



ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ ПРИ РАЗУКРУПНЕНИИ ГРАФИКОВ ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗОК

Д.С. Синельников*, П.А. Щинников

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

*ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1401-8781>, Sinelnikovden@hotmail.com

Резюме: В статье рассматривается работа теплофикационных энергоблоков ТЭЦ в условиях разукрупнения графика тепловых нагрузок. Показано, что для повышения эффективности может использоваться оригинальная методика разбиения температурного графика на три зоны, каждая из которых характеризуется способом регулирования отпуска теплоты, а для оценки эффекта использоваться критерий минимального расхода топлива. Разработан метод определения эквивалентной расчетной температуры, который учитывает режимные особенности теплофикационных энергоблоков в виде способа регулирования отпуска теплоты. Показано, что при зонировании температурного графика следует иметь три расчетных точки. На основании оптимизационных расчетов для теплофикационных энергоблоков стандартных типоразмеров широкой линейки мощностей показано, что оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика в целом соответствуют стандартным значениям. Кроме того, показано, что в каждой зоне температурного графика наблюдается экономия топлива, которая может составить от 3 до 30% в зависимости от типа энергоблока, его мощности и зоны температурного графика, а годовой расход топлива теплофикационными энергоблоками может быть снижен приблизительно на 10%.

Ключевые слова: зонирование температурного графика, оптимизация параметров, эффективность, теплофикация, экономия, эксергетический метод, анализ, комбинированная система, тепловые электрические станции, распределенная генерация.

Для цитирования: Синельников Д.С., Щинников П.А. Повышение эффективности теплофикационных энергоблоков при разукрупнении графиков тепловых нагрузок // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. №4. С.12-19. doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-12-19.

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE THERMAL POWER UNITS AT ZONING OF HEAT LOAD CURVE

DS. Sinelnikov, PA. Shchinnikov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1401-8781>, Sinelnikovden@hotmail.com

Abstract: The article deals with the work of heat and power units of thermal power plants in the conditions of disaggregation of the heat load schedule. The purpose of the work is to increase the efficiency of operation of CHP units operating under the conditions of the zoned temperature schedule. To achieve the obtained results, mathematical modeling based on the methods of differential-exergetic and thermodynamic analysis; methods of material, energy and exergetic balances. Research has shown that in order to increase the efficiency the original method of splitting the temperature graph into three zones can be used, each of which is characterized by the method of regulation of heat supply, and to assess the effect of the minimum fuel consumption criterion can be used. The method of determining the equivalent design temperature, which takes into account the regime peculiarities of heat and power units in the form of a method of regulation of heat supply, is developed. Study has shown that three design points should be available when zoning the temperature schedule. Based on optimization calculations for standard sizes of heat and power units of a wide range of capacities, the calculations show that the optimal parameters of heat and power units in the conditions of zoning of the temperature schedule as a whole

correspond to the standard values. In addition, it is shown that in each zone of the temperature schedule there is a saving of fuel, which can be from 3 to 30% depending on the type of power unit, its capacity and zone of the temperature schedule, and the annual fuel consumption of the heat and power units can be reduced by approximately 10%. It is shown that when conventional power units operate according to the zoned temperature schedule and in the first zone (quantitative regulation), preference should be given to power units with steam production. In the second zone (mixed regulation), the operation of power units with steam extraction and heat and power units is equivalent. In addition, in the third zone (qualitative regulation) preference should accrue to heat and power units.

Keywords: heat load curve, optimization of parameters, efficiency, heating, saving, exergetic method, analysis, combined system, thermal power plants, distributed generation.

For citation: Sinelnikov DS, Shchinnikov PA. Increasing the efficiency of the thermal power units at zoning of heat load curve. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2019; 21(4):12-19. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-4-12-19.

Введение

Современная энергетика развивается по пути децентрализации, когда большое количество генерирующих источников, как правило, малой мощности, устанавливают рядом с потребителем [1]. В этих условиях традиционные теплоцентрали теряют своего потребителя, а их экономичность ухудшается из-за снижения выработки электроэнергии на тепловом потреблении. Другими словами, ТЭЦ начинает терять свое основное преимущество – комбинированную выработку тепловой и электрической энергии. Для преодоления этих сложностей предложены комбинированные системы теплоснабжения, когда в общем случае имеется два источника, генерирующих теплоту (рис. 1). Указанные источники принято называть центральным и удаленным. Роль центрального источника выполняет традиционная ТЭЦ, а в качестве удаленного источника может выступать ДВС, ГТУ, внутриквартальные мини-ТЭС, котельные, тепловые насосы и другие установки.

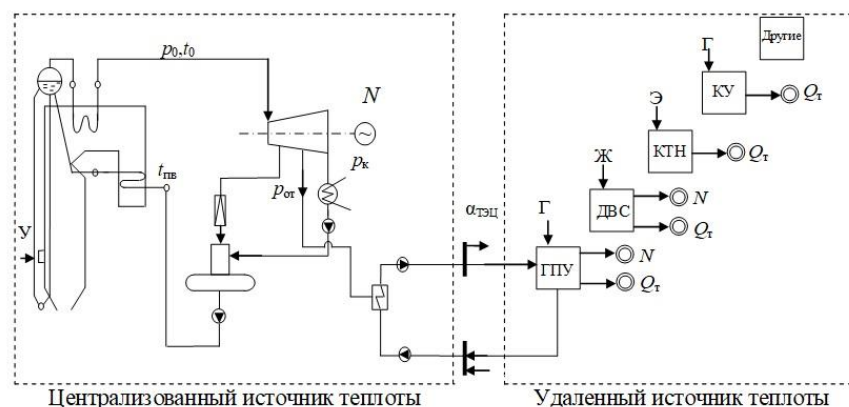


Рис. 1. Тепловая схема ТЭЦ с комбинированной системой теплоснабжения: N , Q_t – потребители электрической и тепловой энергии соответственно; $У$, $Г$, $Ж$, $Э$ – первичный энергетический ресурс в виде угля, газа, жидкого топлива и электроэнергии соответственно; $КУ$ – котельная установка; $ГТУ$ – газотурбинная установка; $КТН$ – компрессорный тепловой насос; $АТН$ – абсорбционный тепловой насос; p_0 , t_0 , p_k , $t_{пв}$, $p_{ст}$, $\alpha_{ТЭЦ}$ – параметры, характеризующие работу ТЭЦ

В целом энергоснабжение потребителей от ТЭЦ по комбинированной системе рис. 1 имеет ряд преимуществ перед системами энергоснабжения потребителей традиционных ТЭЦ [2–4]. Эти преимущества, как правило, не реализованы сегодня из-за вопросов собственности. Потребители стремятся обособиться от централизованной системы с целью получения независимости, надёжности энергоснабжения и в надежде на экономическую выгоду. Последней часто не удается достигнуть из-за балансовой несовместимости потребления и генерации малыми энергоустановками двух и более видов продукции.

С другой стороны, централизованные энергоблоки теряют свои традиционные преимущества, так как работают в условиях разукрупнения графиков тепловых нагрузок. Для выявления фактических условий работы действующих и перспективных теплофикационных энергоблоков предлагается обеспечить зонирование теплового графика с одновременным отказом от традиционного регулирования отпуска теплоты от

ТЭЦ. В этом случае стандартный температурный график 150/70 °С имеет три ярко выраженные зоны (периоды), которые характеризуют разные способы регулирования (рис. 2).

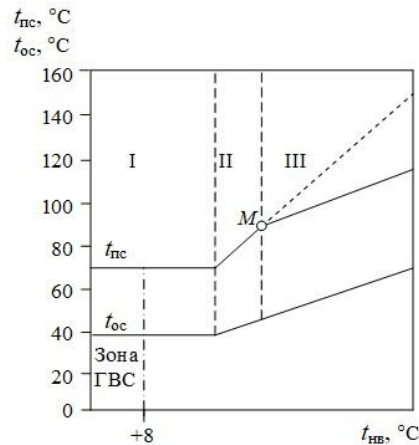


Рис. 2. Зонированный отопительно-бытовой температурный график 150/70 °С:

$t_{пс}$, $t_{ос}$, $t_{нв}$ — температура прямой, обратной сетевой воды и наружного воздуха соответственно;

M — точка максимальной теплофикационной нагрузки отбора турбины; ГВС — зона обеспечения горячего водоснабжения; +8 — температура начала отопительного сезона

Период I отвечает за режим горячего теплоснабжения (ГВС) и начало отопительного сезона и характеризуется количественным способом регулирования. При этом способе увеличение количества отпускаемой тепловой энергии обеспечивается увеличением расхода при неизменной температуре прямой сетевой воды ($t_{пс}$). Период III начинается в точке максимальной теплофикационной нагрузки (точка М, рис. 2), обеспечивает отопительную нагрузку и характеризуется качественным регулированием, при котором увеличение количества отпускаемой теплоты обеспечивается увеличением температуры за счет увеличения давления в регулируемом отборе турбины. Одновременно с началом периода III вступает в работу пиковый водогрейный котел (ПВК) в стандартных схемах теплоснабжения ТЭЦ-ПВК-МТ-П (здесь МТ — магистральная теплосеть; П — потребитель теплоты). Коэффициент теплофикации становится меньше единицы ($\alpha_{ТЭЦ} < 1$).

Период II является переходным от количественного регулирования к качественному, но одновременно этот период характеризует работу ТЭЦ в наиболее эффективном режиме, так как отопительная нагрузка уже подключена, а коэффициент теплофикации равен единице ($\alpha_{ТЭЦ} = 1$). В этом смысле зону II графика (рис. 2) можно считать базовой. Для регулирования отпуска теплоты в этой зоне предлагается применять качественно-количественный способ, когда задействованы и расход сетевой воды, и температура отборного пара. Указанный принцип зонирования впервые предложен в работах ульяновской школы энергетиков [5–7].

Материалы и методы

Для комбинированной системы отпуска теплоты задача выгодного сочетания всех ее элементов может быть представлена как минимизация суммарного расхода топлива:

$$B_{\Sigma} \rightarrow \min. \quad (1)$$

Этот показатель может являться критерием оптимизации рационального сочетания установок разного типа, работающих в комбинированной системе теплоснабжения [7–10, 11]. Частным случаем является задача оптимизации параметров энергоблоков ТЭЦ в условиях разукрупнения и зонирования температурного графика, которая формулируется следующим образом [11]:

$$\min B(\omega)_i | \varphi(\omega)_i \leq C_e \quad (2)$$

В этом выражении B — расход топлива энергоблоком; $\omega = \{X, Y\}$ — множество оптимизируемых (X) и функционально зависимых (Y) параметров; $\varphi(\omega)$ — оператор функциональных отношений (оператор преобразования); C_e — комплекс ограничений; i — характеризует зону температурного графика.

При решении задачи оптимизации параметров действующих теплофикационных энергоблоков к оптимизируемым параметрам следует отнести давление и температуру острого пара (p_0 ; t_0), температуру питательной воды ($t_{пв}$), температуру промперегрева ($t_{пп}$), коэффициент теплофикации ($\alpha_{ТЭЦ}$), рис. 1. При этом давление в регулируемом отборе ($p_{от}$)

обусловлено соответствующей зоной температурного графика, а давление конденсации (p_k) – температурой окружающей среды. Ограничениями выступают технически достижимые значения параметров в условиях реальной эксплуатации энергоблоков, с одной стороны, и ограничения на применяемые математические методы – с другой [5, 12].

Далее к рассмотрению приняты теплофикационные энергоблоки стандартных типоразмеров, серийно выпускаемые отечественной промышленностью: типа Т и ПТ в диапазоне мощностей от 30 до 265 МВт. Для них с использованием режимных карт сформированы исходные данные для оптимизационных расчетов по обеспечению эквивалентных нагрузок [13] в условиях зонирования температурного графика. Для турбин типа ПТ производственный отбор задействован во всех случаях (табл. 1).

Таблица 1

Параметры нагрузок тепловой, электрической и производственного отбора для теплофикационных турбин в условиях зонирования температурного графика

Турбина	Параметры пром. отбора		Зоны температурного графика					
			I		II		III	
	G , т/ч	P , бар	Q , МВт	N , МВт	Q , МВт	N , МВт	Q , МВт	N , МВт
Т-50	-	-	17	50	87	38	116	40
Т-110	-	-	30	110	152	83	203	88
Т-120	-	-	33	120	164	90	218	96
Т-175	-	-	48	175	240	131	320	140
Т-180	-	-	49	180	240	135	320	144
Т-250	-	-	61	250	305	188	407	200
Т-265	-	-	63	265	314	199	418	212
ПТ-30	83	0,9	11	30	55	22,5	73	22,5
ПТ-50	118	1,0	10	50	49	38	65	38
ПТ-65	250	1,6	15	65	75	49	100	49
ПТ-80	180	1,2	17	80	87	60	116	60
ПТ 135	324	1,2	21	135	105	101	140	101

Обсуждение результатов

Для температурного графика 150/70 С расчеты показывают, что для зон II и III (рис. 3) оптимальные параметры (p_0 ; t_0 ; $t_{пв}$) в целом соответствуют стандартным значениям при некотором снижении оптимальной температуры острого пара (до ~510 °С). Снижение температуры острого пара обусловлено достаточно высокой термодинамической эффективностью комбинированной выработки электроэнергии и теплоты. Подобное снижение оптимальной температуры острого пара наблюдалось в работах [4, 14, 15] для других технологий и способов повышения эффективности энергоблоков ТЭЦ. Скачкообразный переход давления острого пара p_0 в области единичных мощностей 180 МВт во всех случаях связан с переходом на энергоблоки с промежуточным перегревом пара. Этот переход обуславливает также и более развитую систему регенерации, а следовательно – температуру питательной воды ($t_{пв}$).

В зоне количественного регулирования (зона I) наблюдается наибольшее возмущение оптимальных параметров (рис. 3).

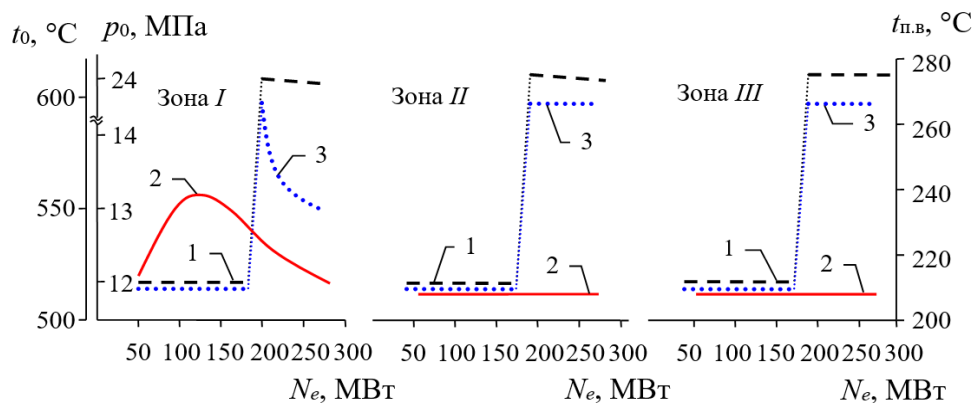


Рис.3. Оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в разных зонах температурного графика: p_0 – давление острого пара (линия 1); t_0 – температура острого пара (линия 2); $t_{п.в.}$ – температура питательной воды (линия 3); I, II, III – зоны количественного, смешанного и качественного регулирования; N_e – единичная электрическая мощность теплофикационных энергоблоков; $t_{пс}$ – температура прямой сетевой воды; t_{oc} – температура обратной сетевой воды; $t_{нв}$ – температура наружного воздуха

Зона I характеризуется нагрузкой горячего водоснабжения, и теплофикационные отборы турбин практически не задействованы. В этом случае оптимальная температура острого пара (t_0) для энергоблоков типа Т с ростом единичной мощности снижается с 555 до 510 °C, что связано с более высокой термодинамической эффективностью мощных теплофикационных энергоблоков даже при работе по «электрическому» графику нагрузки (в конденсационном режиме) (рис. 4). Энергоблоки типа ПТ имеют нагрузку производственного отбора, и ее доля наиболее высока для более мощных турбин (см. табл. 1). Таким образом, чем мощнее турбина типа ПТ, тем больше теряет энергоблок при переходе в зону I температурного графика, тем выше требуется обеспечивать параметры острого пара для него (рис. 4). Очевидно, что в этом случае оптимальный коэффициент теплофикации для блоков типа ПТ существенно выше, чем для блоков типа Т, и стремится к своим максимальным значениям на уровне $\alpha_{ТЭЦ} = 0,7$.

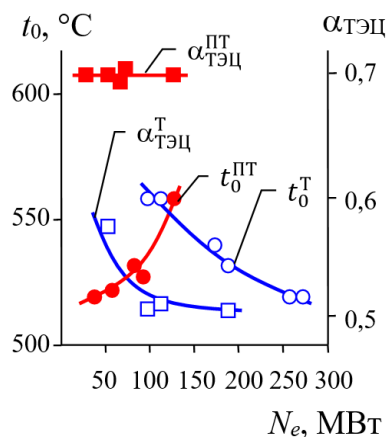


Рис.4. Зависимость оптимальных температуры острого пара (t_0) и коэффициента теплофикации ($\alpha_{ТЭЦ}$) от единичной мощности теплофикационных энергоблоков

Важно отметить, что в каждой зоне температурного графика наблюдается экономия топлива для всех типов энергоблоков при оптимизации их параметров по сравнению с работой традиционного энергоблока в тех же условиях. Экономия может составить от 3 до 30 % в зависимости от типа энергоблока, его мощности и зоны температурного графика. Можно видеть, что в зоне количественного регулирования блоки типа ПТ позволяют экономить больше топлива, чем блоки типа Т; в зоне качественного регулирования, наоборот, блоки Т предпочтительнее, по сравнению с ПТ; а в зоне смешанного регулирования оба типа энергоблоков равноценны (рис. 5).

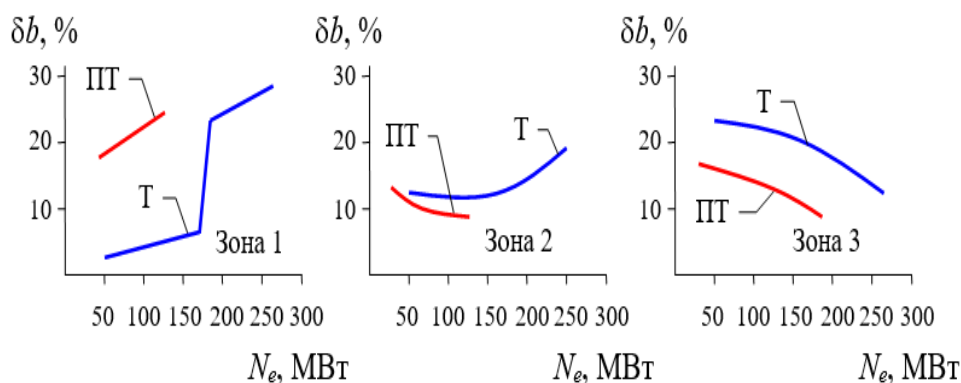


Рис.5. Относительная экономия удельного расхода топлива на отпущенную продукцию при оптимизации параметров теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика

Годовой расход топлива, в соответствии с выражением (2), может быть снижен в условиях зонирования температурного графика приблизительно на 10 % (рис. 6).

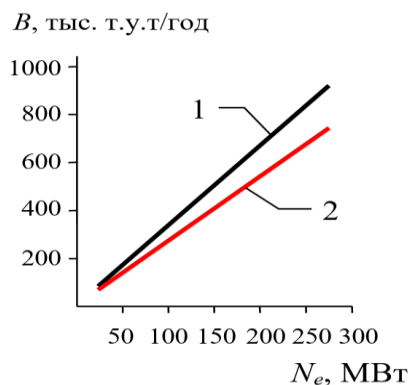


Рис. 6. Расход топлива теплофикационными энергоблоками в условиях расчета по традиционному температурному графику (линия 1) и при его зонировании (линия 2)

Выводы

1. Показано, что при разукрупнении графиков тепловых нагрузок для повышения эффективности работы энергоблоков ТЭЦ может использоваться прием зонирования температурного графика, когда выделяют зоны количественного, смешанного и качественного регулирования отпуска теплоты и критерий минимального расхода топлива.
2. Показано, что оптимальные параметры теплофикационных энергоблоков в условиях зонирования температурного графика, в целом, соответствуют стандартным значениям.
3. Показано, что во всех зонах температурного графика можно обеспечить экономию топлива, при этом в зоне количественного регулирования блоки типа ПТ позволяют экономить больше, чем блоки типа Т, в зоне качественного регулирования, наоборот, блоки Т предпочтительнее, по сравнению с ПТ, а в зоне смешанного регулирования оба типа энергоблоков равноценны.
4. Показано, что в условиях зонирования температурного графика годовой расход топлива теплофикационными энергоблоками стандартных типоразмеров может быть снижен приблизительно на 10 %.

Литература

1. Современная электроэнергетика // 29-я международная выставка Электрооборудование. Светотехника. Автоматизация зданий и сооружений. Доступно по: <https://www.elektro-expro.ru/ru/ui/17087/>. Ссылка активна на: 04.08.2018.
2. Андрущенко А.А. Комбинированные системы энергоснабжения // Теплоэнергетика. 1997. №5. С.2–6.
3. Щинников П.А, Ноздренко Г.В, Томилов В.Г. и др. Комплексные исследования ТЭС с новыми технологиями: Монография / Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. 528 с.
4. Ротов П.В., Орлов М.Е., Шарапов В.И. О температурном графике центрального регулирования систем теплоснабжения // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2014. №5-6. С. 3–12.

5. Шарапов В.И., Ротов П.В. Регулирование нагрузки городских теплофикационных систем. Ульяновск: УлГТУ, 2013. 309 с.
6. Орлов М.Е., Шарапов В.И. Совершенствование структуры и технологий работы городских ТЭЦ и теплофикационных систем. Ульяновск: УлГТУ, 2014. 352с.
7. Ротов, П. В. О зонировании температурного графика центрального регулирования нагрузки теплофикационных систем // Промышленная энергетика. 2013. № 6. С. 21-25.
8. Nakoryakov V.E., Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Grigoryeva O.K. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems // Journal of Engineering Thermophysics. 2010. V. 19. N2. pp. 53-61.
9. Пашка Б. Системная эффективность технологии комбинированного теплоснабжения на основе ТЭЦ с внутриквартальными тепловыми насосами // дис. ...к.т.н. Новосибирск, НГТУ, 2011. 22с.
10. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Serant F.A. and other. Exergic analysis of new boiler technologies within power-generating units of thermal power plant // Thermophysics and Aeromechanics. 2009. N.2. pp. 315-323.
11. А.М. Клер и д.т.н. Э.А.Тюриной Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов / Под ред. д.т.н. : РАН. Новосибирск : Академ. издание «Гео», 2016. 298 с.
12. Elaiw, A. M. Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch with Emission Limitations Using Hybrid DE-SQP Method // Abstract and Applied Analysis. 2013. pp. 10.
13. Накоряков В.Е., Ноздренко Г.В., Боруш О.В. Комплексные технико-экономические исследования ПГУ с поточными газификаторами // Известия РАН. Энергетика, 2010. №4. С.184–193.
14. Ротов П.В. Совершенствование систем централизованного теплоснабжения, подключенных к ТЭЦ, путем разработки энергоэффективных технологий обеспечения нагрузок отопления и горячего водоснабжения. Дис. ... д.т.н. Иваново: ИГЭУ, 2015. 356 с.
15. Щинников, П.А. Перспективные ТЭС. Особенности и результаты исследования / П. А. Щинников.– Новосибирск: НГТУ, 2007.

Авторы публикации

Синельников Денис Сергеевич – аспирант Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

Щинников Павел Александрович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Тепловые электрические станции» Новосибирского государственного технического университета (НГТУ).

References

1. Modern power engineering. 29th *International Exhibition of Electrical Equipment. Lighting engineering. Automation of buildings and structures*. Available at: URL: <https://www.elektro-expo.ru/ru/ui/17087/>. Accessed to: 04.08.2018.
2. Andryushchenko AI. Combined power supply system. *Combined heat and power*. 1997;5:2-7.
3. Shchinnikov PA., Nozdrenko GV., Tomilov VG. *Comprehensive research of TPPs with new technologies*: Monograph / Novosibirsk: Publishing House of the National Technical University, 2005. 528 p.
4. Rotov PV., Orlov ME., Sharapov VI. The temperature regulation chart central heating systems. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2014;(5-6):3-12.
5. Sharapov VI., Rotov PV. *Load regulation of urban district heating systems*. Ulyanovsk: ULSTU, 2013. P. 309 .
6. Orlov ME., Sharapov VI. *Improving the structure and technologies of urban CHP and heating systems*. Ulyanovsk: ULSTU, 2014. P.352.
7. Rotov PV. About the zoning of the temperature schedule of the central regulation of the heat and power systems load . *Industrial power engineering*. 2013;6:21-25.
8. Nakoryakov VE., Nozdrenko GV. Shchinnikov PA., Grigoryeva OK. Basic provisions of exergy method and analysis of power plants with state-of-the-art heat pump combined cycle heating systems. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2010;19 (2):53-61.
9. Pashka B. the System efficiency of combined district heating based on CHP with intra-heat pumps. [dissertation]. Novosibirsk, NSTU, 2011.
10. Nozdrenko G.V., Shchinnikov P.A., Serant F.A. and other. Exergy analysis of new boiler technologies within power-generating units of thermal power plant. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2009;2:315-323.
11. Kler AM., Turiny EA. *Optimization studies of power plants and complexes* / RAS, Sib. branch, ISEM. Novosibirsk: Academic Publication "Geo", 2016. P. 298.
12. Elaiw, AM. Combined Heat and Power Dynamic Economic Dispatch with Emission Limitations Using Hybrid DE-SQP Method / AM. Elaiw, XXia, AM. Shehata. Abstract and Applied Analysis 2013.

pp.10.

13. Nakoryakov VE., Nozdrenko GV., Borush OV. Integrated technical and economic studies of combined-cycle plants with in-line gasifiers. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering*. 2010;4:184-193.

14. Rotov PV. *Improvement of district heating systems connected to the CHP by developing energy-efficient technologies to provide loads of heating and hot water supply*. [dissertation]. Ivanovo: IGEU, 2015.

15. Shchinnikov PA. Promising TPPs. *Features and results of the research*. Novosibirsk.: NGTU, 2007.

Authors of the publication

Denis S. Sinelnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Pavel. A. Shchinnikov – Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia.

Поступила в редакцию

03 декабря 2018 г.