

УДК 621.311.22

Лабораторный комплекс для анализа характеристик оборудования парогазовых установок электростанций

Б.Л. Шельгин, Е.С. Малков, Е.К. Преснов, И.А. Колесов
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В связи с изменениями в системе высшего образования, в частности связанных с подготовкой бакалавров, увеличивается доля практических и лабораторных занятий в учебном процессе. Поэтому в дополнение к лабораторным работам, выполняемым на существующих стендах и установках, необходима поставка новых виртуальных лабораторных работ с использованием ПЭВМ и программных продуктов, моделирующих условия работы отдельных энергоустановок.

Материалы и методы: Для разработки сценариев лабораторного комплекса использована техническая документация по расчету энергетического оборудования. Программный продукт выполнен в операционной системе Windows с использованием Microsoft Visual Studio Express.

Результаты: Разработан программный продукт для расчета показателей работы оборудования парогазовых установок, включающий теоретический материал и четыре варианта расчетных схем. Представлена последовательность расчета основных показателей агрегатов, входящих в состав парогазовой установки. Рассмотрены особенности определения конструктивных характеристик поверхностей нагрева котла-утилизатора.

Выводы: Сценарий программного продукта отвечает требованиям современной системы образования, повышает эффективность и скорость обучения.

Ключевые слова: парогазовая установка, учебно-методическая разработка, электронный учебник.

Laboratory complex for analysis of combined cycle power plant equipment performance

B.L. Shelygin, E.S. Malkov, E.K. Presnov, I.A. Kolesov
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: admin@tes.ispu.ru

Abstract

Background: Changing the curriculum in higher educational institutions of the Russian Federation, connected with training Bachelor degree students in particular, will increase the share of seminars, tutorials and laboratory classes. Therefore, in addition to laboratory assignments performed on the existing stands and facilities it is necessary to develop new virtual lab tasks and software products, simulating operating modes of certain power installations.

Materials and methods: Technical documentation for the calculation of power equipment was used to develop laboratory complex scripts. The software product is made in the Windows operating system using Microsoft Visual Studio Express.

Results: The authors have developed software for calculating the operating parameters of combined-cycle power plant equipment, including theoretical material and four different calculation schemes. The paper represents the sequence of calculating the main parameters of apparatuses that are part of a combined-cycle plant. It also considers the peculiarities of determining design characteristics of the heating surfaces of a recovery boiler.

Conclusions The developed software meets the requirements of the modern education system, increases teaching efficiency and learning speed.

Key words: combined cycle power plant, teaching/learning aid development, electronic textbook.

Разработан программный продукт для проведения расчетного анализа характеристик основного оборудования парогазовых установок ТЭС при переменных режимах их работы. Разработка предназначена для выполнения индивидуальных заданий студентами энергетических специальностей на практических занятиях при изучении дисциплины «Котлы-утилизаторы ПГУ электростанций».

Эффективность обучения студентов обеспечивается при условии адекватности всех элементов педагогической системы учебно-методическим целям и задачам [1, 2].

Начальный этап обучения проводится на лекционных занятиях с использованием печатных изданий [3] и электронных учебников в виде автоматизированных обучающих систем [4, 5].

Последующие этапы – практические занятия, на которых закрепляется ранее изученный материал в ходе выполнения расчетных индивидуальных заданий. Последнее особенно актуально в связи с требованиями системы высшего образования РФ по изменению планов подготовки будущих специалистов ТЭС (бакалавров), согласно которым предусматривается существенное увеличение учебных ча-

сов для проведения практических занятий со студентами.

Одним из главных направлений стратегии развития теплоэнергетики страны на период до 2020 г. является техническое перевооружение ТЭС и ввод новых генерирующих мощностей на базе прогрессивных технологий, преимущественно с использованием парогазовых установок (ПГУ), оснащенных котлами-утилизаторами (КУ) [6, 7].

Настоящая учебно-методическая разработка предназначена для закрепления знаний, полученных студентами при изучении теоретического материала [3–5]. Она направлена на детальное изучение будущими специалистами ТЭС расчетных характеристик показателей работы оборудования ПГУ и выполнена в диалоговом режиме с использованием ПЭВМ [8].

Разработка представляет собой программный продукт, содержащий два модуля (рис. 1):

- учебный, в котором изложены особенности оборудования ПГУ ТЭС и характеристики ее основных составляющих;
- расчетный, в котором определяются основные показатели оборудования ПГУ.



Рис. 1. Главное меню программы

В первом разделе представлен материал по особенностям основного оборудования ПГУ и главным характеристикам его работы.

Во втором разделе в диалоговом режиме приводится последовательность расчета основных показателей агрегатов, входящих в состав ПГУ. Рассматриваются особенности определения конструктивных характеристик поверхностей нагрева, выполненных из оребренных труб (живое сечение для прохода газов, поверхность нагрева одного ряда труб и т.д.).

Пользователю программным продуктом предлагаются задания для расчета одного из вариантов четырех схем ПГУ (рис. 2–5).

Последовательность выполнения расчетного анализа рассматривается на примере третьего варианта задания № 1 применительно к газотурбинной надстройке блока с паровой турбиной К-200-12,8 и котлом-утилизатором с ГТУ марки V64.3А (рис. 2).

Предварительно дается описание расчетной схемы энергоустановки и в общем виде демонстрируется изменение температур газов и рабочей среды.

Из таблицы исходных данных (рис. 6) вводятся значения: электрической мощности ГТУ $N_{ГТУ}$; температуры наружного воздуха $t_{нар}$; степени повышения давления π ; КПД компрессора и ГТУ ($\eta_{к}, \eta_{ГТУ}$); теплоты сгорания топлива $Q_{н}^c$; теоретического расхода воздуха L_0 ; коэффициента избытка воздуха за камерой сгорания (КС) ГТУ $\alpha_{КС}''$.

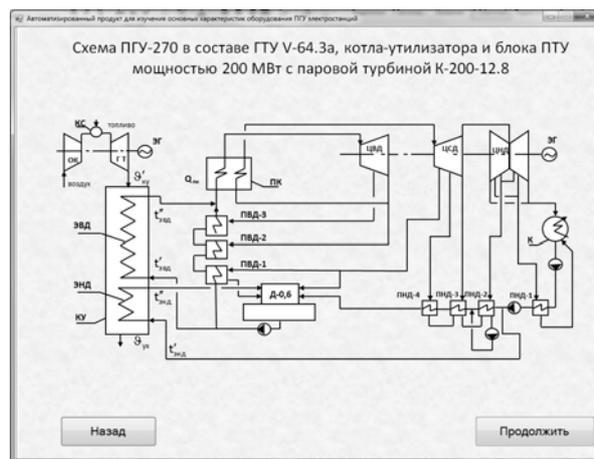


Рис. 2. Схема ПГУ-270 в составе ГТУ V-64.3а, котла-утилизатора и блока ПТУ мощностью 200 МВт с паровой турбиной К-200-12,8

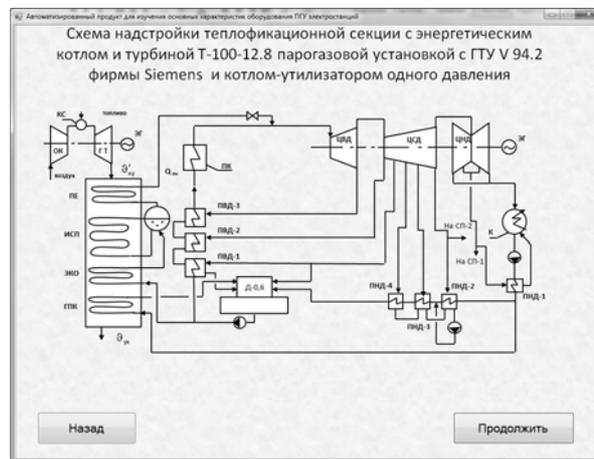


Рис. 3. Схема надстройки теплофикационной секции с энергетическим котлом и турбиной Т-100-12.8 парогазовой установкой с ГТУ V 94.2 фирмы Siemens и котлом-утилизатором одного давления

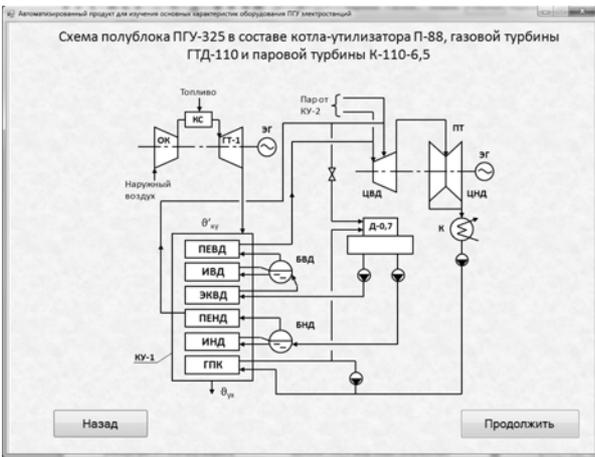


Рис. 4. Схема полублока ПГУ-325 в составе котла-утилизатора П-88, газовой турбины ГТД-110 и паровой турбины К-110-6,5

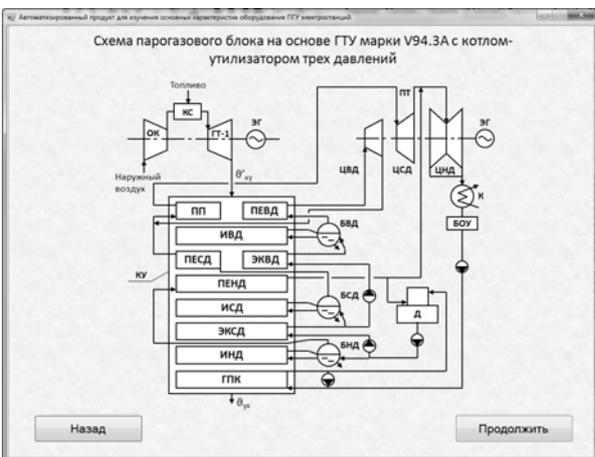


Рис. 5. Схема парогазового блока на основе ГТУ марки V94.3A с котлом-утилизатором трех давлений

1. Газотурбинная надстройка конденсационного блока турбины К-200-12,8 с ГТУ V64.3A фирмы Siemens с котлом-утилизатором для нагрева части конденсата и питательной воды

Согласно варианту задания введите следующие характеристики:

Характеристики	1.1	1.2	1.3
Электрическая мощность ГТУ _{эл} , МВт	40	55	70
Температура наружного воздуха t _{нар} , °C	17	20	23
Степень повышения давления воздуха в компрессоре ГТУ π	12	13	14
η _{ГТД} компрессора η _к	0,87	0,88	0,89
η _{ГТУ} η _г	0,33	0,35	0,364
Теплота сгорания топлива Q _г , МДж/кг	40	41	42
Теоретический расход воздуха L ₀ , кг/кг	10	10,5	11
Коэффициент избытка воздуха за КС α _{КС}	4,25	3,95	3,84

Рис. 6. Диалоговое окно ввода исходных данных

Выполняется расчет характеристик продуктов сгорания (рис. 7).

1. Газотурбинная надстройка конденсационного блока турбины К-200-12,8 с ГТУ V64.3A фирмы Siemens с котлом-утилизатором для нагрева части конденсата и питательной воды

Температура воздуха за компрессором, °C:

$$t_{\text{кр}}^* = t_{\text{нар}} + (273 + t_{\text{нар}})(\pi^k - 1) / \eta_{\text{к}} = 202,3$$

где показатель адиабаты k=1,4.
Расход топлива в камеру сгорания ГТУ, кг/с:

$$V_{\text{г}} = \frac{N_{\text{г}}}{\eta_{\text{г}} (\eta_{\text{к}} Q_{\text{г}} + H_{\text{г}} \cdot 10^3)} = 4,8$$

где степень выгорания топлива в КС η_{КС} = 0,995; физическая теплота топлива H_г = 200 кДж/кг.
Температура в зоне горения топлива (внутри КС), °C:

$$Q_{\text{г}} = \frac{\eta_{\text{к}} Q_{\text{г}} \cdot 10^3 + H_{\text{г}} + \alpha_{\text{к}} L_0 c_p^* t_{\text{кр}}^*}{c_p^* (1 + \alpha_{\text{к}})} = 2042,2$$

где теплоемкость газов и коэффициент избытка воздуха в КС соответственно c_p^{*} = 1,8 кДж/(кг·град) и α_к = 1,08; теплоемкость воздуха c_p^{*} = 1,05 кДж/(кг·град).

Рис. 7. Расчет характеристик продуктов сгорания

Для определения граничных параметров рабочей среды вводятся значения энтальпии на выходе экономайзера высокого давления (ЭВД) i_{ЭВД}^н, температуры насыщения в деаэраторе t_Д^н, температуры конденсата за ПНД-1 t_{ПНД-1}^н (рис. 8).

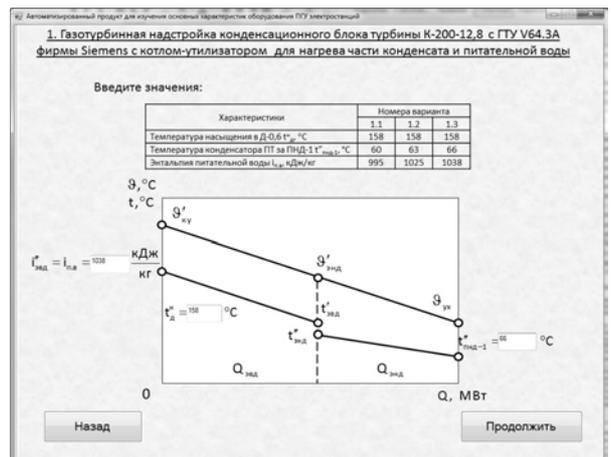


Рис. 8. Изменение температур газов, конденсата и питательной воды в зависимости от тепловосприятий ЭНД и ЭВД котла-утилизатора

Применительно к процессу расширения пара в проточной части ПТ марки К-200-12,8 вводятся: расход пара в промежуточный пароперегреватель D_{пп}; средние давления, температуры и энтальпии в отборах системы регенерации высокого (ВД) и низкого (НД) давлений p_{ВД}^р, p_{НД}^р, t_{ВД}^р, t_{НД}^р, i_{ВД}^р, i_{НД}^р; приращение энтальпии пара в промежуточном пароперегревателе Δi_{пп}, энтальпии пара за ЦВД и ЦНД i_{цвд}^н, i_к (рис. 9).

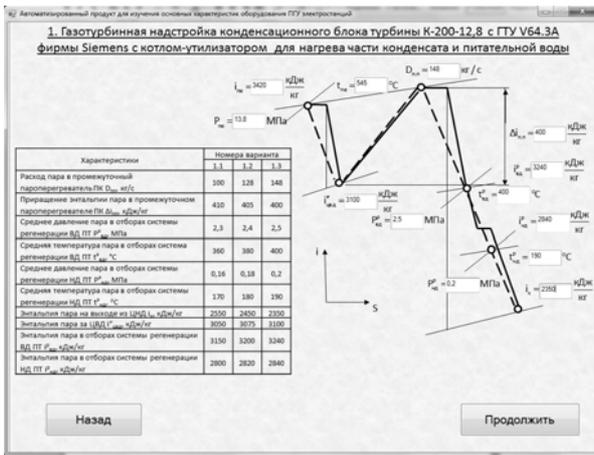


Рис. 9. Процесс расширения пара в паровой турбине марки K-200-12,8

Согласно введенной информации определяются электрическая мощность ПТУ и дополнительная выработка электрической мощности за счет частичного нагрева питательной воды в ЭВД и конденсата в ЭНД при снижении расходов пара в ПВД и ПНД:

$$N_{\text{ПТУ}} = 0,85 \left[D_0 (i_{\text{пе}} - i_{\text{цвд}}) + D_{\text{пп}} (i_{\text{пп}} - i_{\text{к}}) \right] \eta_{\text{МГ}} 10^{-3},$$

где 0,85 – коэффициент, учитывающий снижение выработки электрической мощности ПТ за счет отбора части пара в систему регенеративного нагрева конденсата и питательной воды (на ПНД и ПВД).

Дополнительная выработка электрической мощности в ПТУ за счет расходов пара $D_{\text{вд}}$ и $D_{\text{нд}}$ рассчитывается по формуле, МВт,

$$\Delta N_{\text{ПТУ}} = \left[D_{\text{вд}} (i_{\text{вд}}^{\text{п}} - i_{\text{к}}) + D_{\text{нд}} (i_{\text{нд}}^{\text{п}} - i_{\text{к}}) \right] \eta_{\text{МГ}} 10^{-3},$$

где КПД, учитывающий потери энергии в подшипниках ротора ПТ и генераторе, имеет значение $\eta_{\text{МГ}} = 0,98$.

Рассчитываются значения количества теплоты, выделяющейся при сжигании топлива в КС ГТУ и топочной камере ПК, МВт:

$$Q_{\text{КС}} = N_{\text{ГТУ}} / \eta_{\text{ГТУ}},$$

$$Q_{\text{ПК}}^{\text{топ}} = Q_{\text{ПК}} / \eta_{\text{ПК}}.$$

Тогда КПД ПГУ (брутто) определяется по формуле

$$\eta_{\text{ПГУ}} = (N_{\text{ГТУ}} + N_{\text{ПТУ}} + \Delta N_{\text{ПТУ}}) / (Q_{\text{КС}} + Q_{\text{ПК}}^{\text{топ}}).$$

По номограмме, построенной с использованием нормативного метода теплового расчета котельных агрегатов¹, используя значения известных конструктивных характеристик оребренных труб ЭНД (d_n , h , S_p) и средней скорости газов W_r находится теплоотдача конвекцией от газов к поверхности нагрева α_n (рис. 10). С учетом α_n рассчитываются коэффициент теплопередачи, величина поверхности нагрева ЭНД и количество его рядов труб по ходу газов z_2 .

¹ Тепловой расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. Н.В. Кузнецова, В.В. Митора, И.Е. Дубровского, Э.С. Карасиной. – М.: Энергия, 1973.

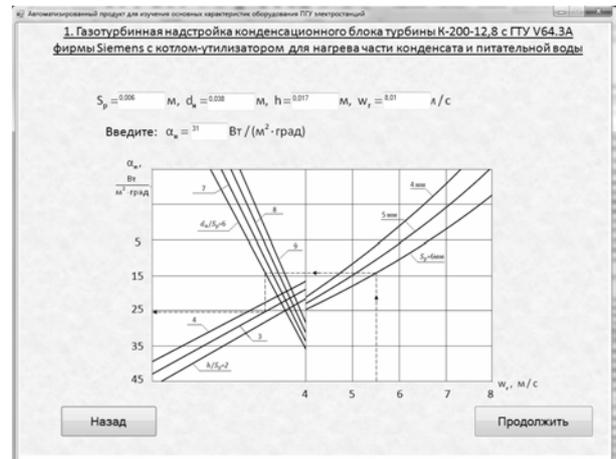


Рис. 10. Зависимость коэффициента теплоотдачи конвекцией от газов к поверхности нагрева от скорости потока и конструктивных характеристик пакета оребренных труб

По номограмме, построенной с использованием нормативного метода аэродинамического расчета котельных агрегатов², по средним значениям температуры и скорости газов в ЭНД определяется потеря динамического напора при прохождении газов одного ряда оребренного трубного пучка $\Delta P_{\text{тр}}$ (рис. 11). С учетом значений z_2 , $\Delta P_{\text{тр}}$ и соответствующих поправок находится величина аэродинамического сопротивления поверхности нагрева ЭНД потоку газов.

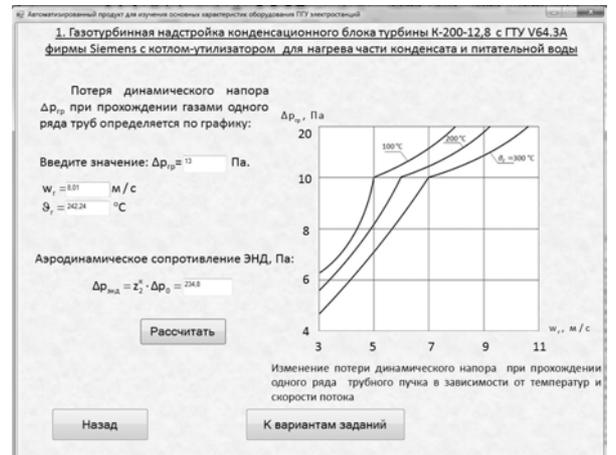


Рис. 11. Измерение потери динамического напора при прохождении газов одного ряда трубного пучка в зависимости от температуры и скорости потока

Результаты, полученные в ходе расчетного исследования, позволяют выполнить анализ зависимости основных показателей конкретной энергоустановки от определяющих факторов.

Разработка выполнена в операционной системе Windows с использованием программного продукта Microsoft Visual Studio Express.

² Аэродинамический расчет котельных агрегатов (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочина. – М.: Энергия, 1977.

Материал представлен с применением средств пакета Microsoft Office.

Иллюстрация текстового материала с использованием рисунков, схем, графиков способствует более эффективному усвоению дисциплины и повышает качество подготовки специалистов.

Программный продукт предназначен для занятий со студентами специальностей 140101 («Тепловые электрические станции»), 140503 («Паровые и газовые турбины»), 220201 («Системы управления»), 220301 («Автоматизация технологических процессов»).

Методически проработанный сценарий предлагаемого продукта отличается последовательностью и отвечает требованиям современной системы образования, повышает эффективность и скорость индивидуального обучения студентов энергетических специальностей.

Список литературы

1. **Нуждин В.Н., Кадамцева Г.Г.** Стратегическое управление качеством образования: учеб. пособие / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2003. – 88 с.
2. **Тотальное** управление качеством образования (часть 1): практическое руководство / В.Н. Нуждин, Г.Г. Кадамцева, Н.А. Дударева, Л.В. Пшеничная; Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2003. – 88 с.
3. **Шельгин Б.Л., Мошкарин А.В.** Котлы-утилизаторы парогазовых установок электростанций / Иван. гос. энерг. ун-т. – Иваново, 2012. – 284 с.
4. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2009615070. Автоматизированная обучающая система «Котлы-утилизаторы парогазовых установок ТЭС» / А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Н.С. Асташов. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 16.09.09.
5. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ №2010615703. Автоматизированная обучающая система «Режимы работы и эксплуатация котлов-утилизаторов электростанций» / А.В. Мошкарин, Б.Л. Шельгин, Т.А. Жамлиханов. Зарегистр. в реестре программ для ЭВМ 2.09.10.
6. **Анализ** направлений отечественной теплоэнергетики / А.В. Мошкарин, М.А. Девичкин, Б.Л. Шельгин и др.; под ред. А.В. Мошкарин. – Иваново, 2002.
7. **Основы** энергетики: курс лекций для студентов энергетических вузов / А.В. Мошкарин, М.А. Девичкин, Б.Л. Шельгин и др.; под ред. А.В. Мошкарин. В 2 ч. Ч. 1. Теплоэнергетика. – Иваново, 2005.

Шельгин Борис Леонидович,

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, профессор кафедры 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

Малков Евгений Сергеевич,

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, инженер кафедры 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

Преснов Евгений Константинович,

ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер кафедры 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

8. Шельгин Б.Л., Кулаков А.И., Елизаров А.А. Изучение характеристик оборудования ПГУ ТЭС с использованием ПЭВМ // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тез. докл. XVIII Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. В 4 т. Т. 4. – М.: Изд. дом МЭИ, 2012. – С. 184.

References

1. Nuzhdin, V.N., Kadamtseva, G.G. *Strategicheskoe upravlenie kachestvom obrazovaniya* [Strategic management of education quality]. Ivanovo, 2003. 88 p.
2. Nuzhdin, V.N., Kadamtseva, G.G., Dudareva, N.A., Pshenichnaya, L.V. *Total'noe upravlenie kachestvom obrazovaniya, chast' 1: prakticheskoye rukovodstvo* [Total Quality Management in Education, part 1: Practical Guide]. Ivanovo, 2003. 88 p.
3. Shelygin, B.L., Moshkarin, A.V. *Kotly-utilizatory parogazovykh ustanovok elektrostantsiy* [Recovery Boilers at Combined-Cycle Power Plants]. Ivanovo, 2012. 284 p.
4. Moshkarin, A.V., Shelygin, B.L., Astashov, N.S. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Avtomatizirovannaya obuchayushchaya sistema «Kotly-utilizatory parogazovykh ustanovok TES»* [Certificate of State Registration of Computer Program. Automated Teaching System «Heat Recovery Steam Generators of Combined-Cycle Power Plants»], no. 2009615070, 2009.
5. Moshkarin, A.V., Shelygin, B.L., Zhamlikhanov, T.A. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM. Avtomatizirovannaya obuchayushchaya sistema «Rezhimy raboty i ekspluatatsiya kotlov-utilizatorov elektrostantsiy»* [Certificate of State Registration of Computer Program. Automated teaching system «Operation modes and maintenance of heat recovery steam generators of power plants»], no. 2010615703, 2010.
6. Moshkarin, A.V., Devochkin, M.A., Shelygin, B.L. *Analiz napravleniy otechestvennoy teploenergetiki* [Analysis of thermal power engineering directions in Russia]. Ivanovo, 2002.
7. Moshkarin, A.V., Devochkin, M.A., Shelygin, B.L. *Osnovy energetiki v 2 ch., ch. 1. Teploenergetika* [Fundamentals of Power Engineering, in 2 parts, part 1. Thermal Power Engineering]. Ivanovo, 2005.
8. Shelygin, B.L., Kulakov, A.I., Elizarov, A.A. *Izucheniye kharakteristik oborudovaniya PGU TES s ispol'zovaniem PEVM* [Computer-Based Studying of Characteristics of Combined-Cycle Power Plant Equipment of Thermal Power Plants]. *Tezisy dokladov 18 Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov i aspirantov «Radioelektronika, elektrotekhnika i energetika» v 4 t., t. 4* [Proceedings of the XVIIIth International Scientific and Technical Conference of Students and Post-Graduate Students «Radio Electronics, Electrical Engineering and Power Engineering» in 4 vol., vol. 4]. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2012, pp. 184.

Колесов Илья Александрович,
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
студент кафедры тепловых электрических станций,
e-mail: admin@tes.ispu.ru