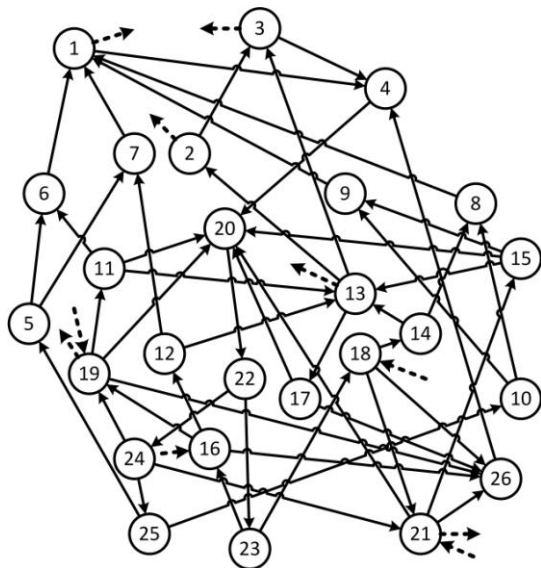


Рис. 3. Структура графа для подсистемы № 1 по рис. 1: 26 – узел, обозначающий внешнюю для подсистемы среду; прочие номера узлов соответствуют обозначениям на рис. 1; пунктирными линиями со стрелками обозначены подводы и отводы энергии по подсистеме, не связанные с подводами или отводами теплоносителя (отвод теплоты в ВПСГ, НПСГ, ПЦСП, ВВТО, электрической мощности в ПТ; подвод теплоты в КУ)

В рамках концепции регуляризации Тихонова [1, 3–5] исходная некорректная задача для каждой подсистемы формулируется следующим образом:

$$\mathbf{AV} + \sigma = \mathbf{0}; \mathbf{AH} + \sigma_1 = \mathbf{B}, \quad (1)$$

где σ и σ_1 – числовые параметры, обусловленные погрешностью правых частей уравнений; $\mathbf{H} = \mathbf{V} \cdot \mathbf{h}$ – вектор энергетических потоков (точка перед знаком умножения указывает на почленное умножение соответствующих элементов двух векторов); \mathbf{h} – вектор энтальпий; \mathbf{B} – матрица-

Оптимизационная задача, соответствующая (1), с учетом метрологических и технологических ограничений для каждой из рассматриваемых подсистем формулируется в следующем виде [1]:

$$F_{c1}(\mathbf{V}, \lambda_1) = |\mathbf{AV}|^2 + |\lambda_1(\mathbf{V} - \mathbf{V}_0)|^2 \Rightarrow \min; \quad (2)$$

$$v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]; \quad (3)$$

$$\Delta G_i \in [0; \Delta G_i^{\max}]; \quad (4)$$

$$F_{c2}(\mathbf{H}, \lambda_2) = |\mathbf{AH} - \mathbf{B}|^2 + |\lambda_2(\mathbf{H} - \mathbf{H}_0)|^2 \Rightarrow \min; \quad (5)$$

$$h_i \in [h_i^{\min}; h_i^{\max}]; \quad (6)$$

$$\Delta E_i \in [0; \Delta E_i^{\max}], \quad (7)$$

где λ_1 и λ_2 – диагональные матрицы малых положительных параметров регуляризации по потокам массы и энергии соответственно; \mathbf{V} , \mathbf{V}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная (по данным технического учета) оценка по массовым потокам; v_i^{\min} и v_i^{\max} – границы доверительного интервала для действительного значения расхода теплоносителя, обусловленные точностью экспертной оценки или номинальной погрешностью исправного средства измерения; ΔG_i^{\max} – максимально допустимый небаланс массы в узлах, обусловленный погрешностями средств измерений, при условии работы последних с номинальными метрологическими характеристиками; \mathbf{H} , \mathbf{H}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка по потокам энергии; h_i^{\min} и h_i^{\max} – границы доверительного интервала для действительных значений энтальпии теплоносителей, обусловленные номинальными погрешностями средств измерения давления и температуры среды; ΔE_i^{\max} – максимально допустимые небалансы энергии в узлах,

обусловленные номинальными погрешностями средств измерений.

Таким образом, при наличии двух связанных подсистем имеем четыре функции цели, соответствующие (2) и (5): $F_{c1,1}$ и $F_{c2,1}$ для подсистемы № 1; $F_{c1,2}$ и $F_{c2,2}$ для подсистемы № 2. При решении оптимизационной задачи требуется минимизировать каждую из функций цели. В данном случае эту задачу многокритериальной оптимизации сведем к решению задачи однокритериальной оптимизации путем замены четырех критериев одним интегральным критерием:

$$F_c^a = a_{1,1}F_{c1,1} + a_{2,1}F_{c2,1} + a_{1,2}(a_{1,2}F_{c1,2} + a_{2,2}F_{c2,2}) \Rightarrow \min, \quad (8)$$

где весовые коэффициенты $a_{1,1}$, $a_{2,1}$, $a_{1,2}$, $a_{2,2}$ определяются следующим образом: $a_{2,1} = 1$ и $a_{2,2} = 1$; $a_{1,1}$ и $a_{1,2}$ принимаются численно равными средней энтальпии потоков в подсистемах № 1 (h_{cp1}) и 2 (h_{cp2}) соответственно; $a_2 = h_{cp1} / h_{cp2}$.

Задача однокритериальной оптимизации (8) решается методом статистического программирования [6, 7]. При этом выполняется многократная генерация случайным образом значений расходов v_i и энтальпий h_i потоков вокруг априорных значений в диапазоне, обусловленном метрологическими ограничениями ($v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]$ и $h_i \in [h_i^{\min}; h_i^{\max}]$). Это автоматически приводит к выполнению метрологических ограничений (3) и (6). Затем сгенерированное решение проверяется по технологическим ограничениям (4) и (7). При выполнении всех ограничений полученные варианты решения сравниваются по значению целевой функции, и из этих вариантов по минимальному значению целевой функции (8) выбирается оптимальный.

Рассмотренный порядок решения задачи реализован в виде программного модуля, который интегрирован в программно-технический комплекс ТЭС «Международная» по расчету фактических и номинальных показателей тепловой экономичности оборудования и используется при проведении расчетов как за сутки, так и за месяц. В дополнение к рассмотренным алгоритмам разработана методика сведения материальных и энергетических балансов по каждой из газотурбинных установок, обеспечивающая определение балансовых значений расхода воздуха на компрессор, расхода топлива в камеру сгорания, расхода дымовых газов за турбиной, теплофизических параметров указанных теплоносителей, электрической мощности установки, а также потерь тепловой энергии по установке.

Результаты исследования. Разработанный программный модуль совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета прошел тестирование по обоим энергоблокам ТЭС в течение года. Рассмотрим основные достигнутые при этом результаты.

В таблице приведен пример результатов расчета за один из месяцев фактически отработанного периода по энергоблоку № 1 (газотурбинные установки ГТ-1, 2; котлы-утилизаторы КУ-1, 2; паровая турбина ПТ-3). Верхние значения в строках таблицы соответствуют ГТ-1 или КУ-1, нижние – ГТ-2 или КУ-2; единственные значения в строках относятся к ПТ-3 или в целом к ПГУ-1.

На рис. 5 приведены в сопоставлении результаты расчета фактических и номинальных значений основных технико-экономических показателей газотурбинных установок, котлов-утилизаторов и паровых турбин по ТЭС в целом по месяцам анализируемого года.

Основные показатели работы оборудования ПГУ-ТЭС при расчете без сведения балансов («Б–») и со сведением балансов («Б+») за один из месяцев

| Наименование показателя, единица измерения | Фактическое значение (Ф) | | Отклонение (Ф) _{Б+} от (Ф) _{Б–} , % | Номинальное значение (Н) | | Отклонение (Н) от (Ф), %* | | |
|---|------------------------------------|-------|---|--------------------------|----------------|---------------------------|-------|------|
| | Б– | Б+ | | Б– | Б+ | Б– | Б+ | |
| Средний расход воздуха на компрессор ГТУ, кг/с | 119,0 | 112,4 | –5,5 | 112,4 | 112,4 | –5,5 | 0,0 | |
| | 118,5 | 124,3 | 4,9 | 124,3 | 124,3 | 4,9 | 0,0 | |
| Средний расход дымовых газов ГТУ, кг/с | 121,2 | 114,6 | –5,4 | 114,6 | 114,6 | –5,4 | 0,0 | |
| | 120,9 | 126,7 | 4,8 | 126,7 | 126,7 | 4,8 | 0,0 | |
| Относительное теплосодержание дымовых газов ГТУ, кДж/кг | 605,7 | 610,3 | 0,8 | не нормируется | не нормируется | – | – | |
| | 606,8 | 608,2 | 0,2 | | | – | – | |
| КПД брутто ГТУ, %: | | | | | | | | |
| | – при расчете по прямому балансу | 35,02 | 35,02 | 0,0 | 35,35 | 35,35 | 0,3* | 0,3* |
| | | 33,37 | 33,37 | 0,0 | 33,48 | 33,48 | 0,1* | 0,1* |
| | – при расчете по обратному балансу | 31,94 | 35,02 | 9,6 | 35,35 | 35,35 | 3,4* | 0,3* |
| | | 36,43 | 33,37 | –8,4 | 33,48 | 33,48 | –2,9* | 0,1* |
| – отклонение | –3,1* | 0,0* | – | 0,0* | 0,0* | – | – | |
| | 3,1* | 0,0* | – | 0,0* | 0,0* | – | – | |
| Средний расход пара КУ, т/ч: | | | | | | | | |
| | – контура низкого давления | 11,55 | 11,99 | 3,8 | 11,86 | 11,86 | 2,7 | –1,1 |
| | | 11,54 | 13,77 | 19,3 | 13,61 | 13,61 | 17,9 | –1,1 |
| | – контура высокого давления | 50,22 | 49,65 | –1,1 | 49,35 | 49,35 | –1,7 | –0,6 |
| | 48,50 | 55,93 | 15,3 | 55,32 | 55,32 | 14,1 | –1,1 | |
| Невязка материального баланса контуров КУ, %: | | | | | | | | |
| | – контура низкого давления | 1,57 | 0,24 | –1,3* | – | – | – | – |
| | | 1,63 | 0,62 | –1,0* | – | – | – | – |
| | – контура высокого давления | 2,98 | 0,27 | –2,7* | – | – | – | – |
| | 4,76 | 0,42 | –4,3* | – | – | – | – | |

| Наименование показателя, единица измерения | Фактическое значение (Ф) | | Отклонение (Ф) _{Б+} от (Ф) _{Б-} , % | Номинальное значение (Н) | | Отклонение (Н) от (Ф), %* | |
|--|--------------------------|-------|---|--------------------------|-------|---------------------------|------|
| | Б– | Б+ | | Б– | Б+ | Б– | Б+ |
| Средняя теплопроизводительность брутто КУ, МВт: | | | | | | | |
| – при расчете по водопаровому тракту | 54,72 | 54,63 | –0,2 | 54,88 | 54,88 | 0,3 | 0,5 |
| | 52,90 | 61,17 | 15,6 | 61,16 | 61,16 | 15,6 | 0,0 |
| – при расчете по газовому тракту | 57,30 | 54,59 | –4,7 | 54,88 | 54,88 | –4,2 | 0,5 |
| | 58,26 | 61,22 | 5,1 | 61,16 | 61,16 | 5,0 | –0,1 |
| – отклонение, % | 4,7 | –0,1 | – | 0,0 | 0,0 | – | – |
| | 10,1 | 0,1 | – | 0,0 | 0,0 | – | – |
| КПД брутто КУ, %: | | | | | | | |
| – при расчете по прямому балансу | 78,73 | 78,59 | –0,2 | 78,64 | 78,64 | –0,1* | 0,0* |
| | 69,03 | 79,83 | 15,6 | 80,11 | 80,11 | 11,1* | 0,3* |
| – при расчете по обратному балансу | 77,48 | 78,54 | 1,4 | 78,64 | 78,64 | 1,2* | 0,1* |
| | 80,82 | 79,90 | –1,1 | 80,11 | 80,11 | –0,7* | 0,2* |
| – отклонение | –1,3* | –0,1* | – | 0,0* | 0,0* | – | – |
| | 11,8* | 0,1* | – | 0,0* | 0,0* | – | – |
| Средний расход пара на ПТ, т/ч: | | | | | | | |
| – контура высокого давления | 98,9 | 105,8 | 6,9 | 104,1 | 105,1 | 5,3 | –0,6 |
| – контура низкого давления | 22,3 | 25,8 | 15,5 | 25,5 | 25,5 | 14,4 | –1,2 |
| Удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии ПТ, кДж/(кВт·ч) | 8516 | 9860 | 15,8 | 9881 | 9881 | 16,1 | 0,3 |
| Удельный расход условного топлива на отпуск электроэнергии ПГУ, г у.т./(кВт·ч) | 208,0 | 207,8 | –0,1 | 204,6 | 204,6 | –1,6 | –1,5 |
| Удельный расход условного топлива на отпуск тепловой энергии ПГУ, кг у.т./ГДж | 34,78 | 34,82 | 0,2 | 34,87 | 34,82 | 0,3 | 0,0 |
| Резерв тепловой экономичности (перерасход топлива), т у.т. | 72 | 83 | 14,6 | – | – | – | – |

Примечание: знаком «» отмечены абсолютные отклонения в процентах

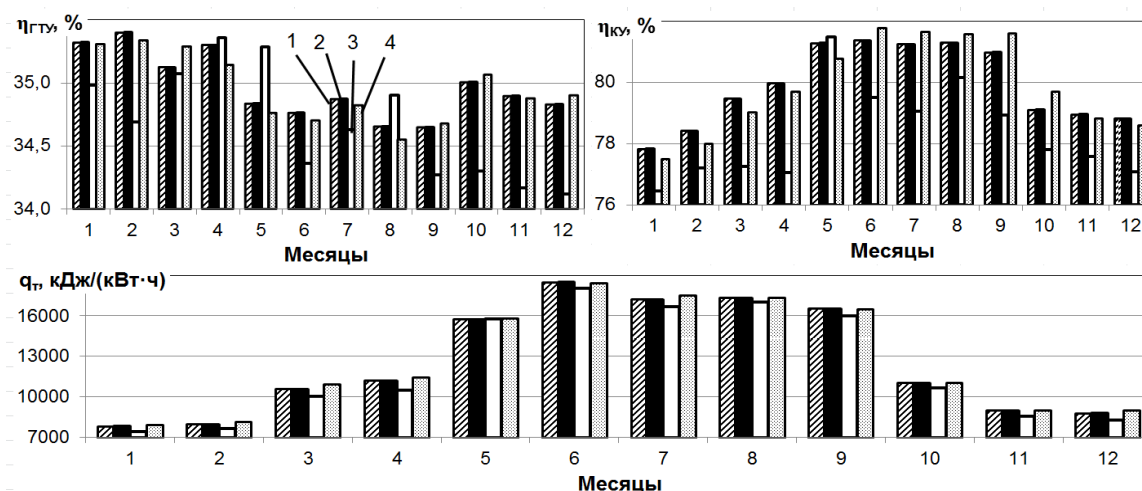


Рис. 5. Основные показатели работы оборудования ПГУ-ТЭС при расчете без сведения балансов и со сведением балансов по месяцам года: $\eta_{ГТУ}$ и $\eta_{КУ}$, % – КПД брутто по группе газотурбинных установок и по группе котлов-утилизаторов соответственно; q_t , кДж/(кВт·ч) – удельный расход теплоты брутто на выработку электроэнергии по группе паровых турбин; 1 – фактическое значение, рассчитанное по прямому балансу; 2 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу после совместно сведения материальных и тепловых балансов; 3 – фактическое значение, рассчитанное по обратному балансу без сведения материальных и тепловых балансов; 4 – номинальное значение

Выводы. Анализ данных таблицы показывает, что сведение балансов по данным технического учета слабо влияет на фактические и номинальные значения удельных расходов условного топлива. Причина этого состоит в том, что при расчете фактических значений используются только данные коммерческого учета количества сожженного топлива, отпуска электрической и тепловой энергии, а на результат расчета номинального количества сожженного топлива влияют лишь показатели ГТУ. Однако промежуточные показатели тепловой экономичности агрегатов

без проведения работы по сведению балансов оказываются существенно искаженными и неувязанными между собой. Это подтверждает и соотношение между фактическими значениями показателей, определенных по прямому и обратному балансам без сведения материальных и тепловых балансов (рис. 5). При реализации предложенного метода сведения балансов не только устраняется этот недостаток, но и обеспечивается существенно более полное соответствие номинальных значений показателей и фактических значений, рассчитанных по обратному балансу

(рис. 5), что позволяет оценить качество нормативно-технической документации ТЭС по топливоиспользованию.

Экономическая эффективность внедрения программного модуля по сведению материальных и энергетических балансов по данным технического учета обусловлена повышением точности прогнозирования технико-экономических показателей ТЭС при формировании заявок на оптовом рынке электроэнергии и мощности [8], возможностью оперативного обнаружения неисправностей в работе элементов системы мониторинга показателей работы оборудования, а также выявленными резервами тепловой экономичности. Экономия топлива, обусловленная внедрением программного модуля, оценена специалистами ТЭС «Международная» на уровне 1308 тонн в год в условном исчислении. Этот эффект соответствует сумме устранимых составляющих резерва тепловой экономичности, обнаруженных в ходе расчетов показателей работы оборудования по месяцам рассматриваемого года. Достигнутый результат позволяет рекомендовать внедрение разработанного метода совместного сведения материальных и энергетических балансов по данным технического учета в практику проведения расчетов показателей тепловой экономичности, в частности, на электростанциях парогазового цикла.

Список литературы

1. Алгоритмы сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректных задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 72–80.

Зимин Артем Павлович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Zimin Artyom Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Postgraduate Student of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Ледуховский Григорий Васильевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovskiy Grigory Vasilyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor of Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, No. 34, Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

2. **Алексеев В.В.** Элементы теории множеств и теории графов. – Саров: СарФТИ, 2001. – 30 с.
3. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.
4. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems // *Technometrics*. – 1970. – № 12. – P. 55–67.
5. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications // *Amer. J. Math. Management Sci.* – 1981. – № 1. – P. 5–83.
6. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.
7. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.
8. **Чучуева И.А., Инкина Н.Е.** Оптимизация работы ТЭЦ в условиях оптового рынка электроэнергии и мощности // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. – 2015. – № 8. – С. 195–238.

References

1. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, issue 8, pp. 72–80.
2. Alekseyev, V.V. *Elementy teorii mnozhestv i teorii grafov* [Elements of the set theory and graph theory]. Sarov, SarFTI, 2001. 30 p.
3. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow, Nauka, 1979. 285 p.
4. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. *Technometrics*, 1970, no. 12, pp. 55–67.
5. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications. *Amer. J. Math. Management Sci.*, 1981, no. 1, pp. 5–83.
6. Venttsel, E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research: challenges, principles, methodology]. Moscow, Drofa, 2004. 207 p.
7. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow, Vil'yams, 2005. 901 p.
8. Chuchuyeva, I.A., Inkina, N.E. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*, 2015, no. 8, pp. 195–238.

Жуков Владимир Павлович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой прикладной математики,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. А, ауд. 202,
телефон (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru
Zhukov Vladimir Pavlovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering, Professor, Head of Applied Mathematics Department,
address: Ivanovo, No. 34 Rabfakovskaya St., Building A, Room 202,
tel. (4932) 26-97-45,
e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Горшенин Сергей Дмитриевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Gorshenin Sergei Dmitrievich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Senior Lecturer of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Буданов Виталий Александрович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры паровых и газовых турбин,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 338,
телефон (4932) 26-99-12,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru
Budanov Vitaly Aleksandrovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Department of Steam and Gas Turbines,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 338,
tel. (4932) 26-99-12,
e-mail: rvs@tren.ispu.ru

Барочкин Алексей Евгеньевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru
Barochkin Aleksei Yevgenyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, Rabfakovskaya St., 34, Building «V» (B), Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru