

УДК 621.311.22

Разработка и апробация метода идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: При эксплуатации паротурбинных установок используют энергетические характеристики конденсаторов, включающие зависимости давления отработавшего пара и недогрева охлаждающей воды до температуры насыщения в паровом пространстве конденсатора от его паровой нагрузки, температуры охлаждающей воды на входе и расхода охлаждающей воды. Энергетические характеристики могут быть получены в ходе тепловых испытаний, однако их проведение сопряжено с эксплуатационными затруднениями. Поэтому для разработки энергетических характеристик используют результаты поверочных тепловых расчетов конденсаторов. Опубликован ряд апробированных методик поверочного теплового расчета конденсаторов, но при решении практических задач для обеспечения приемлемой точности результатов необходима корректировка выбранной методики применительно к техническому состоянию конкретного объекта. В связи с этим актуальной для энергетической отрасли является задача разработки методики идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных, представленной результатами экспресс-испытаний конденсатора либо данными эксплуатационных наблюдений.

Методы и материалы: Используются опубликованные методики поверочного теплового расчета конденсаторов паровых турбин, методы экспериментальных исследований, математической статистики и теории вероятностей.

Результаты: Разработана методика идентификации математических моделей конденсаторов турбин по малой выборке экспериментальных данных, предусматривающая уточнение выбранной базовой методики поверочного теплового расчета путем введения поправочного множителя к коэффициенту теплопередачи. Поправочный множитель определяется по условию минимального рассогласования расчетных и экспериментальных значений показателей эффективности конденсатора для условий каждого из опытов, составляющих выборку экспериментальных данных, с последующей разработкой эмпирического обеспечения модели в виде статистической зависимости поправочного коэффициента от режимных или конструктивных факторов.

Выводы: Предложенная методика обеспечивает разработку по малой выборке экспериментальных данных математической модели конденсатора, позволяющей с приемлемой для решения практических задач точностью рассчитать энергетические характеристики конденсационной установки для условий эксплуатации конкретной паровой турбины.

Ключевые слова: конденсационная установка паровой турбины, методика поверочного теплового расчета, энергетические характеристики конденсатора паровой турбины, математическая модель, идентификация математической модели, адекватность математической модели, регрессионный анализ, множественная линейная регрессия, программный комплекс, тепловые испытания паровой турбины.

Development and testing of a method of identifying mathematical models of steam turbine condensers by a small sample of experimental data

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

Abstract

Background: Operation of steam turbines requires calculating condenser energy characteristics including the dependences of exhaust steam pressure and subcooling of cooling water to the saturation temperature in the condenser vapor space on the condenser vapor load, cooling water inlet temperature and flow rate. The energy characteristics can be obtained by thermal tests which, however, may be accompanied by operational difficulties. Therefore, energy characteristics are normally obtained by using the results of condenser confirmatory thermal calculations. A number of proven techniques of condenser confirmatory thermal calculations have been described in literature but all the techniques have to be adjusted to the real technical conditions of a certain facility in order to achieve acceptable accuracy of results in solving practical problems. Therefore, an urgent problem to be solved in the power industry is to develop a technique of identifying mathematical models of steam turbine condensers by a small sample of experimental data obtained by rapid tests or operational data observations.

Materials and methods: The study employed methods of steam turbine condenser confirmatory thermal calculations, methods of experimental studies, mathematical statistics and probability theory.

Results: A technique has been developed for identifying mathematical models of turbine condensers by a small sample of experimental data. The technique specifies the selected basic verification technique of thermal confirmatory calculation by introducing a correction factor to the heat transfer coefficient. The correction factor is determined by the condition

of the minimum mismatch between the calculated and experimental values of condenser efficiency indicators for the conditions of each experiment, constituting the sample of experimental data, with the subsequent collection of empirical data of the models as a statistical dependence of the correction factor on the regime or structural conditions.

Conclusions: The proposed technique can be used to develop a condenser mathematical model by a small sample of experimental data. It allows calculating the energy characteristics of the condensing unit in specific operating conditions of a certain steam turbine with the accuracy acceptable for solving practical problems.

Key words: steam turbine condensing unit, thermal confirmatory calculation technique, steam turbine condenser energy characteristics, mathematical model, mathematical model identification, mathematical model adequacy, regression analysis, multiple linear regression, software system, steam turbine thermal tests.

DOI: 10.17588/2072-2672.2017.1.005-010

Введение. При эксплуатации паровых турбин используют энергетические характеристики конденсаторов, включающие зависимости давления пара в переходном патрубке и недогрева охлаждающей воды до температуры насыщения в паровом пространстве конденсатора от его паровой нагрузки и температуры охлаждающей воды на входе при различных значениях расхода охлаждающей воды [1, 2]. Наиболее точно такие характеристики могут быть получены в ходе тепловых испытаний паровой турбины, в частности конденсационной установки. Однако проведение тепловых испытаний конденсаторов для разработки энергетических характеристик сопряжено с рядом затруднений: сложностью поддержания и измерения расхода охлаждающей воды через конденсатор, необходимостью распределения опытов по сезонам года для исследования всего эксплуатационного диапазона температур охлаждающей воды на входе в конденсатор, сложностью обеспечения требуемых расходов пара в конденсатор (поскольку турбины работают по графику электрической нагрузки, уровень которой определяется диспетчером оптового рынка электроэнергии и мощности). В таких условиях разработку энергетических характеристик конденсаторов турбин осуществляют по результатам их поверочных тепловых расчетов. Наилучших результатов для конденсаторов разных типов при этом позволяют достичь различные методики поверочного теплового расчета (МПТР): Всероссийского теплотехнического института (методика ВТИ); Калужского турбинного завода (методика КТЗ), Уральского политехнического института (методика УГТУ-УПИ) [2]. Существуют также вариации указанных методик. Следует отметить, например, методику ВТИ, усовершенствованную в Вятском государственном университете [3–5], позволяющую учитывать влияние режима работы основного эжектора на характеристики конденсатора. Тем не менее при решении практических задач требуется адаптация выбранной базовой методики поверочного теплового расчета к условиям работы и техническому состоянию конкретного конденсатора. Учитывая указанные сложности проведения тепловых испытаний конденсаторов, эта задача должна решаться с опорой на малую выборку экспериментальных данных, представленную результатами

экспресс-испытаний конденсатора либо данными эксплуатационных наблюдений.

Задачами настоящего исследования являются разработка методики идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных и апробация методики применительно к нескольким объектам с оценкой адекватности математической модели после идентификации.

Методы исследования. Основной проблемой при выполнении поверочного теплового расчета конденсатора является получение количественной оценки среднего по поверхности теплообмена коэффициента теплопередачи. Различные МПТР конденсаторов позволяют рассчитать значения указанной характеристики с той или иной степенью соответствия экспериментальным данным, что в определенной степени естественно и объясняется сложностью процессов, протекающих в конденсаторах. Критерием оценки совершенства МПТР является соответствие полученных при их использовании результатов данным испытаний конденсаторов, проведенных в условиях эксплуатации.

Опыт разработки энергетических характеристик конденсаторов позволяет заключить, что величины отклонений результатов расчета от экспериментальных данных как по абсолютному давлению в паровом пространстве p_k , так и по недогреву воды до температуры насыщения δt часто оказываются зависимыми от значений каких-либо режимных параметров или составленных из них комплексов. Такую зависимость можно установить, используя методы исследования остатков при разработке регрессионных зависимостей [6, 7]. Средний по поверхности теплообмена коэффициент теплопередачи K также зависит от режимных параметров, что позволяет записать функциональные зависимости для основных параметров энергетических характеристик в виде

$$p_k, \delta t = f_1(t_{1в}; W; D_k; K \cdot \Delta K); \Delta K = f_2(\Pi_i), \quad (1)$$

где под функцией f_1 понимается та или иная применяемая для конкретного конденсатора МПТР; $t_{1в}$ – температура охлаждающей воды перед конденсатором; W – расход охлаждающей воды; D_k – расход пара в конденсатор; ΔK – поправочный множитель к коэффициенту теплопередачи, учитывающий отклонение результатов расчета

от экспериментальных данных; f_2 – регрессионная зависимость, получаемая в ходе исследования остатков при анализе разностей расчетных и экспериментальных значений показателей энергетических характеристик конденсатора; Π_i – в принципе, любой конструктивный или режимный параметр работы конденсатора или составленный из них комплекс.

При такой постановке задачи одна и та же поправка ΔK влияет на рассогласование экспериментальных и расчетных значений как по p_k , так и по δt . Поэтому при определении функции f_2 необходимо в качестве критерия оптимизации использовать минимум некоторого составного критерия, учитывающего рассогласование экспериментальных и расчетных значений по двум разным параметрам при условиях одних и тех же опытов. Наиболее просто задача решается при использовании аддитивного $F_{\Sigma a}$ или мультипликативного $F_{\Sigma m}$ критериев оптимизации, записываемых в следующем виде:

$$F_{\Sigma a} = a(p_k^p - p_k^a)^2 + b(\delta t^p - \delta t^a)^2 \rightarrow \min;$$

$$F_{\Sigma m} = \left[(p_k^p - p_k^a)^2 \right]^c \left[(\delta t^p - \delta t^a)^2 \right]^d \rightarrow \min, \quad (2)$$

где a , b , c и d – положительные коэффициенты, определяющие вклад в критерий оптимизации рассогласований по p_k и δt ; индексы «р» и «а» указывают на расчетное и экспериментальное значения соответственно.

Выбор значений весовых коэффициентов a , b , c и d является отдельной задачей, при решении которой важно не допустить поглощения одним критерием другого. Выбор весовых коэффициентов является во многом интуитивным, т. е. субъективным.

Таким образом, задача идентификации математической модели конденсатора по результатам его натурных испытаний или эксплуатационных наблюдений состоит в следующем: для конденсатора с заданными конструктивными и эксплуатационными характеристиками требуется рассчитать параметры энергетических характеристик, обеспечив минимальное рассогласование между результатами их расчета и экспериментальными данными. Решение задачи предлагается выполнять в следующей последовательности.

1. *Выбор базовой МПТР конденсатора.* Процедура выбора базируется на представлении и опыте расчетчика либо может быть формализована с использованием методов статистического анализа данных, например, по критерию Фишера [6]. В последнем случае используются результаты натурных испытаний или эксплуатационных наблюдений, для каждого i -го из N опытов которых должны быть известны экспериментальные значения $t_{вi}^a$, W_i^a , D_{ki}^a , p_{ki}^a , δt_i^a . Для условий каждого опыта с использованием выбранной базовой МПТР необходимо получить

расчетные значения p_{ki}^p и δt_i^p . Далее выполняется проверка адекватности математической модели отдельно по расчету p_k и δt : вычисляются значения несмещенных оценок дисперсий относительно среднего \bar{S}_p^2 и $\bar{S}_{\delta t}^2$ [6, 7]; поскольку дисперсия воспроизводимости, как правило, не известна (получение данных в параллельных опытах затруднено из-за сложности поддержания режимных параметров работы конденсатора на заданном уровне), критерий Фишера рассчитывается через остаточную дисперсию $\bar{S}_{ост p}^2$ и $\bar{S}_{ост \delta t}^2$ (вычисляются при числе степеней свободы $(N - k)$, где $k = 3$ – количество факторов, включенных в модель); значения критериев Фишера по расчету абсолютного давления пара в конденсаторе $F_p = \bar{S}_p^2 / \bar{S}_{ост p}^2$ и расчету конечного температурного напора конденсатора $F_{\delta t} = \bar{S}_{\delta t}^2 / \bar{S}_{ост \delta t}^2$ сравниваются с критическими значениями критерия Фишера, полученными при числе степеней свободы $v_1 = N - 1$, $v_2 = N - k$ и выбранном уровне значимости α (обычно $\alpha = 0,05$) [6, 7]. В ходе анализа возможны ситуации, при которых модель может оказаться адекватной только по одной из функций отклика, являться неадекватной или адекватной по обоим функциям отклика. В первых двух случаях выбор МПТР для дальнейших расчетов сводится к субъективной оценке расчетчика.

2. *Идентификация математической модели по условиям опытов.* Используется выбранная в качестве базовой МПТР с той разницей, что при условиях каждого i -го опыта к коэффициенту теплопередачи K_i вводится поправочный множитель ΔK_i , вычисляемый в соответствии с принятым критерием оптимизации (2).

3. *Разработка эмпирического обеспечения модели.* Под разработкой эмпирического обеспечения модели понимается нахождение зависимости вычисленного на предшествующем этапе параметра идентификации ΔK от какого-либо режимного, конструктивного параметра конденсатора или комплекса, составленного из нескольких параметров. В общем случае эту зависимость можно представить, например, в мультипликативном виде: $\Delta K = m_0 \Pi_1^{m_1} \Pi_2^{m_2} \Pi_3^{m_3} \dots \Pi_d^{m_d}$, где d – количество выбранных факторов Π_i ; m_0 , m_1 , m_2 , m_3 ... m_d – коэффициенты регрессии. Нахождение значений коэффициентов регрессии осуществляется методами множественной линейной регрессии после логарифмирования приведенного выражения для ΔK [6, 7].

4. *Проверка адекватности идентифицированной математической модели* – базовой МПТР с введением поправки ΔK к коэффициенту теплопередачи, рассчитываемой по полученному на предшествующем этапе уравнению регрессии.

Проверка адекватности производится по критерию Фишера аналогично процедуре, описанной в п. 1.

Предложенная методика реализована в прикладном программном комплексе «Поверочный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин»¹.

Результаты исследования. Пример 1.

Рассмотрим результаты использования предложенной методики для построения энергетических характеристик конденсатора турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп ТМЗ Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, по которому ранее нами проведены тепловые испытания по первой категории сложности [8], т.е. получены экспериментальные данные, характеризующиеся относительно высокими показателями точности и прецизионности.

Выбор базовой МПТР и ее идентификация выполнены не по результатам проведенных испытаний, а по данным эксплуатационных наблюдений – выборке фактических показателей работы установки за месяц, предшествующий проведению испытаний; выборку составили данные по 32 опытам, при этом выбирались режимы, отличающиеся паровой нагрузкой конденсатора, расходом охлаждающей воды и ее температурой за градирнями (на входе в конденсатор). Собственно результаты тепловых испытаний [8], в которых отражены показатели работы конденсационной установки в 92 опытах, использованы впоследствии для оценки адекватности модели, полученной по указанной малой выборке эксплуатационных данных.

В качестве базовой МПТР выбрана методика ВТИ при нормативном коэффициенте чистоты поверхности теплообмена конденсатора, равном 0,785, поскольку при критическом значении критерия Фишера 1,84 адекватность рассмотренных базовых МПТР характеризуется следующими значениями критерия Фишера по давлению в конденсаторе: методика ВТИ – 1,65; методика КТЗ – 1,39; методика УГТУ-УПИ – 1,01. При идентификации базовой МПТР в качестве определяющих факторов, согласно опубликованным данным А.Г. Шемпелева, П.В. Иглина [3–5], выбран единственный параметр – удельная тепловая нагрузка конденсатора q . При вычислении значений поправочных множителей ΔK_i , отраженных на рис. 1, в качестве критерия оптимизации использован аддитивный критерий $F_{\Sigma a}$ (2), весовые коэффициенты a и b в котором приняты равными единице (при измерении давления в килопаскалях отклонения $(p_k^p - p_k^a)$ и $(\delta t^p - \delta t^a)$ сопоставимы по величине). Эмпирическое обеспечение модели представлено в данном случае полиномом третьего порядка, уравнение которого приведено на рис. 1.

Результаты расчета энергетических характеристик конденсатора по базовой МПТР после введения в нее найденной для поправочного ко-

эффициента зависимости $\Delta K = f(q)$ приведены на рис. 2. Для полученной таким образом модели выполнена проверка адекватности по критерию Фишера в два этапа: 1) при использовании в качестве экспериментальных данных тех же результатов эксплуатационных наблюдений в 32 опытах, по которым выполнена идентификация модели; при этом модель признана адекватной как по расчету p_k , так и по расчету δt (критерии Фишера составили, соответственно, 42,7 и 15,1 при критическом значении 1,84); 2) при использовании данных проведенных тепловых испытаний турбины в 92 опытах [8], не задействованных на этапе идентификации математической модели; при этом модель также признана адекватной (критерии Фишера составили, соответственно, 28,6 и 8,4 при критическом значении 1,42).

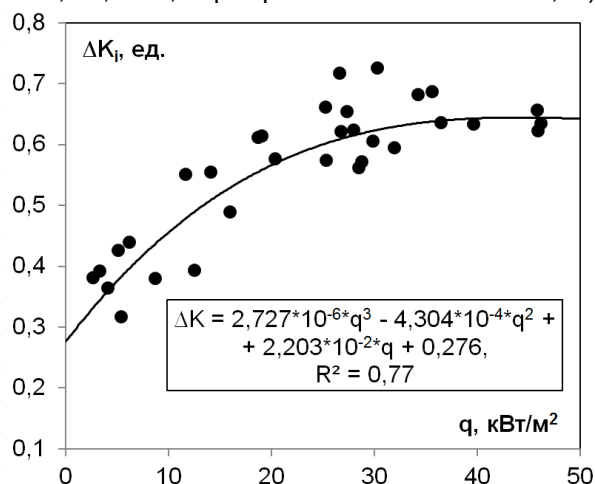


Рис. 1. Значения поправочного множителя ΔK_i , ед., к коэффициенту теплопередачи, рассчитываемому по базовой МПТР, в зависимости от удельной тепловой нагрузки конденсатора q , кВт/м²: точки – результаты расчета при условиях разных опытов; линия – аппроксимация опытных данных (метод наименьших квадратов)

Пример 2. Аналогичные рассмотренным в примере 1 результаты получены по конденсатору КП-540/2 турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ с той разницей, что в качестве базовой МПТР в этом случае принята методика УГТУ-УПИ. Значения поправочного множителя ΔK_i в имеющихся 13 опытах, принятая для дальнейших расчетов аппроксимирующая зависимость $\Delta K = f(q)$, а также результаты расчета энергетических характеристик конденсатора в эксплуатационном диапазоне температур воды перед конденсатором приведены на рис. 3. Идентифицированная по результатам испытаний базовая МПТР признана адекватной: при критическом значении критерия Фишера 2,84 значения критерия Фишера по расчету p_k и δt составили соответственно 153,7 и 17,2.

¹ Свидетельство о государственной регистрации № 2012611328 от 01.02.2012 г.

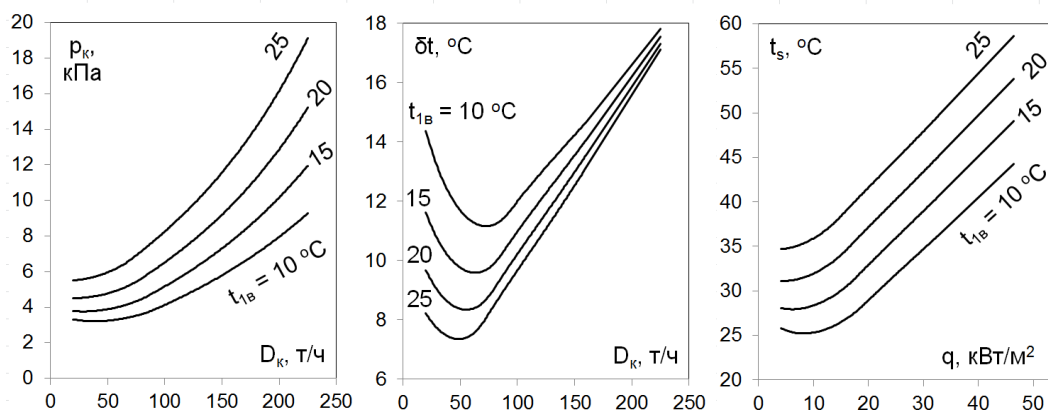


Рис. 2. Энергетические характеристики конденсатора КГ1-3100 турбоагрегата Тп-115/125-130-1тп ТМЗ, рассчитанные по базовой МПТР с введением поправочного множителя к коэффициенту теплопередачи $\Delta K = f(q)$ при $W = 7500 \text{ м}^3/\text{ч}$ в эксплуатационном диапазоне температуры охлаждающей воды перед конденсатором: t_s – температура насыщения при расчетном давлении в конденсаторе

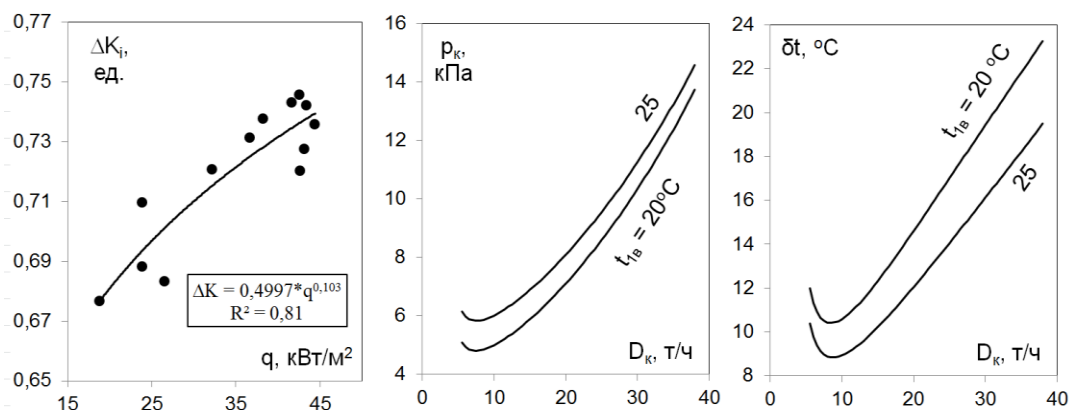


Рис. 3. Результаты расчета энергетических характеристик конденсатора КП-540/2 турбоагрегата ПТ-12-35/10М КТЗ: обозначения соответствуют рис. 1 и 2

Выводы. Проведенные исследования доказывают применимость предложенной методики построения энергетических характеристик конденсатора по малой выборке экспериментальных данных. Необходимо отметить, что полученный характер зависимости $t_s = f(q)$ качественно соответствует данным других авторов [3–5], указывающим на наличие двух характерных зон режимной характеристики конденсатора. Излом характеристик при малых значениях q объясняется относительно большим влиянием присосов воздуха в вакуумную систему турбоустановки.

Таким образом, разработанная методика и средства ее компьютерной поддержки в виде прикладного программного комплекса «Поворотный тепловой расчет и обработка результатов испытаний конденсаторов паровых турбин» могут быть рекомендованы для решения задач разработки математических моделей конденсаторов паровых турбин с учетом их фактического технического состояния и условий эксплуатации, а также для разработки энергетических характеристик конденсационных установок.

Список литературы

1. Сахаров А.М. Тепловые испытания паровых турбин. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 238 с.

2. Теплообменники энергетических установок / К.Э. Аронсон, С.Н. Блинков, В.И. Брезгин и др.; под ред. Ю.М. Бродова. – Екатеринбург: Изд-во «Сократ», 2002. – 968 с.

3. Шемпелев А.Г., Сущих В.М., Иглин П.В. О результатах сопоставления расчетных и нормативных характеристик конденсаторов паротурбинных установок в широком диапазоне их паровых нагрузок // Энергетик. – 2015. – № 10. – С. 60–64.

4. Enhancement of the performance of advanced cogeneration turbines / E.I. Efros, L.L. Simoyu, V.P. Lagun, V.F. Gutorov, A.G. Shempelev // Thermal Engineering. – 1999. – Т. 46, № 8. – P. 685–690.

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

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

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

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

References

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

2. Aronson, K.E., Blinkov, S.N., Brezgin, V.I., Brodov, Yu.M., Kuptsov, V.K., Larionov, I.D., Nirinshtein, M.A., Plotnikov, P.N., Ryabchikov, A.Yu. *Теплообменники энергетических установок* [Heat exchangers of power plants]. Ekaterinburg, Izdatel'stvo «Sokrat», 2002. 968 p.
3. Shempelev, A.G., Sushchikh, V.M., Iglin, P.V. *Energetik*, 2015, issue 10, pp. 60–64.
4. Simoyu, L.L., Lagun, V.P., Efros, E.I., Shempelev, A.G. *Thermal Engineering*, 1999, vol. 46, issue 8, pp. 685–690.
5. Brodov, Yu.M., Aronson, K.E., Shempelev, A.G., Khaet, S.I. *Thermal Engineering*, 2003, vol. 50, issue 7, pp. 594–597.

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

Ледуховский Григорий Васильевич,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,
телефоны: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru

Ledukhovskiy Grigory Vasilyevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor of Heat Power Plants Department,
address: Ivanovo, No. 34, Rabfakovskaya St., Building V, Room 408,
tel.: (4932) 41-60-56, 26-99-31,
e-mail: lgv83@yandex.ru