

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.22

Борис Леонидович Шельгин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Сергей Алексеевич Панков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Григорий Васильевич Ледуховский

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Разработка упрощенной математической модели котла-утилизатора П-88 для режимов работы при нагрузках, близких к номинальной

Авторское резюме

Состояние вопроса. Для конструктивного совершенствования элементов парогазовых установок, их структурной и режимной оптимизации требуются математические модели, отражающие показатели энергетической эффективности оборудования при изменении условий эксплуатации. По котлам-утилизаторам моделирование традиционно осуществляется с применением специализированных программных комплексов, в которых реализуются подмодели теплогидравлических расчетов элементов водопарового и газового трактов котла. Такой подход затрудняет решение практических задач, поскольку требует лицензионного программного обеспечения и соответствующей квалификации расчетчика. Актуальным направлением решения проблемы является статистическая обработка результатов расчетов, полученных с применением специализированных программных комплексов, и разработка на этой основе упрощенной математической модели в виде регрессионных зависимостей показателей работы котла от варьируемых параметров. В рамках настоящего исследования задача решается применительно к котлу П-88 энергоблока ПГУ-325 в диапазоне нагрузок, близких к номинальной.

Методы и материалы. Исходная математическая модель разрабатывается с применением программного комплекса «ТРАКТ», предназначенного для проведения поверочных и конструкторских расчетов котлов. Упрощенная математическая модель базируется на методах регрессионного анализа статистических данных. Точность модели оценена на основе эксплуатационных данных по энергоблоку ПГУ-325.

Результаты. Разработана математическая модель котла-утилизатора П-88, позволяющая без привлечения специализированных программных средств для расчета котельного оборудования определять основные показатели работы котла при изменении электрической мощности газовой турбины и температуры наружного воздуха при нагрузках, близких к номинальной.

Выводы. Точность исходной математической модели, реализованной в программном комплексе «ТРАКТ», характеризуется отклонением результатов расчетов от эксплуатационных данных в соответствующих режимах не более 2 %. Дополнительная неопределенность, вносимая в результаты расчетов при переходе от исходной к упрощенной математической модели, не превосходит 1,5 %. Полученное математическое описание позволит решать задачи режимной оптимизации и оценки эффективности котла-утилизатора и энергоблока в целом при изменении условий эксплуатации.

Ключевые слова: парогазовая установка, котел-утилизатор, газотурбинная установка, математическая модель, теплогидравлический расчет котла

Boris Leonidovich Shelygin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Sergey Alekseevich Pankov

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-31, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Grigorii Vasilievich Ledukhovskiy

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Head of Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-34, e-mail: admin@tes.ispu.ru

Development of simplified mathematical model of P-88 recovery boiler for operating modes at loads near the nominal

Abstract

Background. To improve the design of the elements of combined-cycle plants, and their structural and mode optimization, mathematical models are required. These models show energy efficiency indicators of the equipment under changing operating conditions. Modeling of recovery boilers is traditionally carried out with the application of specialized software systems that implement submodels of thermal-hydraulic calculations of the elements of the boiler water-steam and gas paths. This approach makes it difficult to solve practical tasks, since it requires licensed software and appropriate qualifications of an engineer. The current direction of solving this problem is statistical processing of the results of calculation data obtained with the application of specialized software systems, and development of a simplified mathematical model in the form of regression dependencies of boiler performance on variable parameters. In this study, the problem is solved in relation to the P-88 boiler of the combined-cycle plant-325 power unit in the load range near the nominal one.

Materials and methods. The initial mathematical model is developed with the application of the software package "TRAKT" designed for verification and engineering design of boilers. The simplified mathematical model is based on the methods of regression analysis of statistical data. The accuracy of the model is estimated based on the operational data of the combined-cycle plant -325 power unit.

Results. The authors have developed the mathematical model of the P-88 recovery boiler, which allows to determine the main performance indicators of the boiler when the electric power of the gas turbine and the outdoor air temperature are changing at the loads near the nominal value. The performance indicators are determined without application of specialized software for design calculation of the boiler.

Conclusions. The accuracy of the initial mathematical model implemented in the software package "TRAKT" is characterized by deviation of the calculation results data from the operational data in the corresponding modes of no more than 2 %. The additional uncertainty value introduced into the calculation results data does not exceed 1,5 % when we transfer from the initial mathematical model to the simplified one. The resulting mathematical description will allow solving the problems of mode optimization and evaluating the efficiency of the recovery boiler and the power unit under changing operating conditions.

Key words: combined-cycle plant, recovery boiler, gas turbine plant, mathematical model, thermal hydraulic calculation of the boiler

DOI: 10.17588/2072-2672.2021.1.005-013

Введение. На современном этапе развития энергетической отрасли России задача повышения эффективности генерирующего оборудования решается, в частности, за счет использования парогазовых установок (ПГУ), в состав которых входят: газотурбинная установка (ГТУ), паротурбинная установка (ПТУ) и котел-утилизатор (КУ). Установлено, что применение парогазовых установок позволяет уменьшить удельные расходы топлива на отпуск электроэнергии с шин ТЭС на 25–30 % по сравнению с наиболее совершенными паротурбинными энергоблоками [1].

Собственно ПГУ также имеют существенный потенциал повышения энергетической эффективности, который может быть реализован при конструктивном совершенствовании элементов, а также путем выбора рациональных режимов работы оборудования [2–4]. При этом в подавляющем большинстве случаев для решения указанных задач требуется располагать математической моделью, адекватно отражающей показатели работы оборудования в тех или иных условиях. Математические модели элементов ПГУ для обеспечения требуемой точности результатов расчета должны учитывать конструктивные, схемные и режимные особенности каждого конкретного агрегата. Поэтому для каждого отдельного случая необходима разработка индивидуальных математических моделей, которые не могут быть распространены на оборудование других типов или условий эксплуатации.

В частности, для расчетной оценки эффективности ПГУ-325 требуется математическая модель одного из ее элементов – КУ марки П-88. Учитывая неодинаковость принципов управления ПГУ при различных уровнях нагрузки, а также соответствующие этому отличия в алгоритмах регулирования параметров оборудованием энергоблока, математическая модель котла-утилизатора представляется в виде комбинации моделей, описывающих работу котла в характерных диапазонах изменения нагрузки. На данном этапе исследований рассматриваются нагрузки ПГУ, близкие к номинальной.

Методы исследования. Моделирование и расчет котельного оборудования в настоящее время проводится с применением специализированного программного обеспечения, позволяющего реализовать

многофакторные модели гидродинамических и тепловых процессов в поверхностях нагрева, воздушном и газовом трактах котлов [5–7]. В данном случае для решения поставленной задачи разработки математической модели КУ П-88 при нагрузках, близких к номинальной, используется программный комплекс (ПК) «ТРАКТ» [8], разработанный в строгом соответствии с нормативным методом теплового расчета котлов [9].

Как и при использовании других программных средств моделирования котельного оборудования, при использовании ПК «ТРАКТ» модель котельного агрегата генерируется в результате синтеза из подмоделей отдельных элементов водопаровых трактов, участков газового и воздушного трактов.

Газовый тракт КУ П-88 (рис. 1) состоит из 17 элементов, начинается с элемента «Вх.1» (NE=1) и заканчивается элементом «Вых.2» (NE=15). Узел ввода воздуха «Возд.» (NE=2) является сопряженным с последним элементом воздушного тракта «Вых.8» (NE=304). Узел « $-Q_{\text{ком}}$ » (NE=4) сопряжен с элементом подвода теплоты к потоку воздуха в осевом компрессоре (ОК) ГТУ « $+Q_{\text{ком}}$ » в воздушном тракте (NE=303). Узел « $-Q_{\text{гт}}$ » (NE=5) предусматривает отвод от продуктов сгорания количества тепловой энергии, соответствующей электрической мощности ГТУ.

Воздушный тракт КУ П-88 (рис. 1) состоит из четырех элементов. Предварительно нагретый в элементе «Воз-д» (NE=302) воздух поступает в элемент « $+Q_{\text{ком}}$ », в который передается количество теплоты от элемента газового тракта « $-Q_{\text{ком}}$ » (NE=4) при сжатии воздуха в осевом компрессоре ГТУ. Поток воздуха из элемента «Вых.8» (NE=304) направляется в элемент газового тракта «Возд.» (NE=2).

КУ П-88 включает два водопаровых тракта: высокого и низкого давлений (ВД и НД) (рис. 2). Тракт ВД начинается с элемента «Вх.3» (NE=101) и заканчивается элементом «Вых.4» (NE=113). Тракт НД начинается с элемента «Вх.5» (NE=201) и заканчивается элементом «Вых.6» (NE=209).

Конструкция КУ П-88 предусматривает один пакет газового подогревателя конденсата (общий для трактов ВД и НД). В расчетной схеме он разделен в соответствующих трактах на два пакета: «ГПК. ВД» (NE=103) и «ГПК. НД» (NE=203).

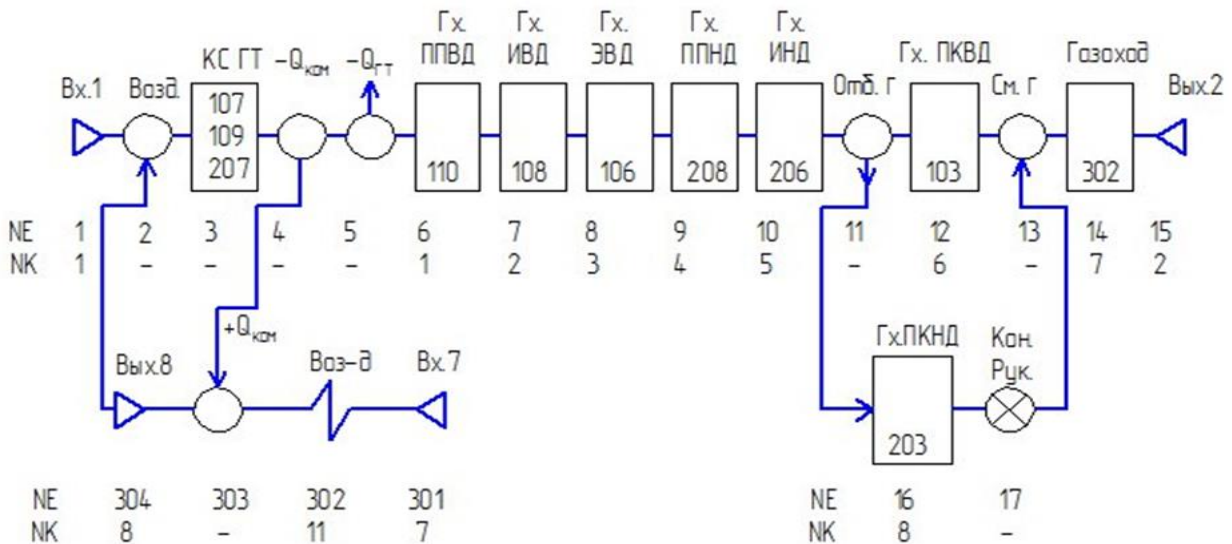


Рис. 1. Расчетная схема газового и воздушного трактов КУ П-88

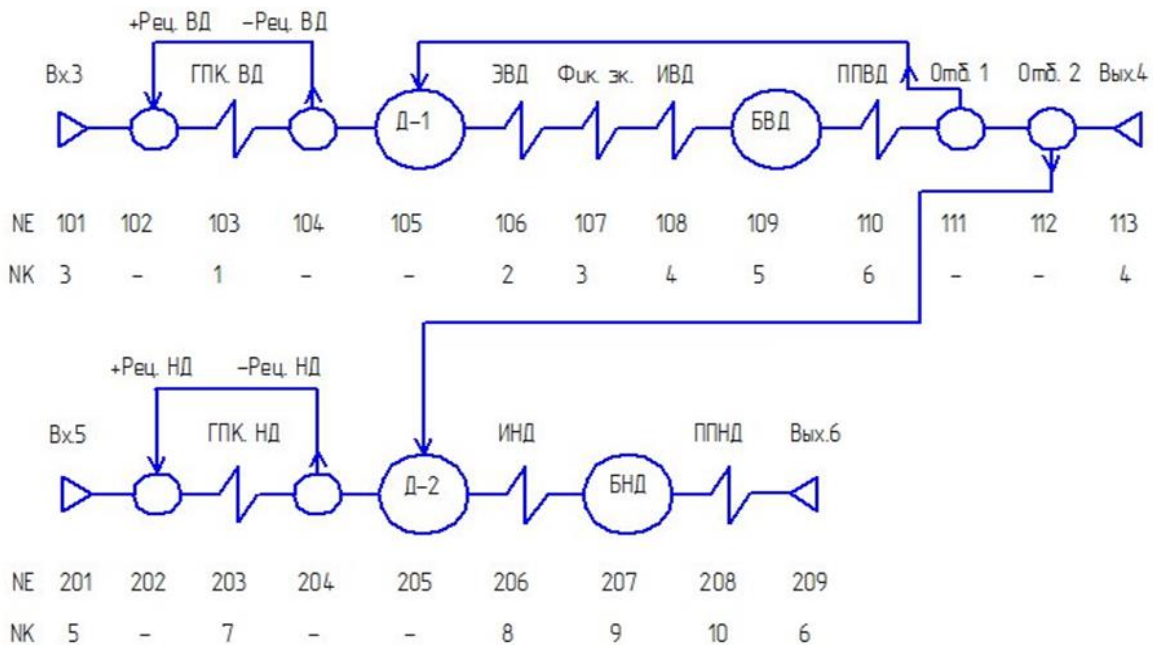


Рис. 2. Расчетные схемы водопаровых трактов высокого и низкого давлений КУ П-88

В тракте ВД питательная вода нагревается в элементе «ЭВД» (NE=106) и проходит условно считающиеся испарительными поверхностями фиктивные экраны «Фик. эк.» (NE=107) камеры сгорания (КС) газовой турбины (ГТ) (NE=3). В элементах рабочих трактов «ИВД» (NE=108) и «ИНД» (NE=206) среда при паросодержании выше 0,9 кг/кг превращается в насыщенный пар. Барабаны котла «БВД» (NE=109) и «БНД» (NE=207) условно считаются заключительными парогенерирующими поверхностями нагрева.

В каждом тракте в элементах «ППВД» (NE=110) и «ППНД» (NE=208) осуществляется нагрев пара до темпера-

тур, зависящих от теплосодержания уходящих из ГТУ газов.

Отладка полученной таким образом математической модели проводилась при проектных значениях электрической мощности ГТУ типа ГТЭ-110 ($N_g = 110$ МВт) и температуре наружного воздуха $t_n = 15$ °С.

В качестве топлива принят природный газ с теплотой сгорания $Q_n^c = 8539$ ккал/м³, плотностью топлива $\rho_f = 0,725$ кг/м³ при значениях теоретических объемов воздуха и газов, равных соответственно $V^o = 9,48$ м³/м³ и $V_r^o = 10,65$ м³/м³ [9]. Предварительно были приняты кратность повышения давления воздуха в ОК ГТУ $\pi = 13,5$, КПД ОК $\eta_k = 0,84$, КПД ГТУ $\eta_{гту} = 0,347$.

Значения коэффициента избытка воздуха за камерой сгорания ГТУ $\alpha''_{\text{КС}} = 3,05$ недопустимы ввиду снижения надежности элементов ее проточной части. Одновременно возрастает температура газов на входе в КУ до 580–590 °С, что нежелательно по условию окисления при перегреве ребер труб пароперегревателя высокого давления (ППВД).

При значениях $\alpha''_{\text{КС}}$ более 3,1 снижается температура пара ППВД (менее 440 °С), что ухудшает экономичность цикла ГТУ и повышает вероятность эрозионного износа элементов проточной части цилиндра низкого давления паровой турбины (ПТ) К-110-6,5 за счет повышения конечной влажности в процессе расширения пара в турбине.

С учетом сделанных замечаний предварительно величина $\alpha''_{\text{КС}}$ принята равной 3,07.

Ниже определены исходные данные применительно к проектным условиям работы ГТУ типа ГТЭ-110:

- тепловая мощность продуктов сгорания в ПТ, расходуемая на привод электрогенератора ГТУ,

$$Q_{\text{ген}} = 243,5 \cdot N_3 = 243,5 \cdot 110 = 26785 \text{ ккал/с};$$

- температура воздуха за ОК ГТУ

$$T''_{\text{к}} = T_{\text{н}} [1 + (\pi^{0,27} - 1)/\eta_{\text{к}}] = 288 [1 + (13,5^{0,27} - 1)/0,84] = 638 \text{ К}$$

(или $t''_{\text{к}} = 365 \text{ °С}$);

- расход топлива в КС одной ГТУ

$$B_{\text{т}} = 0,028 N_3 / \eta_{\text{ГТУ}} = 0,028 \cdot 110 / 0,3473 = 8,869 \text{ нм}^3/\text{с};$$

- часовой расход топлива в КС ГТУ

$$B_{\text{час}} = 3600 \cdot B_{\text{т}} = 3600 \cdot 8,869 = 31,93 \cdot 10^3 \text{ нм}^3/\text{ч};$$

- расход воздуха в ГТУ

$$G_{\text{в}} = 12,23 \cdot \alpha''_{\text{ГТУ}} \cdot B_{\text{т}} = 12,23 \cdot 3,07 \cdot 8,869 = 335 \text{ кг/с};$$

- тепловая мощность, отбираемая в ГТУ на нагрев воздуха при его сжатии в ОК ГТУ,

$$Q_{\text{к}} = c_{\text{в}} \cdot G_{\text{в}} (t''_{\text{к}} - t_{\text{н}}) = 0,24 \cdot 335 \cdot (365 - 15) = 28154 \text{ ккал/с}.$$

Требуемые для расчета котла-утилизатора показатели экономичности ГТУ определены ранее [10]. В частности, КПД брутто ГТУ (рис. 3) может быть представлен в виде зависимости от электрической мощности N_3 и температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$:

$$\eta_{\text{ГТУ}} = [0,346 - 11,3 \cdot 10^{-6} (t_{\text{н}} + 30)^{1,9}] + [0,00161 - 0,025 \cdot 10^{-6} (t_{\text{н}} + 30)^{2,3}] (N_3 - 88)^{0,78}.$$

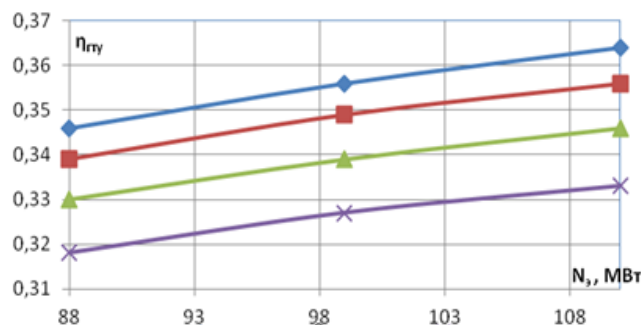


Рис. 3. Зависимость КПД ГТЭ-110 от электрической мощности и температуры наружного воздуха: ◆ – –30 °С; ■ – 0 °С; ▲ – 15 °С; × – –30 °С

Применительно к природному газу расход топлива в КС ГТЭ-110, $\text{нм}^3/\text{с}$, составляет:

$$B_{\text{сек}} = 0,028 \cdot N_3 / \eta_{\text{ГТУ}}.$$

Часовой расход топлива в КС ГТЭ-110, $\text{нм}^3/\text{ч}$, рассчитывается как:

$$B_{\text{час}} = 3600 \cdot B_{\text{сек}}.$$

Согласно результатам предварительных расчетов, искомая зависимость $B_{\text{т}}$ от N_3 и $t_{\text{н}}$ в рассматриваемом диапазоне N_3 от 88 до 110 МВт и температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$ на показатели работы энергоустановки и, в частности, котла-утилизатора.

$$B_{\text{час}} = [25637 + 0,603 (t_{\text{н}} + 30)^2] + [199,81 + 0,0031 (t_{\text{н}} + 30)^{2,02}] \cdot (N_3 - 88)^{1,03}.$$

С учетом полученных таким образом исходных данных при использовании разработанной в ПК «ТРАКТ» математической модели проведена серия численных экспериментов для анализа влияния электрической мощности N_3 ГТУ в диапазоне от 88 до 110 МВт и температуры наружного воздуха $t_{\text{н}}$ на показатели работы энергоустановки и, в частности, котла-утилизатора.

Результаты исследования. Результаты численных экспериментов приведены в табл. 1, а также на рис. 4.

Кроме введенных ранее обозначений, в табл. 1 и на рис. 4 применены следующие: $D_{\text{пв}}$, $D_{\text{вд}}$, $D_{\text{дн}}$ – расходы питательной воды, пара контура высокого давления, пара контура низкого давления соответственно; $G_{\text{г}}$ – расход газов за ГТУ; $\vartheta'_{\text{пт}}$, $\vartheta'_{\text{ку}}$, $\vartheta_{\text{ух}}$ – температура газов на входе в ПТ, на входе в КУ и на выходе из КУ (уходящих газов) соответственно; $t'_{\text{вд}}$, $t'_{\text{дн}}$ – температура пара контура высокого давления и контура низкого давления соответственно; $t_{\text{к}}$ – температура воздуха на выходе из компрессора ГТУ.

Таблица 1. Результаты расчета показателей работы ГТУ ГТЭ-110 и КУ П-88

$t_{нар}$	-30°C			0°C			15°C			30°C		
$N_э$, МВт	88	99	110	88	99	110	88	99	110	88	99	110
$\eta_{ГТУ}$	0,346	0,356	0,364	0,339	0,349	0,356	0,331	0,339	0,346	0,318	0,327	0,333
$B_{час}$ 10^{-3} , нм ³ /ч	25637	27999	30460	26243	28607	31136	26718	29379	32006	27808	30469	33242
$\alpha''_{кв}$	3,03	2,9	2,83	3,19	3,06	3,0	3,29	3,14	3,08	3,32	3,19	3,13
$D_{пв}$, т/ч	116,1	130,0	136,2	130,9	141,0	148,7	135,5	150,7	160,5	149,5	163,9	172,6
$D_{вд}$, т/ч	114,83	128,81	134,93	129,71	139,81	147,43	134,31	149,51	159,24	148,31	162,71	171,34
$D_{нд}$, т/ч	31,1	32,5	34,5	34,5	32,5	36,56	37,8	37,1	39,239	39	38,5	43,83
G_r , кг/с	219,87	225,07	239,22	231,38	242,27	258,69	242,72	255,1	272,77	256,74	274,78	297,54
$\vartheta'_{кв}$, °C	489	501	506	496	511	513	501	516	521	505	520	523
$t_{вд}$, °C	444	467	485	453	478	489	461	485	492	465	490	494
$t_{нд}$, °C	207	210	220	218	215	225	208	203	218	229	225	236
t_k , °C	261	274	286	308	326	333	341	354	355	358	368	370
$\vartheta_{ух}$, °C	104	102	102	103	105	105	103	102	103	103	103	104
Q_k , ккал/с	19053	20800	23000	21843	20580	24184	25184	26680	28554	27300	28700	30315
$Q_{ген}$, ккал/с	21428	24107	26785	21428	24107	26785	21428	24107	26785	21428	24107	26785
$\vartheta'_{гт}$, °C	1059	1085	1096	1060	1086	1099	1061	1090	1100	1062	1092	1103

Выводы. Анализ полученных данных показывает, что при повышении нагрузки ГТУ от 88 до 110 МВт и значении расчетной температуры $t_n = 15^\circ\text{C}$ с увеличением расхода топлива в КС расход газов повышается с 242,72 до 272,77 кг/с. Температура газов на входе в КУ увеличивается с 501 до 521 °C. Температура в контуре низкого давления возрастает с 208 до 218 °C, а в контуре высокого давления – с 461 до 492 °C. Температура воздуха за компрессором ГТУ получена в диапазоне от 260 до 370 °C.

При номинальной нагрузке 110 МВт и снижении температуры наружного воздуха с 15 до (-30)°C происходит снижение расхода газов в КУ с 272,77 до 239,22 кг/с, снижается температура пара контуров высокого и низкого давлений соответственно с 492 до 485 °C и с 229 до 220 °C. Это объясняется изменением расхода уходящих газов и температурных напоров в газоходах поверхностей нагрева контуров высокого и низкого давлений котла.

Полученные данные вполне согласуются с эксплуатационными показателями работы энергоблоков ПГУ-325 в условиях «Ивановских ПГУ»: отклонение результатов расчета от экспериментальных значений показателей [5] в соответствующих режимах не превышает 2 %. Это позволяет рекомендовать разработанную математическую модель при решении задач режимной оптимизации.

На практике использование модели в разработанном виде неудобно, так как, во-первых, специализированные ПК, в том числе и ПК «ТРАКТ», являются лицензионными и не всегда доступны персоналу энергообъектов и наладочных организаций; во-вторых, для работы с такими ПК требуется обладать определенными опытом и квалификацией. Поэтому в целях обеспечения возможности использования результатов моделирования для решения практических задач в рамках настоящего исследования выполнена разработка обобщающих зависимостей, описывающих основные показатели работы энергоустановки и, в частности, КУ П-88 при нагрузках, близких к номинальной. Для этого использован подход и методы регрессионного анализа данных [11].

Для каждой из характеристик Y математическое описание представлено в виде обобщающей зависимости вида

$$Y = A + B(N_э - 88)^n, \quad (1)$$

где

$$A = C + D(t_n + 30)^m;$$

$$B = E + F(t_n + 30)^b.$$

В табл. 2 представлены значения коэффициентов (C , D , E , F) и показателей степени (n , m , b), полученные в ходе обработки данных.

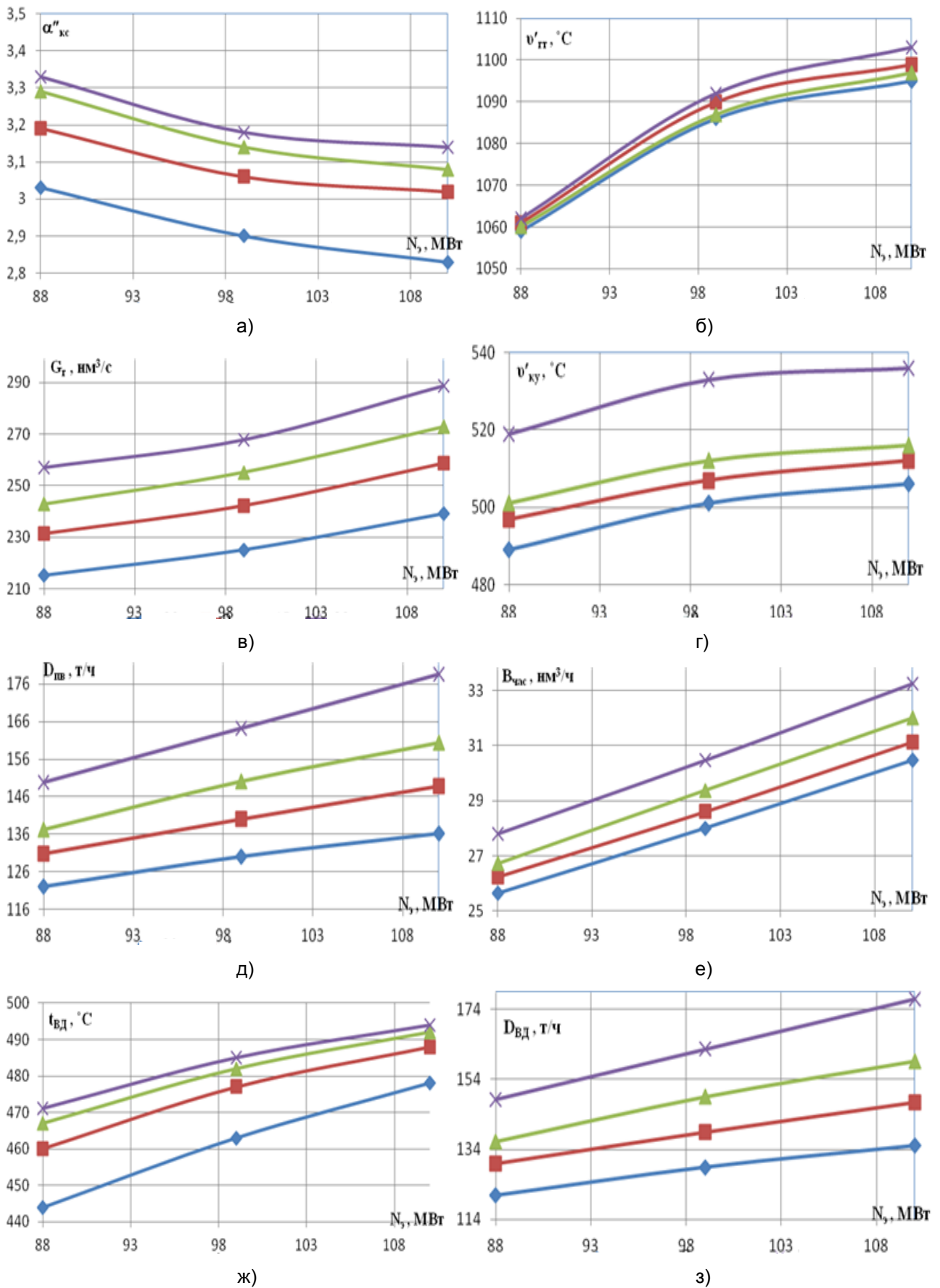


Рис. 4. Зависимости основных показателей работы энергоустановки от температуры наружного воздуха t_n в диапазоне электрической мощности N_e ГТУ от 88 до 110 МВт

Таблица 2. Значения коэффициентов и показателей степени, полученные для математического описания характеристик КУ П-88 от температуры наружного воздуха t_n в диапазоне электрической мощности N_e ГТУ от 88 до 110 МВт

Y	C	D	E	F	n	m	b
$\alpha''_{кС}$	3,03	0,0034	0,023	–	0,69	1,1	–
$\eta_{ГТУ}$	0,346	$-11,3 \cdot 10^{-6}$	0,0016	$-0,025 \cdot 10^{-6}$	0,78	1,9	2,3
$B_{час}, \text{нм}^3/\text{ч}$	25637	0,603	199,81	0,0031	1,03	2,0	2,02
$G_r, \text{кг/с}$	215,1	0,424	0,874	$5,156 \cdot 10^{-9}$	1,05	1,1	1,5
$\vartheta'_{ГТ}, \text{°C}$	1059	0,032	10,4	0,0335	0,4	1,1	0,8
$\vartheta'_{КУ}, \text{°C}$	489	0,0587	4,77	0,0176	0,4	1,5	0,8
$D_{пв}, \text{т/ч}$	121,9	0,026	1,134	$9,2 \cdot 10^{-5}$	0,82	1,7	2,3
$D_{вд}, \text{т/ч}$	120,9	0,026	1,124	$9,1 \cdot 10^{-5}$	0,82	1,7	2,3
$t_{вд}, \text{°C}$	444	0,601	2,535	0,0268	0,84	0,95	0,8
$D_{нд}, \text{т/ч}$	31,1	0,114	0,084	$2,8 \cdot 10^{-6}$	1,2	0,98	2,3
$t_{нд}, \text{°C}$	207	0,006	0,337	$2,9 \cdot 10^{-6}$	1,2	1,7	2,3
$t_{к}, \text{°C}$	261	5,5	1,1	–	0,99	0,99	–

Дополнительная неопределенность, вносимая в результаты расчета при переходе от исходной математической модели, реализованной в программном комплексе «ТРАКТ», к упрощенной математической модели (1), не превышает 1,5 %.

Таким образом, в рамках исследования разработана математическая модель КУ П-88 энергоблока ПГУ-325, позволяющая без привлечения специализированных программных средств для расчета котельного оборудования определять основные показатели работы котла при изменении электрической мощности ГТУ и температуры наружного воздуха при нагрузках, близких к номинальной. Полученное математическое описание позволит решать задачи режимной оптимизации и оценки эффективности котла-утилизатора и ПГУ в целом при изменении условий эксплуатации.

Список литературы

1. 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.

2. Belyakov I.I., Breus V.I., Barannikov A.B. Development of technical solutions for optimizing the hydraulic and thermal process circuits of the P-90 heat-recovery boiler used as part of the PGU-450T combined-cycle plant at the severozapadnaya cogeneration station // Thermal Engineering. – 2012. – Vol. 59. – P. 183–188.

3. Кудинов А.А., Зиганшина С.К. Повышение эффективности ПГУ-170 за счет промежуточного перегрева водяного пара // Энергетик. – 2020. – № 7. – С. 11–16.

4. Investigation of Technical and Economic Viability of the 450-MW CCGT Unit's Operation in the GTU Based CHP Mode / E.K. Arakelyan, A.V. Andryushin, S.Y. Burtsev, K.A. Andryushin // Thermal Engineering. – 2018. – Vol. 65. – P. 900–910.

5. Шельгин Б.Л., Мошкарин А.В. Котлы-утилизаторы парогазовых установок электростанций. – Иваново, 2012. – 284 с.

6. Применение пакетов прикладных программ при изучении курсов механики жидкости и газа / Т.В. Кондранин, Б.К. Ткаченко, М.В. Березникова и др. – М.: МФТИ, 2005. – 104 с.

7. Usov S.V., Kudinov, A.A. Development of the CCP-200 mathematical model for Syzran CHPP using the Thermolib software package // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63. – P. 253–259.

8. Гудзюк В.Л., Ривкин А.С., Шельгин Б.Л. Тепловой поверочный расчет паровых котлов на ЭВМ. – Иваново, 1989. – 36 с.

9. Кузнецов Н.В., Дубовский И.Е., Митор В.В. Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова. – М.: Энергия, 1973. – 296 с.

10. Панов Л.М., Шельгин Б.Л. Изучение характеристик котла-утилизатора «П-88» при проектной нагрузке ПГУ-325 и изменении климатических условий // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. «Энергия-2017». – Иваново, 2017. – С. 54.

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

References

1. 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: MEI, 2002. 584 p.

2. Belyakov, I.I., Breus, V.I., Barannikov, A.B. Development of technical solutions for optimizing the hydraulic and thermal process circuits of the P-90 heat-recovery boiler used as part of the PGU-450T combined-cycle plant at the severozapadnaya cogeneration station. *Thermal Engineering*, 2012, vol. 59, pp. 183–188.

3. Kudinov, A.A., Ziganshina, S.K. Pofishenie effektivnosti PGU-170 za schyot peregreva vodianogo para [Improvement of the effectiveness of combined-cycle plant-170 due to overheating water steam]. *Energetik*, 2020, no. 7, pp. 11–16.

4. Arakelyan, E.K., Andryushin, A.V., Burtsev, S.Y., Andryushin, K.A. Investigation of Technical and Economic Viability of the 450-MW CCGT Unit's Operation in the GTU Based CHP Mode. *Thermal Engineering*, 2018, vol. 65, pp. 900–910.

5. 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.

6. Kondranin, T.V., Tkachenko, B.K., Bereznikova, M.V., Evdokimov, A.V., Zuev, A.P. *Primenenie paketov prikladnykh programm pri izuchenii kursov mekhaniki zhidkosti i gaza* [Application of

software packages for studying fluid and gas mechanics courses]. Moscow: MFTI, 2005. 104 p.

7. Usov, S.V., Kudinov, A.A. Development of the CCP-200 mathematical model for Syzran CHPP using the Thermolib software package. *Thermal Engineering*, 2016, vol. 63, pp. 253–259.

8. Gudzyuk, V.L., Rivkin, A.S., Shelygin, B.L. *Teplovoy poverochnyy raschet parovykh kotlov na EVM* [Thermal verification calculation of steam boilers on a computer]. Ivanovo, 1989. 36 p.

9. Kuznetsov, N.V., Dubovskiy, I.E., Mitor, V.V. *Teplovoy raschet kotel'nykh agregatov (normativnyy metod)* [Thermal calculation of boiler units (standard method)]. Moscow: Energiya, 1973. 296 p.

10. Panov, L.M., Shelygin, B.L. Izuchenie kharakteristik kotla-utilizatora «P-88» pri proektnoy nagruzke PGU-325 i izmenenii klimaticheskikh usloviy [Studying the characteristics of P-88 heat recovery boiler under designed combined-cycle plant 325 load and climate condition changing]. *Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Energiya-2017»* [International scientific and technical conference “Energiya-2017”]. Ivanovo, 2017, p. 54.

11. 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.