ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Дмитрий Сергеевич Федоров
ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

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

Определение поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ при разработке нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений

Авторское резюме

Состояние вопроса. При разработке нормативных энергетических характеристик оборудования тепловых электрических станций должны быть определены не только исходно-номинальные зависимости показателей тепловой экономичности от нагрузки, но и поправки к ним на отклонение значений внешних факторов от фиксированных условий. Для оборудования традиционного паросилового цикла поправки обычно принимаются по данным типовых энергетических характеристик либо рассчитываются согласно утвержденным руководящими документами методикам. Для газотурбинных установок типовые энергетические характеристики, равно как и соответствующие нормативные методики расчета поправок, отсутствуют, поэтому в практике нормирования поправки для газотурбинных установок обычно принимают по данным тепловых балансовых испытаний, а при их отсутствии – по данным завода-изготовителя, являющимся результатом приближенного расчета. Последнее приводит к ошибкам при анализе показателей тепловой экономичности эксплуатируемого оборудования. Поскольку большинство поправок применительно к газотурбинным установкам в первом приближении можно считать линейными, для их определения актуальна разработка методики, основанной на модели множественной линейной регрессии.
Материалы и методы. Для определения поправок необходимо располагать большим объемом данных эксплуатационных наблюдений, что для газотурбинных установок, как правило, обеспечивается ввиду относительно высокого уровня применяемых АСУ ТП. Апробация предложенной методики определения поправок проведена на основе фактических данных по эксплуатации газотурбинной установки SGT-800.
Результаты. Предложена методика определения поправок к показателям тепловой экономичности газотурбинных установок при разработке нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений. Проведена апробация разработанной методики применительно к газотурбинной установке, находящейся в эксплуатации.
Выводы. Разработанная методика может быть рекомендована к использованию при разработке нормативных энергетических характеристик газотурбинных установок при отсутствии результатов тепловых балансовых испытаний и типовых энергетических характеристик. Методика применима также для верификации математических моделей газотурбинных установок, основанных на энергетических характеристиках оборудования и используемых в системах оптимизации режимов работы оборудования тепловых электрических станций.

Ключевые слова: тепловая электрическая станция, газотурбинная установка, тепловая экономичность оборудования, энергетические характеристики, множественная линейная регрессия

© Федоров Д.С., Зиновьева А.С., Ледуховский Г.В., 2025
Вестник ИГЭУ, 2025, вып. 2, с. 5–11.

Dmitry Sergeevich Fedorov
Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Thermal Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

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 Ledukhovsky
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

Determination of correction data of thermal efficiency indicators of gas turbine units when developing standard energy characteristics based on operational observation data

Abstract

Background. When developing standard energy characteristics of thermal power plant equipment, both load initial-nominal characteristics of thermal efficiency indicators, and correction data of the deviation of external factor values of fixed conditions must be determined. For the equipment of traditional steam-power cycle, correction data are usually taken based on typical energy characteristics or calculated according to methods approved by governing documents. For gas turbine units, typical energy characteristics as well as corresponding standard methods to calculate correction data are absent. Therefore, practically, correction data for gas turbine units are usually taken based on thermal balance test data, and in case of their absence correction data are taken according to the manufacturer data, which is the result of an approximate calculation. The latter leads to errors during the analysis of thermal efficiency indicators of the equipment in operation. Since most of correction data applied to gas turbine units can be considered linear in the first approximation, a method based on the multiple linear regression model can be proposed for their determination.
Materials and methods. In this case, it is necessary to have a large volume of operational observation data. For gas turbine units it is usually ensured due to the relatively high level of the applied automated process control systems. The proposed method to determine the correction data has been tested on the basis of actual data on the operation of the SGT-800 gas turbine unit.
Results. The authors have proposed a method to determine the correction data of the thermal efficiency indicators of gas turbine units during the development of standard energy characteristics based on operational observations data. The developed method has been tested in relation to a gas turbine unit in operation.
Conclusions. The developed method can be recommended to develop standard energy characteristics of gas turbine units in the absence of results of thermal balance tests and typical energy characteristics. The method is also applicable for verification of mathematical models of gas turbine units based on the energy characteristics of equipment and used in systems for optimization of the operation modes of equipment at thermal power plants.

Key words: thermal power plant, gas turbine plant, thermal efficiency of equipment, energy characteristics, multiple linear regression

DOI: 10.17588/2072-2672.2025.2.005-011

Введение. Нормативными документами энергетической отрасли[1] предписан регулярный (не реже 1 раза в 5 лет) пересмотр нормативно-технической документации по топливоиспользованию (НТД по ТИ) генерирующего оборудования. Основой НТД по ТИ являются энергетические характеристики оборудования[2], представляющие собой зависимости основных и промежуточных показателей тепловой экономичности от нагрузки и разрабатываемые для определенных условий. Неотъемлемой частью энергетических характеристик оборудования являются поправки к показателям тепловой экономичности на отклонение значений внешних факторов от фиксированных условий, принятых при расчете собственно энергетических характеристик. Энергетические характеристики, а также комплект поправок к ним представляются в графическом либо графическом и аналитическом видах [1, 2].

Указанные поправки, в свою очередь, могут быть определены четырьмя способами [1]:

– *во-первых, по результатам специально организованных тепловых балансовых испытаний оборудования*; такой способ позволяет установить наиболее обоснованные значения поправок, однако сопряжен с существенными затратами материальных и трудовых ресурсов; кроме того, ряд поправок в принципе не может быть определен в ходе испытаний из-за сложно-

[1] Приказ Министерства энергетики РФ №323 «Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии»; 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] РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: разраб. СПО ОРГРЭС.

стей создания в ходе активного эксперимента тех или иных условий работы оборудования;

– *во-вторых, по данным типовых энергетических характеристик (ТЭХ)*[3], представляющих собой обобщение результатов испытаний нескольких однотипных агрегатов и имеющих статус руководящего документа; проблема состоит в том, что ТЭХ разработаны далеко не для всех типов используемых в энергетике агрегатов, а для газотурбинных установок (ГТУ) такие ТЭХ отсутствуют вовсе;

– *в-третьих, по результатам специальных расчетов*, методики проведения которых регламентированы руководящими документами[4]; как и в случае с ТЭХ, для ГТУ такие методики отсутствуют;

– *в-четвертых, по результатам экспертной оценки (обычно – термодинамического и/или теплового расчета) или данным завода-изготовителя оборудования*; в обоих случаях получаемые поправки получаются приблизительными.

Таким образом, при разработке НТД по ТИ ГТУ поправки обычно определяются последним из указанных способов и чаще принимаются по данным завода-изготовителя. Такой подход, с одной стороны, приводит к ошибкам при анализе показателей тепловой экономичности эксплуатируемого оборудования, а с другой стороны, не позволяет разработать адекватную математическую модель агрегата для прогнозирования показателей его работы и оптимизации режимов эксплуатации.

Актуальной для энергетической отрасли является задача разработки методики определения поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ при определении нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений.

Методы исследования. Первоначально при разработке нормативных энергетических характеристик оборудования должны быть установлены исходно-номинальные зависимости основных и промежуточных показателей тепловой экономичности от нагрузки. Такие характеристики разрабатываются при фиксированных условиях – числовых значениях или функциональных зависимостях внешних факторов, влияющих на экономичность оборудования. При этом связь между всеми показателями устанавливается материальным и энергетическим балансами объекта нормирования. Для ГТУ уравнения балансов имеют вид [1, 3]:

$$B_{\text{КС}} + G_{1\text{к}} - G_{2\text{т}} = 0; \quad (1)$$

$$Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}} - N = 0; \quad (2)$$

$$Q_{\text{КС}} = B_{\text{КС}}\left(h_{\text{топл}} + Q_{\text{н}}^{\text{р}}\right); \quad (3)$$

$$Q_{1\text{к}} = G_{1\text{к}} h_{1\text{к}}; \quad (4)$$

$$Q_{2\text{т}} = G_{2\text{т}} h_{2\text{т}}, \quad (5)$$

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 соответственно, кг/с; $Q_{\text{КС}}$ – тепловая мощность, подведенная к камере сгорания, МВт; $Q_{1\text{к}}$ – тепловая мощность, подведенная с потоком воздуха к компрессору ГТУ, МВт; $Q_{2\text{т}}$ – тепловая мощность потока продуктов сгорания на выходе из ГТУ, МВт; Q_5 – мощность тепловых потерь от наружного охлаждения элементов ГТУ, МВт; $Q_{\text{эм}}$ – мощность электромеханических потерь ГТУ, МВт; N – электрическая мощность ГТУ, МВт; $h_{\text{топл}}$, $h_{1\text{к}}$, $h_{2\text{т}}$ – энтальпия топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, воздуха на входе в компрессор, продуктов сгорания за турбиной соответственно, МДж/кг; $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$ – низшая удельная теплота сгорания на рабочую массу топлива, поступающего в камеру сгорания ГТУ, МДж/кг.

КПД брутто ГТУ [1, 4] составляет:

– по прямому балансу

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(пр)}} = \frac{100 \cdot N}{Q_{\text{КС}}}; \quad (6)$$

– по обратному балансу

$$\eta_{\text{ГТУ}}^{\text{бр(обр)}} = \frac{100 \cdot \left(Q_{\text{КС}} + Q_{1\text{к}} - Q_{2\text{т}} - Q_5 - Q_{\text{эм}}\right)}{Q_{\text{КС}}}, \quad (7)$$

где $\eta^{\text{бр(пр)}}_{\text{ГТУ}}$ и $\eta^{\text{бр(обр)}}_{\text{ГТУ}}$ – КПД брутто ГТУ по прямому и обратному балансам соответственно, %.

Комплект энергетических характеристик оборудования, включая поправки к основным и промежуточным показателям тепловой экономичности, по сути представляет собой математическую модель объекта, позволяющую определять показатели его работы во всех режимах, не выходящих за регулировочные диапазоны изменения контролируемых в ходе эксплуатации параметров. Общий порядок расчета показателя тепловой экономичности Π_i в заданном режиме может быть формализован следующим образом:

$$\Pi_i = \Pi_i^{(\text{ин})} + \sum_{j=1}^{m} \Delta\Pi_{i,j}, \quad (8)$$

где $\Pi_i^{(\text{ин})}$ – исходно-номинальное значение рассматриваемого показателя, определяемое при текущей нагрузке по энергетическим характеристикам (т. е. при фиксированных условиях построения энергетических характеристик); $\Delta\Pi_{i,j}$ – поправка к рассматриваемому показателю, учитывающая его отклонение при изменении j-го влияющего фактора Φ_j от фиксированного значения $\Phi_j^{(\text{ин})}$, при-

[3] РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: разраб. СПО ОРГРЭС.

[4] МТ 34-70-027-86. Методика расчета поправок к мощности, расходу свежего пара и удельному расходу теплоты на отклонение параметров и условий от номинальных для турбоагрегатов с регулируемыми отборами пара: разраб. СПО Союзтехэнерго, с изм. № 1: разраб. СПО ОРГРЭС; Методические указания по расчету поправок к расходу тепла турбоагрегатами: разраб. СПО Союзтехэнерго.

нятого при разработке энергетической характеристики, до значения $\Phi_j^{(р)}$, соответствующего рассматриваемому режиму работы установки; m – количество факторов, влияние которых учитывается при определении показателя Π_i.

Поправки $\Delta\Pi_{i,j}$ в общем случае могут быть линейными или нелинейными. Для паротурбинных установок состав поправок и порядок их расчета регламентированы нормативными документами[5]. Для ГТУ состав поправок, т. е. перечень влияющих факторов Φ_i, обычно определен заводом-изготовителем, однако методики обоснованного определения поправок отсутствуют. При этом для ГТУ большинство поправок $\Delta\Pi_{i,j}$ в первом приближении можно считать линейными:

$$\Delta\Pi_{i,j} = K_{i,j}\left(\Phi_j^{(р)} - \Phi_j^{(ин)}\right), \quad (9)$$

где $K_{i,j}$ – числовой коэффициент, учитывающий отклонение i-го показателя при изменении j-го влияющего фактора.

При такой постановке задачи для известных $\Pi_i^{(ин)}$ (и, соответственно, фиксированных $\Phi_j^{(ин)}$) задача определения коэффициентов $K_{i,j}$ по данным эксплуатационных наблюдений может быть сведена к задаче минимизации отклонения $(\Pi_i - \Pi_i^{(ф)})$, где $\Pi_i^{(ф)}$ – фактическое значение показателя, с использованием модели множественной линейной регрессии [5–8]. При этом известные поправки $\Delta\Pi_{i,j}$, например поправка на отработанный ресурс, которая не является линейной и определяется специальными методами, должны быть также учтены.

Результаты исследования. Рассмотрим результаты апробации предложенной методики определения поправок применительно к ГТУ типа SGT-800. В качестве исходных данных для расчетов приняты массивы осредненных на восьмичасовых интервалах значений контролируемых в ходе эксплуатации и хранящихся в АСУ ТП параметров за один год работы установки. В целом рассмотрено 536 режимов работы ГТУ. Отметим, что исходные данные предварительно подвергнуты процедуре сведения материального и энергетического балансов с использованием ранее разработанной методики [9, 10].

В таблице сведены полученные значения коэффициентов $K_{i,j}$, учитывающих влияние факторов Φ_j на параметры Π_i, в качестве которых указаны $Q_{КС}$, $Q_{2т}$, $G_{2т}$, а также коэффициент избытка воздуха в продуктах сгорания за турбиной $\alpha_{2т}$ и температура продуктов сгорания за турбиной $t_{2т}$.

На рис. 1, в зависимости от электрической мощности N, приведены фактические значения $\Pi_i^{(ф)}$ ряда параметров и значения этих параметров $\Pi_{i,p}^{(ин)}$, вычисленные из (8) с учетом полученных значений поправок:

$$\Pi_{i,p}^{(ин)} = \Pi_i^{(ф)} - \sum_{j=1}^{m}\Delta\Pi_{i,j}\,. \quad (10)$$

Результаты расчета коэффициентов $K_{i,j}$ для ГТУ типа SGT-800

Фактор Φ_j, единица измерения	Исходно-номинальное значение фактора $\Phi_j^{(ин)}$	Значения коэффициента $K_{i,j}$, учитывающего влияние фактора Φ_j на параметр Π_i				
		параметры Π_i				
		$\alpha_{2т}$	$t_{2т}$	$G_{2т}$	$Q_{КС}$	$Q_{2т}$
Температура воздуха перед компрессором $t_{1к}$, °С	15,5	$2{,}34\cdot10^{-4}$	$5{,}78\cdot10^{-2}$	$2{,}26\cdot10^{-2}$	$3{,}48\cdot10^{-3}$	$4{,}55\cdot10^{-2}$
Относительная влажность воздуха $\varphi_{нв}$, %	60	$-4{,}68\cdot10^{-4}$	$-5{,}53\cdot10^{-3}$	$-2{,}13\cdot10^{-2}$	$-3{,}45\cdot10^{-5}$	$2{,}39\cdot10^{-3}$
Приведенная высота над уровнем моря $H_{ур}^{прив}$, м*	0	$-4{,}52\cdot10^{-5}$	$-3{,}73\cdot10^{-3}$	$-4{,}05\cdot10^{-3}$	$-2{,}00\cdot10^{-3}$	$1{,}74\cdot10^{-3}$
Перепад давлений на всасе компрессора $\Delta P_{1к}$, кПа	$\Delta P_{1к}^{(ин)} = f(N)$	$4{,}62\cdot10^{-2}$	–4,149	3,444	1,753	1,514
Перепад давлений на выхлопе турбины $\Delta P_{2т}$, кПа	$\Delta P_{2т}^{(ин)} = f(N)$	$7{,}77\cdot10^{-2}$	–4,785	5,195	1,541	1,674
Коэффициент мощности турбогенератора cos(φ), ед.	0,99	–	–	–	$-1{,}38\cdot10^{-1}$	–1,237
Отработанный ресурс $\tau_{рес}$, тыс. ч	70,8	–	$-1{,}39\cdot10^{-1}$	$-3{,}44\cdot10^{-2}$	$f(\tau_{рес})$**	$-2{,}09\cdot10^{-2}$

Примечания: * через приведенную высоту над уровнем моря, в соответствии с подходом, использованным заводом-изготовителем ГТУ, учитывается влияние атмосферного давления; ** поправка на отработанный ресурс к $Q_{КС}$ не является линейной, определена по методике завода-изготовителя.

[5] Приказ Министерства энергетики РФ №323 «Об утверждении порядка определения нормативов удельного расхода топлива при производстве электрической и тепловой энергии»; 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»; РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций: разраб. СПО ОРГРЭС; МТ 34-70-027-86. Методика расчета поправок к мощности, расходу свежего пара и удельному расходу теплоты на отклонение параметров и условий от номинальных для турбоагрегатов с регулируемыми отборами пара: разраб. СПО Союзтехэнерго, с изм. № 1: разраб. СПО ОРГРЭС; Методические указания по расчету поправок к расходу тепла турбоагрегатами: разраб. СПО Союзтехэнерго.

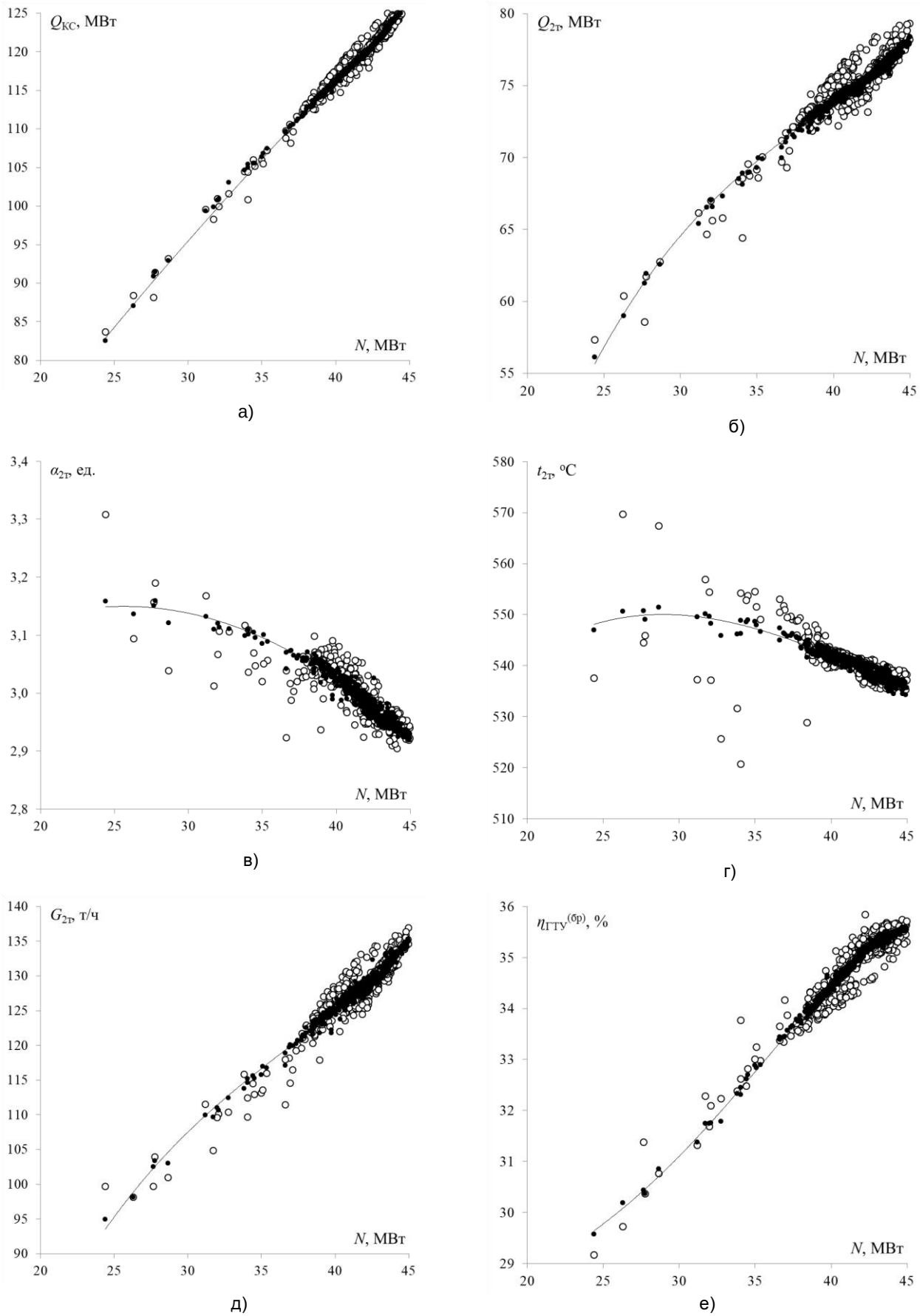

Рис. 1. Графическая интерпретация точности найденных значений поправок к основным и промежуточным показателям тепловой экономичности ГТУ: незакрашенные точки – значения $П_i^{(ф)}$; закрашенные точки – значения $П_{i,p}^{(ин)}$; линии – зависимости $П_i^{(ин)} = f(N)$ (обозначения параметров приведены в тексте)

При этом очевидно, что в случае удовлетворительной точности найденных поправок значения $П_{i,p}^{(ин)}$ должны быть близки к соответствующей исходно-номинальной зависимости, т. е. к $П_i^{(ин)}$.

На рис. 1,е все представленные значения КПД соответствуют расчету по прямому балансу (6).

В качестве интегральной оценки точности полученного комплекса энергетических характеристик и поправок к основным и промежуточным показателям тепловой экономичности может рассматриваться отклонение значений КПД брутто ГТУ, рассчитанных по прямому (6) и обратному (7) балансам. Такие же расчеты выполнены для каждого из рассмотренных режимов (рис. 2).

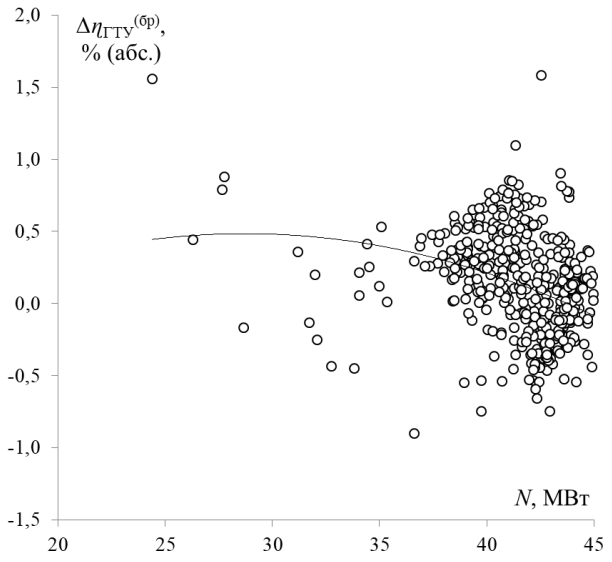

Рис. 2. Отклонение $\Delta\eta_{ГТУ}^{(бр)}$ значений КПД брутто ГТУ, рассчитанных по прямому и обратному балансам с использованием данных энергетических характеристик при условиях фактических режимов: точки – результаты расчетов; линия – аппроксимация

Выводы. Полученные результаты позволяют констатировать, что предложенная методика определения поправок к показателям тепловой экономичности ГТУ при разработке нормативных энергетических характеристик по данным эксплуатационных наблюдений позволяет получить приемлемые результаты. Точность математической модели ГТУ, включающей исходно-номинальные зависимости показателей работы оборудования от нагрузки и комплект поправок к ним на отклонение значений внешних факторов от фиксированных условий, в рассмотренном примере (рис. 2) характеризуется математическим ожиданием разницы значений КПД брутто ГТУ, рассчитанных по прямому и обратному балансам, на уровне 0,09 % со среднеквадратическим отклонением 0,36 %.

Математическая модель с такими характеристиками точности может использоваться при нормировании показателей тепловой экономичности оборудования, а также для верификации математических моделей, основанных на энергетических характеристиках оборудования и используемых в системах оптимизации режимов работы оборудования тепловых электрических станций. Однако при планировании режимов работы генерирующих установок, в том числе на оптовом рынке электроэнергии и мощности, точность используемой математической модели существенно влияет на итоговый результат – маржинальную прибыль [11, 12]. В связи с этим в рамках дальнейших исследований предполагается развить предложенную методику путем учета возможного нелинейного характера поправок.

Список литературы

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

2. **Урин В.Д., Кутлер П.П.** Энергетические характеристики для оптимизации режимов электростанций и энергосистем. – М.: Энергия, 1974. – 136 с.

3. **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.

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

5. **Корн Г.** Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1973. – 832 с.

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

7. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 1: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 366 с.

8. **Дрейпер Н., Смит Г.** Прикладной регрессионный анализ. В 2 кн. Кн. 2: пер. с англ. – М.: Финансы и статистика, 1986. – 352 с.

9. **Алгоритмы** сведения материальных и энергетических балансов при расчетах технико-экономических показателей оборудования ТЭС на основе метода регуляризации некорректны задач / Г.В. Ледуховский, В.П. Жуков, Е.В. Барочкин и др. // Теплоэнергетика. – 2015. – № 8. – С. 72–80. DOI: 10.1134/S0040363615080032.

10. **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.

11. **Optimal** generation and transmission of energy in heat and electric networks / V.P. Zhukov, E.V. Barochkin, D.A. Ulanov, et al. // Thermal Engineering. – 2011. – Vol. 58, No. 8. – С. 629–633.

12. **Arakelyan E.K., Minasyan S.A., Agababyan G.E.** Methodical principles of multicriterial optimization of daily operating conditions of power equipment at thermal power stations // Thermal Engineering. – 2006. – Vol. 53, No. 10. – С. 767–771.

References

1. Ledukhovskiy, 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.

2. Urin, V.D., Kutler, P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhimov elektrostantsiy i energosistem* [Energy characteristics for optimizing the regimes of power plants and power systems]. Moscow: Energiya, 1974. 136 p.

3. 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.

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

5. Korn, G. *Spravochnik po matematike* [Handbook of Mathematics]. Moscow: Nauka, 1973. 832 p.

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

7. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz. V 2 kn., kn. 1* [Applied Regression Analysis. In 2 books, book 1]. Moscow: Finansy i statistika, 1986. 366 p.

8. Dreyper, N., Smit, G. *Prikladnoy regressionnyy analiz.* V 2 kn., kn. 2 [Applied Regression Analysis. In 2 books, book 2]. Moscow: Finansy i statistika, 1986. 352 p.

9. Ledukhovskiy, 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.

10. Zinov'eva, A.S., Gorshenin, S.D., Ledukhovskiy, G.V., Zhukov, V.P. *Vestnik IGEU*, 2023, issue 1, pp. 5–10.

11. Zhukov, V.P., Barochkin, E.V., Ulanov, D.A., Ledukhovskiy, G.V., Zubanov, A.A. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, no. 8, pp. 629–633.

12. Arakelyan, E.K., Minasyan, S.A., Agababyan, G.E. *Thermal Engineering*, 2006, vol. 53, no. 10, pp. 767–771.