

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Регуляризация материальных газовых потоков в энергетических системах сложной структуры

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Обеспечение нормативной герметичности вакуумной системы паровых турбин с конденсацией пара является важной задачей эксплуатации энергетического оборудования. Ее решение сопряжено со сложностью определения собственно расхода воздуха с присосами в вакуумную систему. В настоящее время для турбоустановок с пароструйными эжекторами основным методом количественного определения расхода воздуха с присосами является его прямое измерение с помощью воздухомеров, устанавливаемых на патрубок отвода неконденсируемых газов в атмосферу из основного эжектора. Однако такой подход не позволяет определить наиболее вероятные элементы вакуумной системы с повышенными присосами, а измеренный расход воздуха оказывается не связанным с результатами измерения концентрации растворенного кислорода в воде разных потоков конденсационной установки и системы регенерации низкого давления. Преодолению указанной проблемы будет способствовать разработка метода сведения материального баланса по слаборастворимым газам в технологических схемах конденсационной установки и системы регенерации низкого давления паровых турбин.

Методы и материалы: Используется метод решения некорректных задач, построенный на основе регуляризации Тихонова, и матричная модель потоков в системе, разработанная на базе теории графов.

Результаты: Для сведения балансов потоков теплоносителей и растворенных в воде и паре газов сформулирована задача регуляризации материальных потоков при некорректном задании априорной информации. Предложен алгоритм ее решения. Получены аналитические и численные решения сформулированной задачи. Выполнен анализ полученных решений.

Выводы: Предложенный подход к сведению материальных балансов по газовым потокам обеспечивает решение практической задачи определения расхода присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановок и расходов воздуха по элементам отсоса паровоздушной смеси с учетом результатов измерения расхода воздуха, удаляемого основным эжектором, и концентрации растворенного кислорода в воде различных относящихся к исследуемой энергетической системе потоков.

Ключевые слова: материальные балансы, некорректная задача, модель системы, метод регуляризации, матричная формализация, графы, матрица инцидентности, оптимизационная задача, статистическое программирование, конденсационная установка паровой турбины.

Regularization of physical gas flows in complex power systems

G.V. Ledukhovsky, V.P. Zhukov, E.V. Barochkin
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: lgv83@yandex.ru

Abstract

Background: An important problem power equipment operation is ensuring specified airtightness in the vacuum system of steam turbines with steam condensation. This problem is difficult to solve as it is not easy to determine the actual air consumption and air inflows into the vacuum system. The main method currently used to determine these parameters in turbines with steam-jet ejectors is direct air measurement by flow meters installed on the output tube discharging the non-condensable gas from the main ejector into the atmosphere. However, this approach cannot be used to determine the most likely components of the vacuum system with high air inflows, and the measured air flow does not account for the results of measuring the concentration of dissolved oxygen in different water flows from the condensing unit and low-pressure recov-

ery system. This problem can be addressed by developing a method for solving the material balance of poorly soluble gases on the process diagram of the condensing unit and the low-pressure recovery system of steam turbines.

Materials and methods: The authors used a method of solving incorrect problems based on the Tikhonov regularization and a matrix model of flows in the system based on the graph theory.

Results: To determine the balances of heat transfer fluids and gases dissolved in water and steam, the authors formulated the problem of regularization of material flows in case of incorrect assignment of a priori information, suggested an algorithm of its solution, obtained analytical and numerical solutions to the formulated problem, and analyzed the obtained solutions.

Conclusions: The proposed approach to determining the material balances for gas flows provides a solution to a practical problem of calculating the actual air inflow consumption in the vacuum system of turbines and air consumption in the steam-air extraction units accounting for the consumption measurement results of air removed by the main ejector and the concentration of oxygen dissolved in water of various flows related to the system.

Key words: material balances, incorrect problem, system model, regularization method, matrix formalization, graphs, incidence matrix, optimization problem, statistical programming, condensing unit of steam turbine.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.005-015

Введение. Расход присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановок с конденсацией пара нормируется руководящими документами¹. Обеспечение нормативной герметичности вакуумной системы турбин является важной задачей эксплуатации энергетического оборудования. Повышенные присосы воздуха в элементы турбоустановки, работающие под разрежением, обуславливают увеличение давления отработавшего в турбине пара и ухудшение показателей тепловой экономичности процесса производства электрической энергии [1]. Негативным последствием увеличения расхода присосов воздуха является увеличение концентрации растворенного кислорода в основном конденсате. Последний показатель является нормируемым, поскольку определяет скорость коррозии металла водяного тракта системы регенерации низкого давления [2]. Рассматриваемый эффект проявляется в тех случаях, когда режим работы конденсатора ограничен основным эжектором: при относительно больших присосах воздуха, приводящих к перегрузке эжектора, в сочетании с паровой нагрузкой конденсатора менее граничной (обычно составляющей около 50 % от номинальной паровой нагрузки). Известно, что увеличению концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате способствует уменьшение температуры охлаждающей воды перед конденсатором до значений, меньших расчетной температуры для данного конденсатора, а также увеличение расхода охлаждающей воды [3–7]. По этим причинам проблема обеспечения нормативной концентрации растворенного кислорода в турбинном конденсате оказывается наиболее актуальной в зимний период для теплофикационных турбин при их работе с малым пропуском пара в конденсатор, особенно на ТЭС с прямой системой технического водоснабжения.

Решение задачи обеспечения нормативной герметичности вакуумной системы паровых турбин сопряжено со сложностью определения собственно фактического расхода воздуха с присосами. Подавляющее большинство теплофикационных турбоустановок на ТЭС России оборудованы основными эжекторами пароструйного типа. В настоящее время для таких объектов основным методом количественного определения расхода воздуха с присосами в вакуумную систему является его прямое измерение с помощью воздухомеров, устанавливаемых на патрубках отвода неконденсируемых газов в атмосферу из основного эжектора. Однако такой подход имеет существенные недостатки: во-первых, не удается определить наиболее вероятные элементы вакуумной системы с повышенными присосами; во-вторых, измеренный расход воздуха с присосами оказывается не связанным с результатами измерения концентрации растворенного кислорода в воде разных потоков конденсационной установки и системы регенерации низкого давления.

Преодолению указанной проблемы будет способствовать разработка метода сведения материального баланса по слабо растворимым в воде газам в технологических схемах конденсационной установки и системы регенерации низкого давления паровых турбин, позволяющего определять расход воздуха с присосами в вакуумную систему с учетом результатов измерения не только расхода воздуха, удаляемого основным эжектором, но и концентрации растворенного кислорода в воде различных относящихся к исследуемой системе потоков.

При сведении материальных балансов в технологических системах сложной структуры, как по потокам теплоносителей, так и по газовым потокам, основные сложности связаны с некорректностью исходной (априорной) информации, которая обусловлена метрологическими характеристиками измерительных приборов, их неисправностью или даже отсутствием. В силу этого возникают ситуации, когда согласно показаниям

¹ Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: офиц. текст: утв. Приказом Минэнерго России №229 от 19.06.03: ввод. в действие с 30.06.03: зарег. в Минюсте России 20.06.03 № 4799. – М.: Омега-Л, 2006. – 256 с.

приборов материальные балансы по потокам теплоносителей и газов не сводятся для всей системы или для отдельных ее подсистем. Поэтому для сведения балансов в связанных подсистемах необходимо провести обоснованную корректировку показаний приборов, что можно сделать, используя различные подходы и методы² [8]. Процедуру указанной корректировки, согласно терминологии, используемой в [8], будем называть регуляризацией.

Целью настоящего этапа исследований является разработка метода сведения материальных балансов по слаборастворимым в теплоносителях ТЭС газам при некорректно заданной исходной информации.

Для достижения поставленной цели последовательно решаются следующие задачи:

- разработка матричной модели системы произвольной топологии, позволяющей рассчитывать материальные балансы по слаборастворимым в теплоносителях газам для любой ее подсистемы;

- с учетом разработанной матричной модели системы формулировка задачи регуляризации массовых потоков газов, формирование структуры целевой функции регуляризации, позволяющей учитывать достоверность исходной информации;

- разработка методов и алгоритмов решения задачи и анализ полученного решения.

Методы исследования. Ранее нами [9, 10] был рассмотрен ряд задач по сведению балансов материальных и энергетических потоков теплоносителей в энергетических системах сложной структуры без учета содержания в теплоносителе растворенных газов. Предложенные методы могут быть приняты за основу при решении сформулированной задачи сведения балансов по расходам газа в таких системах.

Расходы растворенных в теплоносителях газов на несколько порядков меньше расходов собственно теплоносителя (воды и водяного пара). Это позволяет решение задачи регуляризации потоков теплоносителей рассматривать независимо от решения задачи регуляризации газовых потоков. Сделанное допущение позволяет перечисленные задачи регуляризации решать последовательно, начиная с регуляризации потоков теплоносителей и затем выполняя регуляризацию потоков газов. Такое последовательное решение позволяет существенно упростить постановку и решение указанных задач.

В качестве энергетической системы рассмотрим фрагмент тепловой схемы турбоустановки с турбиной Тп-115/125-130-1тп УТМЗ, установленной на Йошкар-Олинской ТЭЦ-2 (рис. 1) [11]. Турбина имеет регулируемый двухступенчатый теплофикационный и ограничен-

ный регулируемый производственный отборы пара. Конденсатор типа КГ1-3100 представляет собой один корпус от конденсатора КГ2-6200 турбоагрегата Т-100-130, подключенный к одностороннему выхлопу ЦНД. В составе конденсационной установки имеются охлаждаемые основным конденсатом турбины теплообменники: охладители пароструйных основных эжекторов (ОЭ) и эжектора уплотнений (ЭУ), а также охладитель пара промежуточных камер концевых уплотнений турбоагрегата (ПН-100). Система регенерации низкого давления включает три подогревателя (ПНД) поверхностного типа, причем ПНД-2 оборудован сливным насосом с закачкой конденсата греющего пара в трубопровод основного конденсата между ПНД-2 и ПНД-3. Единственно возможной схемой слива конденсата греющего пара ПНД-1 является его слив в ПСГ-2, поэтому ПНД-1 может находиться в работе только в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды. Слив конденсата греющего пара ПСГ-2 в широком диапазоне тепловых нагрузок турбины осуществляется каскадно в ПСГ-1. Конденсат ПСГ-1 подается в тракт основного конденсата до ПНД-1. Отсосы паровоздушной смеси из элементов системы выполнены по типовой схеме.

Рассмотрим сначала общий подход к решению задачи. На первом этапе решается задача регуляризации материальных потоков теплоносителя (воды и пара). В соответствии с полученными нами ранее [9, 10] результатами, будем использовать концепцию метода регуляризации Тихонова [8], которая сводится в данном случае к поиску разумного компромисса между минимальным значением невязки балансов по всем узлам и минимальным рассогласованием решения с исходной (априорной) информацией по рассматриваемой энергетической системе. Под априорной информацией [8] понимаются используемые при формировании модели предварительные данные: результаты измерения расходов по ряду потоков, представления исследователя, экспертные оценки. Концепция регуляризации [3] позволяет исходную некорректную задачу

$$\mathbf{A}\mathbf{Y} + \boldsymbol{\sigma} = \mathbf{B} \quad (1)$$

свести к задаче минимизации функции

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

где \mathbf{Y} , \mathbf{Y}_0 – искомое регуляризованное решение и его априорная оценка; \mathbf{A} , \mathbf{B} – известные операторы модели системы; $\boldsymbol{\sigma}$ – числовой параметр, характеризующий погрешность правой части уравнения; λ – малый положительный параметр регуляризации, который необходимо подобрать определенным способом.

При минимизации функции $F_c(\mathbf{Y})$, получается регуляризованное решение $\mathbf{Y}(\lambda)$, зависящее от параметра λ .

² Овчинников Ю.В. Анализ и оптимизация технико-экономических и экологических параметров ТЭС: дис. ... д-ра техн. наук: 05.14.01. – Новосибирск, 1999. – 60 с.

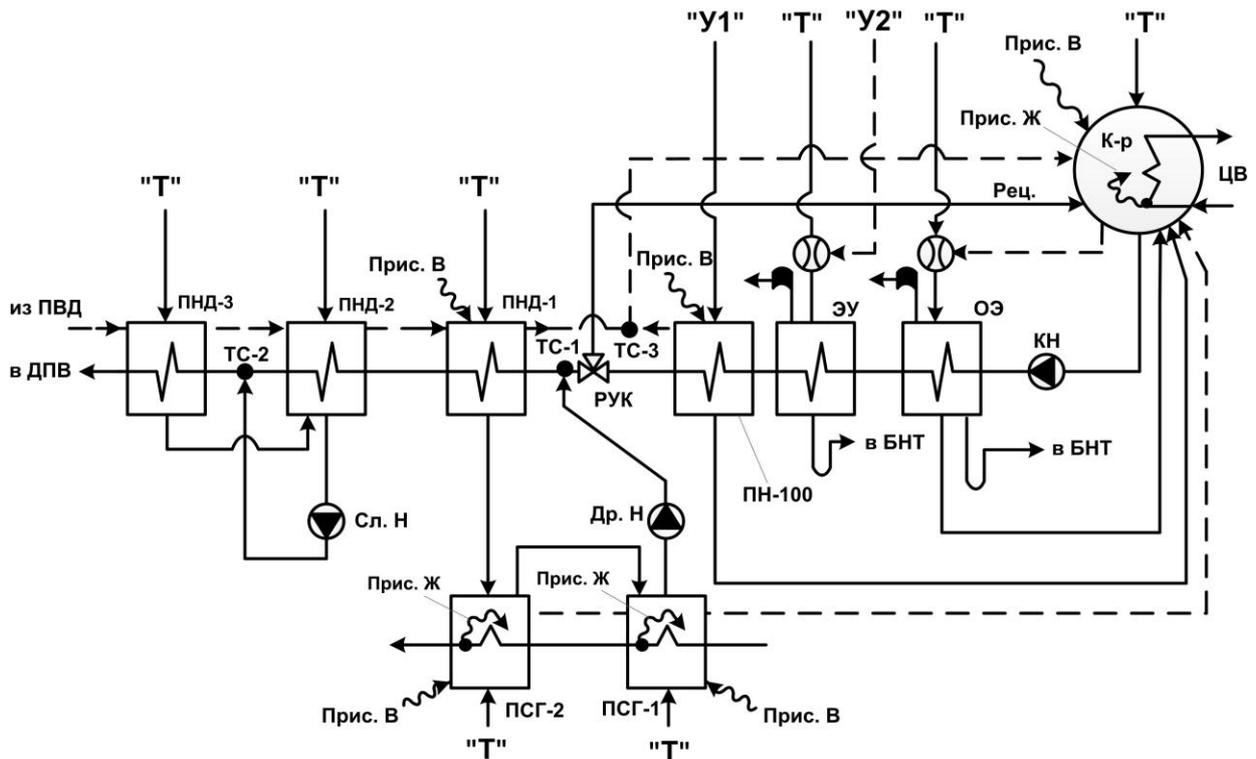


Рис. 1. Фрагмент структурной схемы энергетической системы: К-р – конденсатор; ОЭ – основной эжектор; ЭУ – эжектор уплотнений турбоагрегата; ПН-100 – охладитель пара промежуточных камер конечных уплотнений турбоагрегата; РУК – регулятор уровня в конденсаторе; ПНД – подогреватель низкого давления системы регенеративного подогрева питательной воды; ПСГ – подогреватель сетевой горизонтальный; БНТ – бак низких точек; КН, Сл. Н, Др. Н – насосы конденсатный, сливной системы регенерации, дренажный сетевой подогревателя соответственно; ТС – точка смешения потоков; ЦВ, СВ – вода циркуляционная, сетевая соответственно; Прис. В – присос воздуха; Прис. Ж – присос жидкости; Рец. – рециркуляция; Т – турбина; ДПВ – деаэратор питательной воды; У1, У2 –промежуточные и крайние камеры конечных уплотнений турбоагрегата соответственно; сплошные линии – потоки теплоносителя; пунктирные линии – потоки воздуха или паровоздушной смеси

При использовании метода регуляризации для корректировки результатов измерений расходов теплоносителя необходимо построить математическую модель исследуемого объекта, т. е. определить вид операторов **A** и **B**. Для моделирования материальных потоков в схеме произвольной структуры используются подходы и методы теории графов [12]. Для описания структуры системы будем использовать направленный граф $G = (X, V)$. В качестве узлов графа (x_i) рассматриваются узлы смешения и распределения потоков, а трубопроводы между узлами представляются соответствующими ветвями графа (v_j). Окончательная структура графа $G = (X, V)$ с указанием номеров узлов и ветвей представлена на рис. 2. При построении графа исключен элемент тепловой схемы ЭУ, поскольку все входящие и выходящий потоки этого элемента не связаны с рассматриваемой системой, а нагрев основного конденсата в ЭУ в данном случае нас не интересует.

Для модельного описания структуры системы используется матрица инцидентности графа, порядок построения которой проиллюстрирован в [9, 10]. Каждая строка матрицы относится к соответствующему узлу графа x_i , каждый столбец – ветви графа v_j . Если начало j -й ветви графа размещается в i -м узле, то соответствующий элемент матрицы инцидентности равен единице ($a_{ij} = 1$). Если конец j -й ветви графа размещается в i -м уз-

ле, то соответствующий элемент матрицы равен минус единице ($a_{ij} = -1$). В данном случае строится матрица инцидентности **A** размера $n \times m$ ($n = 20$ – число строк или узлов графа, $m = 44$ – число столбцов или ветвей графа).

Следует отметить, что произведение матрицы инцидентности **A** и вектора расходов по ветвям графа **V** дает в каждом элементе матрицы **AV** небаланс массы в соответствующем узле. Это позволяет известную постановку некорректной задачи (1) с учетом сделанных замечаний и введенных обозначений ($B = 0, Y = V$) записать в виде

$$AV + \sigma = 0, \tag{3}$$

где в качестве оператора **A** представлена матрица инцидентности.

Формулировка оптимизационной задачи (2) при этом принимает вид

$$F_c(V, \lambda) = |AV|^2 + \lambda |V - V_0|^2 \Rightarrow \min. \tag{4}$$

Следует отметить, что первое слагаемое в целевой функции (4) показывает суммарную невязку балансов по всем узлам $\Delta = |AV|$, а второе слагаемое характеризует модуль вектора отклонения полученного решения от исходного вектора $\Delta V = |V - V_0|$.

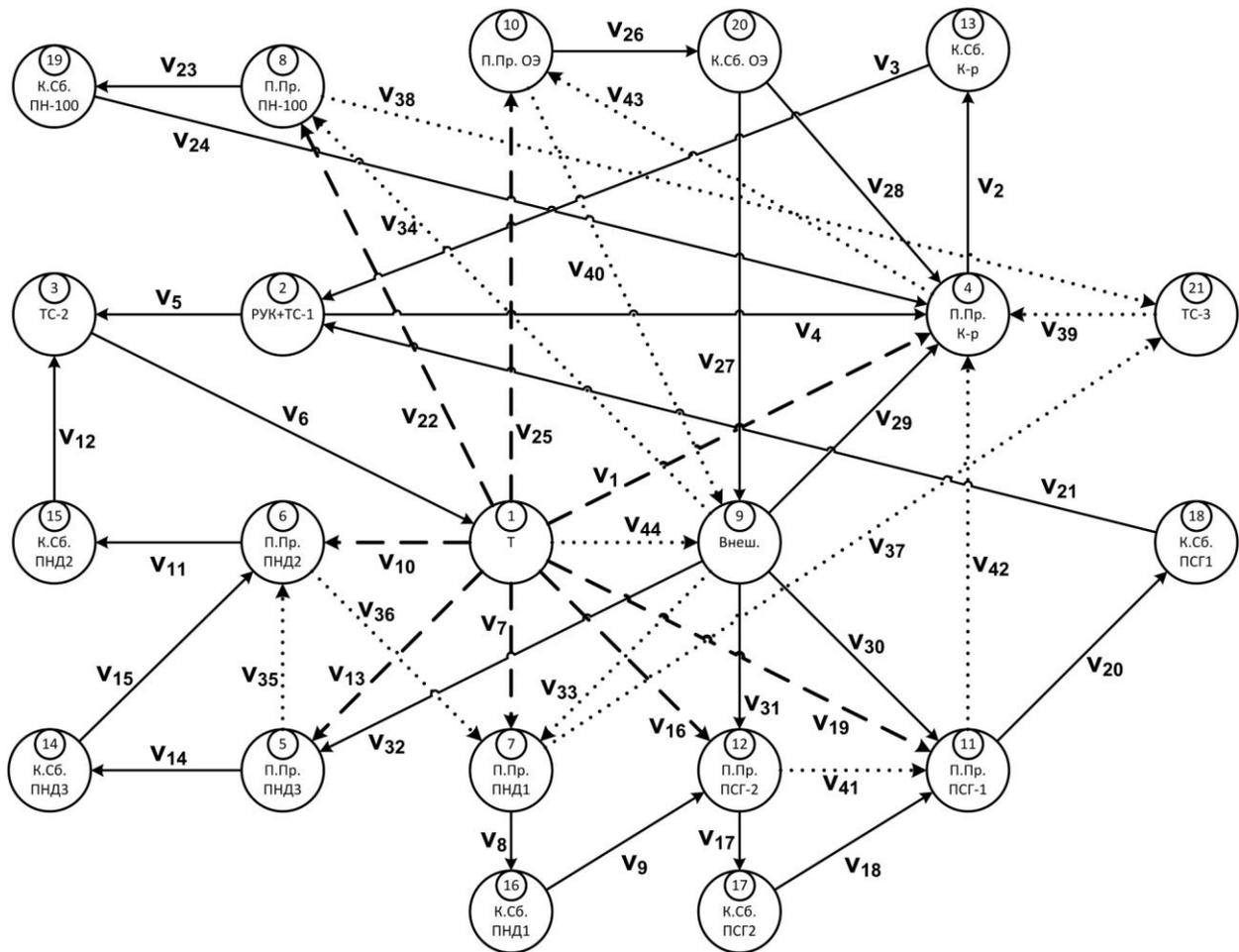


Рис. 2. Структура графа $G = (X, V)$, соответствующего структуре технологической схемы по рис. 1: К.Сб. – конденсатосборник; П.Пр. – паровое пространство; Внеш. – внешняя среда; цифрами в кружках обозначены номера узлов; сплошные линии – потоки воды (и газа, растворенного в воде); штриховые линии – потоки пара (и газа в паре); пунктирные линии – потоки воздуха или паровоздушной смеси; прочие обозначения соответствуют рис. 1

Для линейной постановки задачи регуляризации известно [8] ее аналитическое решение, которое для нашей задачи может быть записано в виде

$$V = (A^T A + \lambda E)^{-1} \lambda V_0, \tag{5}$$

где E – единичная матрица; верхние индексы «т» и «-1» показывают транспонирование и обращение матрицы соответственно.

Найденное решение задачи регуляризации позволяет перейти ко второй части решаемой задачи по сведению балансов материальных газовых потоков в рассматриваемой энергетической системе.

Согласно (5), определяется регуляризованный материальный поток (расход) теплоносителя в каждой ветви графа. Для сведения балансов по газу необходимо задать априорную информацию по расходам теплоносителя в каждой ветви и массовую концентрацию анализируемого газа в данной ветви. Тогда поэлементное произведение вектора значений расхода V и вектора концентраций газа C определит материальные потоки газа в каждой ветви в виде вектора

$$V_1 = V \cdot C, \tag{6}$$

где символ « \cdot » показывает поэлементное умножение матриц одинакового размера. Необходимо отметить, что для ряда ветвей (рис. 2, пунктирные линии) расход теплоносителя может быть равен нулю, а априорное значение расхода газа V_1 задано не как произведение расхода теплоносителя и массовой концентрации газа, а как результат прямого измерения (показания воздухомера на патрубке отвода газов из основного эжектора в атмосферу) или экспертной оценки (присосы воздуха по элементам системы).

Дальнейшая постановка и решение задачи регуляризации материальных потоков газа аналогична рассмотренной задаче регуляризации материальных потоков теплоносителей (4), (5). Перепишем постановку и решение задачи регуляризации, записывая индекс «1» для параметров газа в рассматриваемой системе, в следующем виде:

$$F_{c1}(V_1, \lambda_1) = |AV_1|^2 + \lambda_1 |V_1 - V_{01}|^2 \Rightarrow \min; \tag{7}$$

$$V_1 = (A^T A + \lambda_1 E)^{-1} \lambda_1 V_{01}. \tag{8}$$

Нами ранее [9, 10] показано, что использование аналитического решения задачи (5), (8) имеет два существенных недостатка. Во-первых, оно не позволяет учесть метрологические ограничения – различающуюся для отдельных ветвей графа степень достоверности определения априорной информации (для измеряемых расходов – метрологические характеристики конкретных приборов; для не измеряемых расходов – степень достоверности соответствующей экспертной оценки или косвенного измерения). Во-вторых, при аналитическом решении отсутствует возможность учета технологических ограничений (допустимых диапазонов изменения расхода по каждой ветви); в результате при решении некоторые расходы могут оказаться отрицательными или, напротив, превосходящими соответствующий объективный максимум. Тем не менее аналитическое решение задачи имеет самостоятельную теоретическую ценность, обусловленную возможностью его использования для проверки на тестовых примерах всех прочих методов решения рассматриваемой задачи.

Преодолеть указанные недостатки аналитического решения задачи позволяет переход от скалярной постановки задачи (4), (7) к ее векторной постановке [9, 10] и использование численного решения задачи методом статистического программирования [13]. В векторной постановке задачи необходимо вместо скаляра λ использовать диагональную матрицу параметров регуляризации λ . С учетом этого, а также указанных метрологических и технологических ограничений перепишем выражения (4) и (7) в следующем виде:

$$F_c(\mathbf{V}, \lambda) = |\mathbf{AV}|^2 + |\lambda \mathbf{V} - \mathbf{V}_0|^2 \Rightarrow \min; \quad (9)$$

$$v_i \in [v_i^{\min}; v_i^{\max}]; \quad (10)$$

$$F_{c1}(\mathbf{V}_1, \lambda_1) = |\mathbf{AV}_1|^2 + |\lambda_1 \mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_{01}|^2 \Rightarrow \min; \quad (11)$$

$$v_{1i} \in [v_{1i}^{\min}; v_{1i}^{\max}], \quad (12)$$

где λ и λ_1 – диагональные матрицы малых положительных параметров регуляризации; v_i^{\min} , v_i^{\max} , v_{1i}^{\min} , v_{1i}^{\max} – границы доверительных интервалов существования действительных значений параметра, обусловленные погрешностью средства измерения или экспертной оценки (индекс «1» указывает на газовые потоки) с учетом установленных технологических ограничений.

Алгоритм численного решения задачи (9)–(10), (11)–(12) определяется многократной генерацией случайным образом вектора расходов \mathbf{V} (или \mathbf{V}_1) вокруг априорных значений его элементов в заданном ограничением (10), (12) диапазоне. Такая генерация решений автоматически приводит к выполнению метрологических и технологических ограничений. Сгенерированные решения сравниваются по значениям целевой функции оптимизации с выбором в качестве

окончательного результата того решения, которому соответствует минимальное значение целевой функции.

Результаты исследования. Рассмотрим решение сформулированной задачи регуляризации материальных потоков теплоносителей и газов применительно к одному из режимов работы турбоустановки Тп-115/125-130-1тп, результаты измерения параметров в котором получены нами в ходе тепловых балансовых испытаний турбоустановки в 2010 г. [11].

Исходные данные для решения задачи представлены в таблице. Априорные значения расходов теплоносителей (воды и пара) по схеме получены либо прямыми измерениями, либо как результат решения систем уравнений материального и теплового балансов по элементам турбоустановки (в том числе, элементам, не входящим в участок тепловой схемы, отраженный на рис. 1), либо в ходе экспертных оценочных расчетов (например, расчетов протечек пара в системе концевых уплотнений турбины). В соответствии с принятыми ранее допущениями, при регуляризации материальных потоков теплоносителей мы не учитываем ввиду малости расходы по некоторым ветвям тепловой схемы; в таких случаях в таблице для соответствующей ветви указано нулевое априорное значение расхода теплоносителя. Погрешность определения исходных значений напрямую измеряемых расходов теплоносителей соответствует нормируемой погрешности соответствующих средств измерения. Для неизмеряемых расходов теплоносителей погрешность определения исходных значений вычисляется как погрешность косвенных измерений либо является результатом экспертной оценки.

Рассмотрим результаты первого этапа решения задачи – регуляризации материальных потоков по воде и водяному пару, приведенные в таблице. Данные таблицы позволяют заключить, что в ходе регуляризации расходов теплоносителей средняя по узлам графа невязка материального баланса уменьшилась с 2,7 до 0,9 %, а максимальная – с до 8,8 до 2,3 % (все невязки отнесены к расходу отработавшего пара в конденсатор турбины). Это доказывает справедливость всех сделанных нами ранее [9, 10] выводов относительно применимости предложенного метода сведения материальных балансов в энергетических системах сложной структуры.

Решение задачи регуляризации материальных газовых потоков начинается с задания априорных значений расходов газа по элементам системы. Учитывая, что из всех растворенных в воде газов – компонентов воздуха – наиболее доступным с точки зрения измерения концентрации является кислород, задачу регуляризации расходов газовых потоков целесообразно решать именно применительно к растворенному кислороду.

Исходная (априорная) информация и результаты решения задач регуляризации материальных потоков по расходам теплоносителей и газа

| Номер ветви графа, / | Исходное значение расхода теплоносителя, V_{0i} , кг/с* | Погрешность определения исходных значений расхода теплоносителя, % | Численное решение задачи регуляризации расходов теплоносителя (9)–(10), V_i , кг/с | Исходное значение концентрации растворенного кислорода в теплоносителе, C_{0i} , мкг/кг* | Исходное значение расхода газа, V_{0i} , мкг/с* | Погрешность определения исходных значений расхода газа, % | Численное решение задачи регуляризации расходов газа (11)–(12), V_i , мкг/с |
|----------------------|---|--|--|--|---|---|---|
| 1 | 22,96 | 3,4 | 22,82 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 39,89 | 1,6 | 40,13 | 135 | 5418,1 | 13,5 | 6006,6 |
| 3 | 39,89* | 2,6 | 40,69 | 135* | 5493,1* | 13,5 | 5272,8 |
| 4 | 16,82 | 2,2 | 16,72 | 135 | 2257,3 | 13,6 | 2443,6 |
| 5 | 85,17 | 3,8 | 84,45 | – | 6427,4 | 28,5 | 7918,1 |
| 6 | 90,63* | 2,4 | 90,30 | 66* | 5959,5* | 16,2 | 6000,3 |
| 7 | 2,35 | 2,6 | 2,39 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 2,35 | 2,6 | 2,37 | 42 | 99,4 | 80,0 | 79,2 |
| 9 | 2,35 | 2,6 | 2,34 | 42 | 98,3 | 80,0 | 166,4 |
| 10 | 2,19 | 2,6 | 2,24 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 5,46 | 2,7 | 5,50 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 5,87* | 2,6 | 5,82 | 0* | 0* | 0 | 0 |
| 13 | 3,27 | 2,8 | 3,21 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 3,33 | 2,8 | 3,36 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 3,33 | 2,8 | 3,27 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 16,71 | 3,1 | 16,57 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 18,52 | 4,5 | 18,46 | 8 | 147,7 | 52,5 | 160,6 |
| 18 | 18,52 | 4,5 | 18,44 | 8* | 147,5* | 52,5 | 120,1 |
| 19 | 42,97 | 3,2 | 42,37 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 60,07 | 2,1 | 60,37 | 54 | 3259,7 | 17,4 | 3241,1 |
| 21 | 60,07* | 3,1 | 60,29 | 54* | 3255,8* | 17,4 | 2914,8 |
| 22 | 0,48 | 3,6 | 0,48 | 320 | 153,8 | 30,0 | 112,3 |
| 23 | 0,48 | 3,6 | 0,48 | 35 | 16,7 | 80,0 | 5,6 |
| 24 | 0,48 | 3,6 | 0,47 | 35 | 16,4 | 80,0 | 28,8 |
| 25 | 0,44* | 2,0 | 0,44 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 26 | 0,44 | 4,0 | 0,44 | 1304 | 572,5 | 12,1 | 534,4 |
| 27 | 0,18* | 1,1 | 0,18 | 1304* | 235,4* | 11,3 | 242,4 |
| 28 | 0,26 | 4,1 | 0,25 | 1304 | 332,1 | 12,1 | 385,5 |
| 29 | 0,026* | 1,2 | 0,026 | 6788* (в воде) | 1060000 с присосами воздуха; 177,8* с присосами воды | 88,8 | 1116668,7 |
| 30 | 0,011* | 1,2 | 0,011 | 83* | 3827,6 с присосами воздуха; 0,90* с присосами воды | 89,8 | 3623,6 |
| 31 | 0,006* | 1,2 | 0,006 | 83* | 1492,0 с присосами воздуха; 0,49* с присосами воды | 89,8 | 1232,9 |
| 32 | 0,058 | 22 | 0,062 | 0* | 0* | 0 | 0 |
| 33 | 0 | – | 0,00 | – | 111000 | 80,0 | 104655,3 |
| 34 | 0 | – | 0,00 | – | 62000 | 80,0 | 95622,8 |
| 35 | 0 | – | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 36 | 0 | – | 0,00 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 37 | 0 | – | 0,00 | – | 110901,3 | 80,0 | 94574,7 |
| 38 | 0 | – | 0,00 | – | 61983,2 | 80,0 | 88601,5 |
| 39 | 0 | – | 0,00 | – | 172884,5 | 80,0 | 214846,6 |
| 40 | 0 | – | 0,00 | – | 1523286* | 28,0 | 1371047,4 |
| 41 | 0 | – | 0,00 | – | 1443,0 | 80,0 | 1872,5 |
| 42 | 0 | – | 0,00 | – | 2027,8 | 80,0 | 3487,5 |
| 43 | 0 | – | 0,00 | – | 1232282 | 80,0 | 1282100,8 |
| 44 | 0 | – | 0,00 | – | 5828,0 | 80,0 | 3783,1 |

Примечание: знаком «*» отмечены измеряемые параметры.

Указанные в таблице измеренные значения концентрации определены амперометрическим методом. Концентрации растворенного кислорода в потоках теплоносителя, не обеспеченных прямыми измерениями, вычисляются по

уравнениям материального баланса по газу отдельных элементов или участков схемы либо являются результатом экспертной оценки. Кроме того, для ряда потоков, как указано выше, при пренебрежении ввиду малости расходом собст-

венно теплоносителя априорные значения расхода газа задаются напрямую. На этих этапах следует остановиться подробнее.

Суммарный расход воздуха с присосами в вакуумную систему турбоустановки принят равным нормативному, определенному в соответствии с указанными выше правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. Пересчет расхода воздуха на расход кислорода выполнен с учетом молекулярной массы и объемных долей газов, составляющих атмосферный воздух. Полученный таким образом суммарный расход кислорода с присосами воздуха распределен по элементам системы, работающим под разрежением, пропорционально расчетным расходам воздуха с присосами в эти элементы. В свою очередь, расчетные присосы воздуха в каждый элемент вычислены согласно рекомендациям, содержащимся в [14], в зависимости от длины сварных и фланцевых соединений, работающих под разрежением, и эмпирических коэффициентов, определяющих среднестатистический удельный расход воздуха с присосами на один метр длины соответствующего соединения. В соответствии со схемой рис. 1, присосы воздуха принимаются условно локализованными в паровое пространство соответствующих теплообменников, однако в общем случае можно учесть отдельно присосы в паровое пространство и под уровень конденсата в конденсатосборнике, что позволяет более полно учесть влияние присосов воздуха на концентрацию растворенного кислорода в конденсате.

Априорные значения концентрации растворенного кислорода в конденсате греющего пара ряда пароводяных подогревателей определены в ходе оценки равновесных условий растворимости кислорода в воде в соответствии с законом Генри [2]. Выражение для расчета концентрации растворенного кислорода в конденсате имеет следующий вид:

$$C_{O_2} = \frac{\rho_{\text{ж}} C_{O_2}^n}{m_{\text{рх}} \left(\rho_{\text{п}} + \frac{18}{32} C_{O_2}^n 10^{-6} \right)}, \quad (13)$$

где C_{O_2} и $C_{O_2}^n$ – массовые концентрации растворенного кислорода в конденсате греющего пара и паре парового пространства подогревателя соответственно, мкг/дм^3 ; ρ и $m_{\text{рх}}$ – выраженные в одних единицах измерения абсолютное давление в паровом пространстве и коэффициент фазового равновесия (константа Генри) соответственно; $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ – плотности конденсата и пара соответственно, г/дм^3 ; 18 и 32 – молярная масса растворителя (воды) и молекулярного кислорода соответственно, г/моль .

В (13) значения $m_{\text{рх}}$, $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ в первом приближении принимаются по температуре насыщения, соответствующей давлению p .

Согласно (13), для определения равновесной концентрации растворенного кислорода в конденсате необходимо знать концентрацию этого газа в паре, находящемся в паровом пространстве подогревателя. По мере конденсации пара в подогревателе относительное содержание в нем неконденсируемых газов существенно увеличивается. Соответственно, и равновесная концентрация растворенного кислорода в конденсате в каждой точке поверхности теплообмена оказывается различной. С учетом этого для проведения более точных оценок следует выполнять позонный расчет теплообменного аппарата (желательно с учетом локального переохлаждения конденсата) с последующим определением среднемассовой концентрации газа в суммарном потоке конденсата. Применительно к конденсаторам паровых турбин эффективность такого подхода доказана, например, в [3, 4, 15–17]. Для оценочных расчетов допустимо ограничиться вычислением равновесной концентрации растворенного кислорода в конденсате на входе в поверхность теплообмена и выходе из нее с последующим осреднением полученных данных в соответствии с выбранным законом изменения концентрации (в большинстве случаев экспоненциальным).

Оценив таким образом концентрацию растворенного кислорода в конденсате, зная расход конденсата и суммарный расход поступающего в подогреватель газа, можно рассчитать расход газа по линии отсоса паровоздушной смеси из подогревателя.

Расходы растворенного кислорода с присосами воды в конденсаторе и сетевых подогревателей вычисляются путем умножения соответствующей концентрации растворенного кислорода в воде на расход воды с присосом, который, в свою очередь, определяется по данным химических анализов воды и конденсата греющего пара на общую жесткость или удельную электропроводность.

Погрешность определения априорных значений расходов газа определяется для разных потоков либо как погрешность косвенных измерений с учетом метрологических характеристик средств измерения концентрации газа и расхода теплоносителя, либо задается по результатам экспертной оценки.

Обсуждение и выводы. Результаты решения задачи регуляризации газовых потоков численным методом, приведенные в таблице, позволяют заключить, что в ходе регуляризации средняя по узлам графа невязка материального баланса уменьшилась с 6,1 до 1,7 %, а максимальная – с 19,1 до 6,5 % (все невязки отнесены к расходу газа в парогазовой смеси, удаляемой из основного эжектора в атмосферу). Для проверки правильности решения на рис. 3 выполнено сопоставление значений целевой функции, полученных в ходе численного решения при раз-

личном числе сгенерированных вариантов, со значением целевой функции, отвечающим аналитическому решению (8) задачи в скалярной постановке (7). Анализ результатов показывает, что стабилизация значения целевой функции наблюдается при числе сгенерированных вариантов решения в диапазоне от 10^5 до 10^6 . При этом значение целевой функции при численном решении отличается от ее значения при аналитическом решении не более чем на 10 относительных процентов. Такое расхождение объясняется учетом ограничений на допустимые значения параметров в численном решении, которые не учитываются при получении аналитического решения.

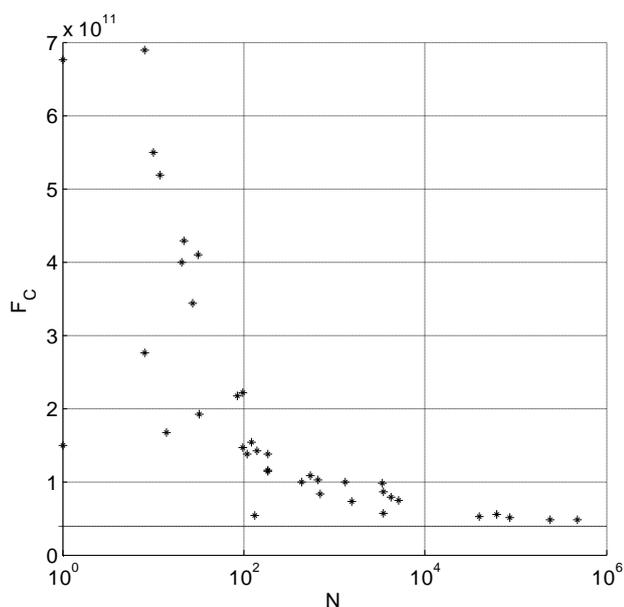


Рис. 3. Сопоставление значений целевой функции, полученных при аналитическом решении задачи в скалярной постановке (линия) и численном решении задачи в векторной постановке при разном числе итераций N численного решения (точки)

Получив регуляризованные значения расходов рассматриваемого газа (кислорода) по участкам схемы, можно определить расходы воздуха с присосами в интересующие элементы системы. Для этого необходимо выполнить пересчет, аналогичный реализованному на этапе подготовки априорной информации по расходам газа, с учетом молекулярной массы и объемных долей составляющих атмосферный воздух газов.

Сопоставление результатов численного решения задачи с априорными значениями расходов газов по схеме позволяет сделать ряд важных выводов:

1) в ходе регуляризации значение расхода воздуха с присосами в вакуумную систему по показаниям воздухомера, установленного на патрубке отвода неконденсируемых газов из основного эжектора в атмосферу, скорректировано на 10 %, что в ряде случаев может оказаться критичным с точки зрения признания вакуумной сис-

темы соответствующей или не соответствующей установленным нормам по герметичности;

2) разница между измеренным расходом воздуха, удаляемого из основного эжектора, и результатами оценочных расчетов присосов по элементам системы до регуляризации составила более 20 %, а после – 3,5 %. Таким образом, предложенный метод позволяет более обоснованно решать задачи не только интегральной оценки герметичности вакуумной системы, но и локализации элементов системы с повышенными присосами; при этом степень обоснованности получаемого решения задачи возрастает при увеличении числа точек измерения концентрации растворенного кислорода в воде и конденсатах системы;

3) изменения расходов газа по различным участкам системы отсоса паровоздушной смеси в ходе регуляризации достигли 50 % и более, что, с одной стороны, указывает на необходимость проведения такого рода расчетов при выборе конструктивных параметров системы отсоса и, с другой стороны, открывает возможность изучения реальных условий перехода газов в конденсат при конденсации пара из паровоздушной смеси в конденсаторе турбины, ПНД и теплообменниках, включенных в контур циркуляции основного конденсата турбоустановки.

Таким образом, разработанный метод сведения материальных балансов по слаборастворимым в теплоносителях ТЭС газам при некорректно заданной исходной информации позволяет определять расход воздуха с присосами в вакуумную систему турбоустановок и расходы воздуха по элементам системы отсоса паровоздушной смеси с учетом результатов измерения расхода воздуха, удаляемого основным эжектором, и концентрации растворенного кислорода в воде различных относящихся к системе потоков.

Список литературы

1. Сахаров А.М. Тепловые испытания паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.
2. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. – Л.: Стройиздат, 1972. – 137 с.
3. Шемпелев А.Г., Иглин П.В. Причины повышенного содержания кислорода в конденсате паротурбинных установок // Надежность и безопасность энергетики. – 2015. – № 4. – С. 61–64.
4. Шемпелев А.Г., Сущих В.М., Иглин П.В. О результатах сопоставления расчетных и нормативных характеристик конденсаторов паротурбинных установок в широком диапазоне их паровых нагрузок // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 60–64.
5. Повышение эффективности эксплуатации современных теплофикационных турбин / Л.Л. Симою, В.П. Лагун, Е.И. Эфрос, А.Г. Шемпелев // Теплоэнергетика. – 1999. – № 8. – С. 62–67.
6. Реконструкция системы отвода паровоздушной смеси из конденсатора и подогревателей теплофикационной турбины / А.Г. Шемпелев, Е.И. Эфрос С.И. Парфенов и др. // Тяжелое машиностроение. – 2002. – № 4. – С. 9–12.
7. Разработка и апробация элементов системы мониторинга состояния и диагностики конденсатора паровой турбины / Ю.М. Бродов, К.Э. Аронсон, А.Г. Шемпелев, С.И. Хаеи // Теплоэнергетика. – 2003. – № 2. – С. 67–69.

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

9. Векторная регуляризация материальных потоков в энергетических системах сложной структуры / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2013. – Вып. 4. – С. 5–11.

10. 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.

11. Испытания турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп при работе в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды / Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов, Н.С. Асташов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 2. – С. 3–10.

12. Алексеев В.В. Элементы теории множеств и теории графов. – Саров: СарФТИ, 2001. – 30 с.

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

14. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции: учеб. для вузов. – М.: Высш. шк., 1978. – 360 с.

15. Моделирование тепломассопередачи в многофазной среде конденсатора турбины / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, А.Н. Беляков, Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 1. – С. 52–56.

16. The development and approbation of elements of a system for monitoring and diagnosing the condition of a condenser of a steam turbine / S.I. Khaet, K.E. Aronson, Yu.M. Brodov, A.G. Shempelev // Thermal Engineering. – 2003. – T. 50, № 7. – С. 594–597.

17. The concept of a comprehensive system for monitoring the state of the equipment of a power unit / K.E. Aronson, N.N. Akifeva, Yu.M. Brodov, T.F. Bogatova, B.E. Murmanskii, V.V. Kortenko // Thermal Engineering. – 2002. – T. 49, № 2. – С. 137–144.

References

1. Sakharov, A.M. *Teplovye ispytaniya parovykh turbin* [Thermal testing of steam turbines]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 238 p.

2. Olikier, I.I. *Termicheskaya deaeratsiya vody v otopitel'no-proizvodstvennykh kotel'nykh i teplovykh setyakh* [Thermal deaeration of water in heating and industrial boilers and heat networks]. Leningrad, Stroyizdat, 1972. 137 p.

3. Shempelev, A.G., Iglin, P.V. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki*, 2015, no. 4, pp. 61–64.

4. Shempelev, A.G., Sushchikh, V.M., Iglin, P.V. *Energetik*, 2015, no. 10, pp. 60–64.

5. Simoyu, L.L., Lagun, V.P., Efros, E.I., Shempelev, A.G. *Teploenergetika*, 1999, no. 8, pp. 62–67.

6. Shempelev, A.G., Efros, E.I., Parfenov, S.I., Smirnov, B.E., Verkhovskiy, I.V. *Tyazheloe mashinostroenie*, 2002, no. 4, pp. 9–12.

7. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Shempelev, A.G., Khaet, S.I. *Teploenergetika*, 2003, no. 2, pp. 67–69.

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

9. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P. *Vestnik IGEU*, 2013, issue 4, pp. 5–11.

10. Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Zimin, A.P., Razinkov, A.A. *Teploenergetika*, 2015, no. 8, pp. 72–80.

11. Ledukhovskiy, G.V., Pospelov, A.A., Astashov, N.S., Dobrov, S.V., Volkov, I.B., Komissar, G.B. *Vestnik IGEU*, 2011, issue 2, pp. 3–10.

12. Alekseev, V.V. *Elementy teorii mnozhestv i teorii grafov* [Elements of sets theory and graphs theory]. Sarov, SarFTI, 2001. 30 p.

13. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsiipy, metodologiya* [Operations research: challenges, principles, methodology]. Moscow, Drofa, 2004. 207 p.

14. Margulova, T.Kh. *Atomnye elektricheskie stantsii* [Nuclear power plants: a university study guide]. Moscow, Vysshaya shkola, 1978. 360 p.

15. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Belyakov, A.N., Ledukhovskiy, G.V. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 1, pp. 52–56.

16. Khaet, S.I., Aronson, K.E., Brodov, Yu.M., Shempelev, A.G. *Thermal Engineering*, 2003, vol. 50, no. 7, pp. 594–597.

17. Aronson, K.E., Akifeva, N.N., Brodov, Yu.M., Bogatova, T.F., Murmanskii, B.E., Kortenko, V.V. *Thermal Engineering*, 2002, vol. 49, no. 2, pp. 137–144.

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, корп. 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,

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, корп. 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

Барочкин Евгений Витальевич,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, корп. В, ауд. 408,
телефон (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru

Barochkin Evgeny Vitalyevich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering, Professor, Head of Heat Power Plants Department,
address: No. 34 Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,
tel. (4932) 26-99-31,
e-mail: admin@tes.ispu.ru