

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Анастасия Сергеевна Зиновьева

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, ректор, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Владимир Павлович Жуков

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Антон Александрович Борисов

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, начальник отдела координации инновационной деятельности, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-77, e-mail: borisov@ispu.ru

Сергей Дмитриевич Горшенин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin_tes@ispu.ru

Сведение материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей

Авторское резюме

Состояние вопроса. Известна скалярная и векторная постановки задачи регуляризации материальных потоков при расчете фактических показателей тепловой экономичности применительно к газотурбинным установкам, основанные на концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач. Получены аналитические и численные решения задачи, позволяющие учесть ограничения на область допустимых значений расходов теплоносителей, обусловленные метрологическими характеристиками используемых средств измерения. Однако во всех указанных случаях энтальпии теплоносителей, зависящие от их теплофизических параметров, в частности давления и температуры, считаются заданными. Учет неопределенности результатов измерения теплофизических параметров позволит дополнительно повысить степень обоснованности результатов сведения материальных и энергетических балансов газотурбинных установок.

Материалы и методы. Задача сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки с учетом неопределенности результатов измерения теплофизических параметров теплоносителей формулируется в рамках концепции регуляризации Тихонова. Для численного решения задачи используется метод статистического программирования. Апробация результатов работы выполнена с использованием эксплуатационных данных по газотурбинной установке GTX-100.

Результаты. Получены решения сформулированной задачи сведения материального и энергетического балансов газотурбинной установки с учетом обусловленных метрологическими характеристиками средств измерения ограничений на область допустимых значений расходов и теплотехнических параметров теплоносителей и электрической мощности. Выполнено сопоставление различных вариантов постановки и решения задачи. Установлено их влияние на результаты расчета показателей тепловой экономичности газотурбинных установок.

Выводы. Предложенная методика сведения балансов позволяет дополнительно повысить степень достоверности результатов расчета фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок по сравнению со скалярной и векторной постановками задачи при неизменных значениях теплофизических параметров теплоносителей. Методика применима как при разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, в том числе при обработке результатов тепловых балансовых испытаний, так и при оперативном контроле эксплуатируемых установок.

Ключевые слова: газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, материальный баланс, энергетический баланс, некорректная задача, метод регуляризации, оптимизация

Anastasia Sergeevna Zinovieva

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: lucky-istorik@yandex.ru

Grigory Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Rector, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-99, e-mail: lgv@ispu.ru

Vladimir Pavlovich Zhukov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, (Post-doctoral degree), Professor of Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-45, e-mail: zhukov-home@yandex.ru

Anton Alexandrovich Borisov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Coordination of Innovation Activities Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-77, e-mail: borisov@ispu.ru

Sergei Dmitrievich Gorshenin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Head of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin_tes@ispu.ru

Simultaneous equations method of material and energy balances when calculating actual indicators of thermal efficiency of gas turbine units taking into account the uncertainty of the results of measuring thermophysical parameters of heat carriers

Abstract

Background. To calculate actual indicators of thermal efficiency in respect to gas turbine units, scalar and vector formulations of the problem of regularization of material flows are used. They are based on the concept of Tikhonov's regularization when solving ill-posed problems. Analytical and numerical solutions of the problem have been obtained. It allows us to take into account the limitations on the range of permissible values of coolant flow rates, due to the metrological characteristics of the measuring instruments used. However, in the cases mentioned, the coolants enthalpy, depending on their thermophysical parameters, in particular pressure and temperature, are considered to be given. Taking into account the uncertainty of the results of measuring thermophysical parameters will make it possible to further increase the degree of validity of the results of simultaneous equations of the material and energy balances of gas turbine units.

Materials and methods. The problem of simultaneous equations of material and energy balances of a gas turbine unit taking into account the uncertainty of the results of measuring the thermal and physical parameters of coolants is set within the framework of Tikhonov's regularization concept. The statistical programming method is used for the numerical solution of the problem. The results have been tested using operational data on the GTX-100 gas turbine unit.

Results. The solutions to the problem of simultaneous equations of material and energy balances of a gas turbine unit have been obtained, taking into account the limitations on the range of permissible values of flow rates and heat engineering parameters of coolants and electric power, determined by the metrological characteristics of the measuring instruments. The authors have studied various options for setting and solving the problem and their influence on the results of calculating the thermal efficiency indicators of gas turbine units.

Conclusions. The proposed simultaneous equations method allows us to further increase the degree of reliability of the results of calculating the actual indicators of thermal efficiency of gas turbine units in comparison with the scalar and vector formulation of the problem at constant values of the thermal physical parameters of coolants. The method is applicable both to develop output performance standards of equipment, including processing the results of thermal balance tests, and to monitor operating units.

Key words: gas turbine unit, thermal efficiency of equipment, material balance, energy balance, ill-posed problem, regularization method, optimization

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.3.005-012

Введение. В соответствии с требованиями нормативных документов энергетической отрасли¹, расчету фактических и номинальных значений показателей тепловой экономичности оборудования тепловых электрических станций (ТЭС) за отчетный период должно предшествовать сведение материальных и энергетических балансов по энергоустановкам и электростанции в целом. В ходе этой процедуры результаты измерения параметров потоков теплоносителей корректируются в пределах нормируемой погрешности используемых средств измерения для обеспечения их взаимной увязки и соответствия балансам массы и энергии. При этом от используемой методики сведения балансов существенно зависит степень достоверности определяемых впоследствии показателей тепловой экономичности и составляющих резерва тепловой экономичности [1–3]. В отличие от паротурбинных ТЭС, для которых утверждена нормативная методика сведения балансов², по газотурбинным (ГТУ) и парогазовым (ПГУ) установкам ТЭС таких требований в нормативных документах не зафиксировано. Поэтому на практике сведение балансов по таким объектам либо не выполняется, либо осуществляется с использованием экспертных оценок, различающихся для разных ТЭС. Такое положение приводит к ошибкам в оценке технического состояния и уровня эксплуатации оборудования.

В предложенной ранее [4, 5] методике совместного сведения материального и энергетического балансов применительно к газотурбинным установкам (ГТУ), основанной на концепции регуляризации Тихонова при решении некорректных задач [6–8], энтропия каждого из потоков теплоносителей, зависящая от их теплофизических параметров, в частности давления и температуры, считалась заданной. Учет неопределенности результатов измерения теплофизических параметров позволит дополнительно повысить степень обоснованности ре-

зультатов сведения материальных и энергетических балансов ГТУ.

Методы исследования. В рассматриваемой расчетной схеме ГТУ (рис. 1) воздух после компрессора 1 подается в камеру сгорания 2 вместе с топливом (природным газом), затем продукты сгорания направляются в газовую турбину 3. ГТУ имеет одновальное исполнение: турбогенератор 4 располагается на одном валу с турбиной 3 и компрессором 1.

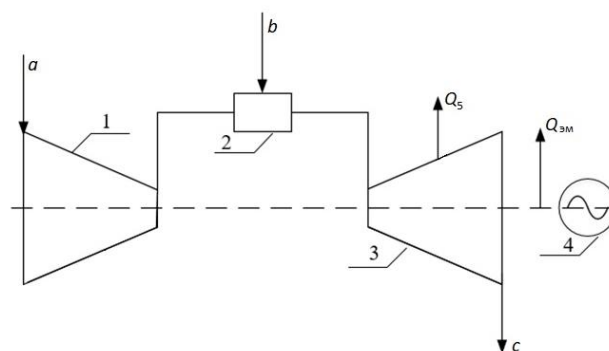


Рис. 1. Принципиальная схема ГТУ: 1 – компрессор; 2 – камера сгорания; 3 – газовая турбина; 4 – турбогенератор; а – подвод воздуха; b – подвод топлива; с – отвод продуктов сгорания; прочие обозначения приведены в тексте

Исследование проводится в несколько этапов.

На первом этапе выполняется анализ чувствительности результатов ранее полученного решения задачи регуляризации в векторной постановке к вариациям значений теплотехнических параметров, которые ранее считались заданными.

На втором этапе формулируется задача регуляризации теплотехнических параметров, которые ранее считались заданными при выполнении расчетов.

На третьем этапе разрабатывается метод численного решения задачи регуляризации с учетом неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров, выполняется анализ полученных результатов.

Результаты исследования. Выполним оценку чувствительности результатов решения задачи регуляризации в векторной постановке к вариациям значений теплотехнических параметров теплоносителей. Для этого в рамках полученного ранее решения задачи [5] на при-

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».

² СО 153-34.09.110. Руководящие указания по ведению месячного пароводяного баланса на тепловых электростанциях: разраб. ОРГРЭС.

мере фактического режима работы ГТУ типа GTX-100 проведем дополнительные расчетные исследования. Основные соотношения постановки и решения задачи регуляризации в векторной постановке, согласно [5], которые использовались при проведении расчетного анализа, записываются в виде

$$F(\mathbf{Y}, \lambda) = |\mathbf{A}\mathbf{Y} - \mathbf{B}|^2 + |\lambda(\mathbf{Y} - \mathbf{Y}_0)|^2 \Rightarrow \min, \quad (1)$$

где $F(\mathbf{Y}, \lambda)$ – целевая функция регуляризации; λ – диагональная матрица параметров регуляризации; $\mathbf{B} = 0$; $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Y}_0$ – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка соответственно; $\mathbf{A}$ – известный матричный оператор модели

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 \\ h_{\text{топл}}^{\text{и}} + Q_{\text{н}}^{\text{р}} & h_{1\text{к}}^{\text{и}} & -h_{2\text{т}}^{\text{и}} & -\frac{1}{\eta_{5\text{т}}} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$, $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$, $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ – энтальпии топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной (определяются по измеренным значениям параметров теплоносителей), МДж/кг; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ (принимается по данным коммерческого учета), МДж/кг; индекс «и» указывает на соответствие параметра результату изменения; $\eta_{5\text{т}}$ характеризует тепловые потери от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханические потери ГТУ и определяется из соотношения

$$Q_5 + Q_{\text{эм}} + N_{\text{ГТУ}} = \frac{N_{\text{ГТУ}}}{\eta_{5\text{т}}},$$

где Q_5 и $Q_{\text{эм}}$ – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь ГТУ (определяются по результатам экспертной оценки [2]), МВт; $N_{\text{ГТУ}}$ – электрическая мощность ГТУ, МВт;

$$\mathbf{Y} = (B_{\text{КС}} \ G_{1\text{к}} \ G_{2\text{т}} \ N_{\text{ГТУ}})^T, \quad (3)$$

где $B_{\text{КС}}$, $G_{1\text{к}}$ и $G_{2\text{т}}$ – расходы топлива в камеру сгорания, воздуха на входе в компрессор и продуктов сгорания на выходе из турбины, кг/с; индекс «Т» указывает на транспонирование матрицы.

Аналитическое решение задачи (1), полученное ранее [5], записывается в виде

$$\mathbf{Y} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \lambda^2 \mathbf{E})^{-1} \lambda^2 \mathbf{Y}_0, \quad (4)$$

где $\mathbf{E}$ – единичная матрица; индекс «-1» указывает на обращение матрицы.

Аналитическое решение (4) на первом этапе исследования используется для оценки чувствительности решения к возмущению по значениям теплотехнических параметров матрицы $\mathbf{A}$, которые ранее [5] считались постоянными.

На рис. 2 приведены результаты оценки чувствительности решения (4) к возмущению значений $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ (сплошная линия), $\eta_{5\text{т}}$ (штриховая линия), а также $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$ и $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$ (пунктирная линия).

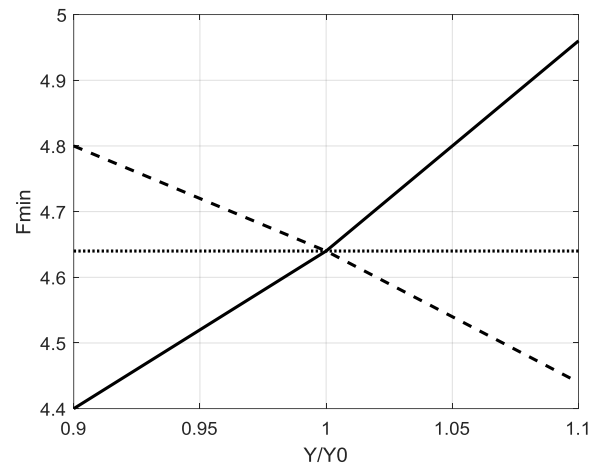


Рис. 2. Чувствительность решения (4) к варьированию значений параметров матрицы $\mathbf{A}$: $F_{\min}$ – целевая функция (1), соответствующая решению (4); Y/Y_0 – относительное отклонение исследуемого параметра матрицы $\mathbf{A}$; прочие обозначения приведены в тексте

Анализ приведенных на рис. 2 результатов исследования показывает, что теплотехнические параметры $h_{2\text{т}}^{\text{и}}$ и $\eta_{5\text{т}}$ значимо влияют, а параметры $h_{\text{топл}}^{\text{и}}$ и $h_{1\text{к}}^{\text{и}}$ практически не оказывают влияния на решение задачи и значение целевой функции регуляризации. Таким образом, выявлены параметры, неопределенность при измерении (в том числе, косвенном, как в случае с $\eta_{5\text{т}}$) которых целесообразно учитывать с точки зрения точности результатов получаемого решения задачи совместного сведения материального и энергетического балансов ГТУ.

На втором этапе исследований предлагается модель и методика последовательной регуляризации: сначала решается задача (1)–(4) аналогично ранее представленной векторной регуляризации [5], затем формулируется новая задача регуляризации для теплотехнических параметров, для которых регуляризация на первом этапе не проводилась.

Для этого после регуляризации согласно (1)–(4) формируется новая целевая функция и формулируется новая задача регуляризации, где найденные на первом этапе параметры считаются известными, а известные на первом этапе теплотехнические параметры уточняются на втором этапе решения задачи. Формулировка задачи регуляризации теплотехнических параметров записывается в следующем виде:

$$F_1(\mathbf{Y}_1, \lambda_1) = |\mathbf{A}_1 \mathbf{Y}_1|^2 + |\lambda_1(\mathbf{Y}_1 - \mathbf{Y}_{1,0})|^2 \Rightarrow \min; \quad (5)$$

$$\mathbf{A}_1 = (B_{\text{КС}} \ G_{1\text{к}} \ G_{2\text{т}} \ N_{\text{ГТУ}}); \quad (6)$$

$$Y_1 = \left(h_{\text{топл}}^n + Q_n^p \quad h_{1к}^n \quad -h_{2т}^n \quad -\frac{1}{\eta_{5т}} \right)^T, \quad (7)$$

где $F_1(Y_1, \lambda_1)$, Y_1 , λ_1 и A_1 – целевая функция, вектор искомых параметров, матрица параметров регуляризации и матрица известных параметров, полученные на втором этапе решения задачи регуляризации.

Решение задачи (5)–(7) получено аналогично (4), но с уточненным видом и структурой матриц:

$$Y_1 = (A_1^T A_1 + \lambda_1^2 E)^{-1} \lambda_1^2 Y_{1,0}. \quad (8)$$

Результаты расчета, проведенного в соответствии с (8) для второго этапа при одинаковых значениях ненулевых элементов матрицы λ_1 , приведены на рис. 3 в виде зависимостей квадрата небаланса энергии (а), энтальпии топлива (б), энтальпии воздуха перед компрессором (в), обобщенной характеристики тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь $1/\eta_{5т}$ (г, 1) и энтальпии газов за турбиной (г, 2) от коэффициента регуляризации λ .

Анализ данных, представленных на рис. 3, показывает, что второй, дополнительный этап регуляризации по значениям теплотехнических параметров в соответствии с (5)–(8) не привел к значимому изменению результата сведения балансов по сравнению с решением задачи регуляризации согласно (1)–(4).

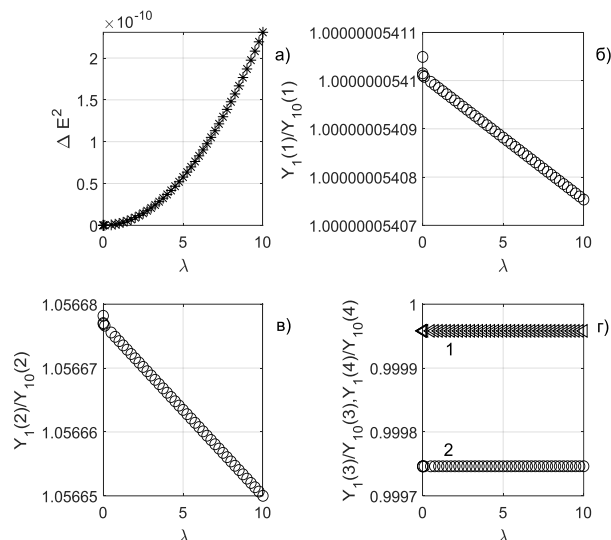


Рис. 3. Результаты второго этапа регуляризации в виде зависимостей от параметра регуляризации λ : а – квадрата небаланса энергии; б – энтальпии топлива; в – энтальпии воздуха перед компрессором; г – обобщенной характеристики тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ и электромеханических потерь (1) и энтальпии газа за турбиной (2)

На третьем этапе исследований предложено учитывать теплотехнические параметры при численном решении задачи регуляризации. Объединение двух первых этапов за счет учета метрологических ограничений выполняется при оценке диапазона варьирования измеренных значений параметров (табл. 1).

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчетов для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения задачи регуляризации*

Обозначение, единица измерения	Априорные значения Y_{0i}	Метрологические ограничения $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$	Регуляризированные значения Y_i				
			вариант С [1] ($\lambda = 0,95$)	векторная постановка			
				вариант В-1 ($\lambda_i = \lambda^* = 1,04$)	вариант В-2 / значение λ_i	вариант В-3	вариант В-4
$B_{КС}$, кг/с	1,790	[1,772; 1,808]	1,810	1,805	1,807 / 0,245	1,807	1,788
$G_{1к}$, кг/с	101,46	[100,44; 102,47]	100,19	100,25	100,45 / 0,645	100,46	100,45
$G_{2т}$, кг/с	99,54	[97,05; 102,03]	100,79	100,74	100,94 / 0,564	100,91	100,92
$N_{ГТУ}$, МВт	29,23	[28,94; 29,52]	29,20	29,20	29,21 / 0,775	29,18	29,19
$h_{\text{топл}}$, МДж/кг	0,11509	[0,11279; 0,11739]	0,11509	0,11509	0,11509	0,11509	0,11584
Q_p^H , МДж/кг	50,535	50,535**	50,535	50,535	50,535	50,535	50,535
$h_{1к}$, МДж/кг	0,002692	[0,002625; 0,002759]	0,002692	0,002692	0,002692	0,002692	0,002740
$h_{2т}$, МДж/кг	0,60243	[0,59038; 0,61448]	0,60243	0,60243	0,60243	0,60243	0,59309
$\eta_{5т}$, ед.	0,9414	0,9414***	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414	0,9414
ΔG , кг/с****	3,7100	–	1,2047	1,3125	1,2470	1,3555	1,3101
ΔE , МВт****	–0,0786	–	–0,0241	–0,0262	–0,0250	0,0029	0,0301
$F(\lambda)$	13,7703	–	4,6201	4,6940	4,6220	4,7176	4,3191

Примечания: * серым фоном отмечены ячейки, значения в которых находятся вне установленных метрологических ограничений $[Y_i^{\min}; Y_i^{\max}]$; ** данные коммерческого учета, не подлежащие корректировке при регуляризации; *** результаты экспертной оценки, не подлежащие корректировке при регуляризации; **** ΔG – невязка материального баланса, кг/с; ΔE – невязка энергетического баланса, МВт.

Учет ограничений на значения всех параметров можно реализовать сразу в рамках численного решения, обеспечивая достоверность решения задачи (4) с учетом метрологических ограничений, позволяющих учесть индивидуальные метрологические характеристики средств измерения контролируемых параметров:

$$Y_i \in [Y_i^{\min}, Y_i^{\max}], \quad (9)$$

где $Y_i^{\min}$ и $Y_i^{\max}$ – границы доверительного интервала существования действительного значения параметра, обусловленные номинальной погрешностью исправного средства измерения (или экспертной оценки).

Алгоритм численного решения задачи с учетом возможных значений теплотехнических параметров методом статистического программирования [9, 10] приведен на рис. 4.



Рис. 4. Алгоритм численного метода решения задачи регуляризации с учетом допустимых значений теплотехнических параметров

Согласно алгоритму, случайным образом заданное число раз m генерируются значения вектора искомых параметров $\mathbf{Y}\mathbf{Y} = [\mathbf{Y} \ \mathbf{Y}_1]$, включающего два вектора $\mathbf{Y}$ и $\mathbf{Y}_1$, которые ранее на первых двух этапах определялись аналитически согласно (4) и (8). Данный вектор формируется с учетом метрологических ограничений (9), представленных в табл. 1. Затем формируются матрица $\mathbf{A}$ (2) и вектор $\mathbf{Y}$ (3) и рассчитывается значение целевой функции F (1). При многократном повторении генерации вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$ выбирается минимальное значение целевой функции, которое и является численным решением задачи регуляризации. Результаты численного решения задачи приведены в табл. 1 (вариант В-4).

Для наглядности в табл. 1 приведены также полученные ранее результаты регуляризации при скалярной постановке задачи [4] (вариант С) и векторной постановке задачи для случая неизменных значений теплотехнических параметров. При этом для векторной постановки задачи рассматриваются следующие варианты [5]:

– вариант В-1 – аналитическое решение при равных значениях λ^* ненулевых элементов диагональной матрицы параметров регуляризации λ ;

– вариант В-2 – решение, полученное методом итераций аналитических решений;

– вариант В-3 – численное решение методом статистического программирования.

Решение задачи по варианту В-4 иллюстрирует рис. 5, где по оси абсцисс отложены номера вариантов генерации вектора $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$, по оси ординат – соответствующие им значения целевой функции; сплошная линия, огибающая область значений снизу, соответствует изменению значения целевой функции с ростом числа сгенерированных векторов $\mathbf{Y}\mathbf{Y}$. Анализ данных показывает, что с приемлемой для практических случаев точностью решение может быть найдено при числе сгенерированных вариантов 10^3 .

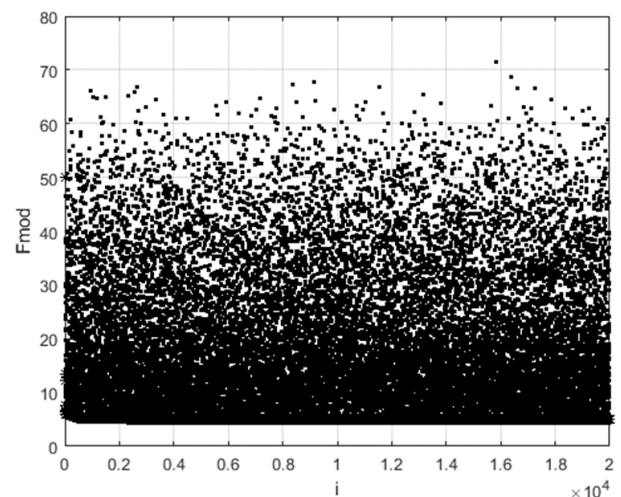


Рис. 5. Численное решение задачи регуляризации в виде зависимости значений целевой функции F от числа генераций вариантов решения i

Таким образом, учет неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей позволяет получить регуляризованные значения показателей работы оборудования при совместном сведении материального и энергетического балансов ГТУ с дополнительным уменьшением невязок балансов: значение целевой функции регуляризации (1) по сравнению с ранее предложенными вариантами решения задачи, согласно данным табл. 1, уменьшилось в среднем на 7,4%.

В завершение покажем, как предложенный вариант сведения балансов влияет на соотношение значений КПД брутто ГТУ, определяемых по прямому $\eta_{\text{бр(пр)}}^{\text{ГТУ}}$ и обратному $\eta_{\text{бр(обр)}}^{\text{ГТУ}}$ балансам [2, 3]. В табл. 2 приведены результаты расчета по варианту В-4 по сравнению с ранее полученными результатами [5] для остальных вариантов.

Таблица 2. Результаты расчетов КПД брутто ГТУ по прямому и обратному балансам для контрольного режима при различных вариантах постановки и решения задачи регуляризации

Показатель, единица измерения	Значения расчетов по разным вариантам					
	без сведения балансов [5]	вариант С [5]	вариант В-1 [5]	вариант В-2 [5]	вариант В-3 [5]	вариант В-4
$\eta_{\text{брутто}}^{\text{ГТУ}}, \%$	32,24	31,85	31,94	31,92	31,88	32,208
$\eta_{\text{брутто}}^{\text{обратный}}^{\text{ГТУ}}, \%$	32,15	32,08	31,93	31,87	31,89	32,203
Модуль отклонения, % (отн.)	0,27	0,72	0,05	0,15	0,03	0,02

Анализ данных табл. 2 показывает, что учет неопределенности результатов измерения теплотехнических параметров теплоносителей при регуляризации позволяет практически полностью исключить невязку между значениями КПД брутто, определенными двумя способами, что является дополнительным подтверждением обоснованности предложенного способа решения задачи сведения балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности ГТУ. Это позволяет рекомендовать предложенную методику для использования в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности ГТУ при оперативном контроле эксплуатируемых установок, разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, обработке результатов тепловых балансовых испытаний.

Выводы. Предложенный вариант постановки задачи сведения материальных и энергетических балансов ГТУ и ее решение в два этапа не показал значимого повышения точности результатов.

Предложенный на третьем этапе исследования вариант численного решения задачи оптимизации методом статистического программирования позволил учесть все метрологические ограничения и показал возможность дополнительного уменьшения невязок при сведении балансов массы и энергии по ГТУ.

Указанный вариант постановки и решения задачи обеспечил достижение практически полного соответствия значений КПД брутто ГТУ, определяемых по прямому и обратному балансам. Это позволяет рекомендовать предложенную методику для использования в системах автоматизированного мониторинга показателей тепловой экономичности ГТУ как при разработке нормативных энергетических характеристик оборудования, в том числе при обработке результатов тепловых балансовых испытаний, так и при оперативном контроле эксплуатируемых установок.

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. DOI: 10.1134/S0040363615080032.

2. **Ледуховский Г.В., Поспелов А.А.** Расчет и нормирование показателей тепловой экономичности оборудования ТЭС. – Иваново, 2015. – 468 с.

3. **Горшков А.С.** Техничко-экономические показатели тепловых электростанций. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1974. – 240 с.

4. **Методика** совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / А.С. Зиновьева, С.Д. Горшенин, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 1. – С. 5–10. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010.

5. **Векторная** постановка задачи совместного сведения материального и энергетического балансов при расчете фактических показателей тепловой экономичности газотурбинных установок / А.С. Зиновьева, Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков и др. // Вестник ИГЭУ. – 2023. – Вып. 5. – С. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.005-011.

6. **Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.** Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1979. – 285 с.

7. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems // Technometrics. – 1970. – No. 12. – P. 55–67.

8. **Hoerl A.E., Kennard R.W.** Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications // Amer. J. Math. Management Sci. – 1981. – No. 1. – P. 5–83.

9. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

10. **Таха Х.** Введение в исследование операций. – М.: Вильямс, 2005. – 901 с.

11. **Цанев С.В., Буров В.Д., Ремезов А.Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций / под ред. С.В. Цанева. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 584 с.

12. **Шелыгин Б.Л., Мошкарин А.В.** Котлы-утилизаторы парогазовых установок электростанций. – Иваново, 2012. – 284 с.

References

1. Leducovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.

2. Leducovskiy, G.V., Pospelov, A.A. *Raschet i normirovanie pokazateley teplovoy ekonomichnosti oborudovaniya TES* [Calculation and normalization of indicators of thermal efficiency of the TPP equipment]. Ivanovo, 2015. 468 p.

3. Gorshkov, A.S. *Tekhniko-ekonomicheskie pokazateli teplovykh elektrostantsiy* [Technical and economic indicators of thermal power plants]. Moscow: Energiya, 1974. 240 p.

4. Zinov'eva, A.S., Gorshenin, S.D., Leducovskiy, G.V., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2023,

issue 1, pp. 5–10. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.1.005-010.

5. Zinov'eva, A.S., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Shuvalov, S.I. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 5, pp. 5–11. DOI: 10.17588/2072-2672.2023.5.005-011.

6. Tikhonov, A.N., Arsenin, V.Ya. *Metody resheniya nekorrektnykh zadach* [Methods for solving incorrect problems]. Moscow: Nauka, 1979. 285 p.

7. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge Regression: Biased Estimation for Non orthogonal Problems. *Technometrics*, 1970, no. 12, pp. 55–67.

8. Hoerl, A.E., Kennard, R.W. Ridge regression – 1980. Advances, algorithms, and applications. *Amer. J. Math. Management Sci.*, 1981, no. 1, pp. 5–83.

9. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operations research:

challenges, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

10. Takha, Kh. *Vvedenie v issledovanie operatsiy* [Introduction to operations research]. Moscow: Vil'yams, 2005. 901 p.

11. Tsanev, S.V., Burov, V.D., Remezov, A.N. *Gazoturbinnye i parogazovye ustanovki teplovykh elektrostantsiy* [Gas turbine and combined cycle plants of thermal power plants]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2002. 584 p.

12. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V. *Kotly-utilizatory parogazovykh ustanovok elektrostantsiy* [Waste heat boilers of steam-gas plants of power plants]. Ivanovo, 2012. 284 p.