

## **РАЗРАБОТКА ДИАГРАММЫ РЕЖИМОВ ТУРБОАГРЕГАТА ТП-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ ПРИ РАБОТЕ В ТЕПЛОФИКАЦИОННОМ РЕЖИМЕ С ОДНОСТУПЕНЧАТЫМ ПОДОГРЕВОМ СЕТЕВОЙ ВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Г.В. ЛЕДУХОВСКИЙ, А.А. ПОСПЕЛОВ, М.Ю. ЗОРИН, кандидаты техн. наук,  
Н.С. АСТАШОВ, И.Б. ВОЛКОВ, Г.Б. КОМИССАР, инженеры

**Изложены особенности построения диаграммы режимов турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в режиме с регулируемым теплофикационным отбором пара при одноступенчатом подогреве сетевой воды на основе результатов тепловых испытаний, проведенных в условиях Йошкар-Олинской ТЭЦ-2.**

*Ключевые слова:* паровая турбина, теплофикационная установка, регулируемый отбор пара, натурные испытания оборудования, диаграмма режимов.

## **DEVELOPING STEAM-CONSUMPTION DIAGRAM OF TURBINE TP-115/125-130-1TP PO TMZ WHILE OPERATING IN HEAT-EXTRACTION MODE WITH SINGLE-STAGE HEATING OF DELIVERY WATER BASED ON HEAT RUN RESULTS**

G.V. LEDUHOVSKY, A.A. POSPELOV, M.Y. ZORIN, Candidates of Engineering,  
N.S. ASTASHOV, I.B. VOLKOV, G.B. KOMISSAR, Engineers

**The authors present development peculiarities of the steam-consumption diagram of Turbine Тр-115/125-130-1tp PO TMZ operated in the heat-extraction mode with a single-stage heating of delivery water based on the heat run results obtained at Heat Power Plant 2 in Yoshkar-Ola.**

*Key words:* steam turbine, extraction turbine, steam extraction, heat run, steam-consumption diagram.

Ранее [1, 2] были опубликованы результаты «вакуумных» испытаний турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, а также результаты испытаний и порядок построения диаграммы режимов при работе этой турбоустановки в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды (далее – режим «Т-2»). По этой причине опустим описание собственно турбоагрегата и его тепловой схемы, методики проведения испытаний, их метрологического обеспечения и общего порядка первичной обработки результатов измерения контролируемых в ходе испытаний технологических параметров. Ниже сосредоточимся на основных результатах испытаний турбоагрегата при его работе в теплофикационном режиме с одноступенчатым подогревом сетевой воды (далее – режим «Т-1») по тепловому и электрическому графикам нагрузок и некоторых особенностях разработки на их основе диаграммы режимов.

Программа испытаний турбоагрегата в режиме «Т-1» предусматривала проведение 21 опыта при работе по тепловому графику нагрузок, а также трех серий по пять опытов в каждой при работе по электрическому графику нагрузок. Порядок обработки результатов испытаний для режима «Т-1» в целом соответствует алгоритмам, использованным при обработке результатов испытаний турбоустановки при её работе в режиме «Т-2» [2]. Отличия обусловлены, во-первых, отсутствием необходимости учета поправки к мощности на отклонение температуры обратной сетевой воды перед нижним сетевым подогревателем от номинального значения, поскольку эта поправка характеризует изменение

внутренней мощности промежуточного отсека турбины только при двухступенчатом подогреве сетевой воды, и, во-вторых, особенностями работы части низкого давления (ЧНД) рассматриваемого турбоагрегата в режимах теплового графика, на которых следует остановиться подробнее.

Опыты при работе по тепловому графику нагрузок были проведены при степени открытия регулирующей диафрагмы части низкого давления 10 мм (по указателю положения сервомотора), поскольку полное закрытие регулирующей диафрагмы приводило к недопустимому уменьшению пропуска пара в конденсатор с соответствующим перегревом металла выхлопного патрубка и непрерывным увеличением разности температур металла выхлопного патрубка слева и справа. В ходе обработки результатов испытаний выяснилось, что неполное закрытие регулирующей диафрагмы ЧНД в опытах при работе в режиме «Т-1» по тепловому графику нагрузок привело к появлению увеличенных в сравнении с режимом «Т-2» разбросов опытных точек в нижнем квадранте диаграммы режимов.

Анализ причин появления указанных разбросов позволил заключить, что частично открытая регулирующая диафрагма ЧНД, хотя ее сервомотор в режимах теплового графика и не был задействован в системе регулирования, допускала некоторые перемещения из-за наличия естественных люфтов в приводе. Это, в свою очередь, приводило к периодическим изменениям пропуска пара в ЧНД и, соответственно, к некоторому изменению электрической и тепловой нагрузок турбоагрегата.

Для режима «Т-2» эта особенность не привела к заметному ухудшению качества резуль-

татов испытаний, что, видимо, связано с меньшей неравномерностью потока пара перед регулирующей диафрагмой, чем в режиме «Т-1», и, соответственно, меньшими колебаниями регулирующей диафрагмы в опытах. Напротив, отключение верхнего теплофикационного отбора и передача всей тепловой нагрузки на нижний теплофикационный отбор, т. е. переход из режима «Т-2» в режим «Т-1», увеличивали неравномерность поля скоростей пара в выходном сечении последней ступени промежуточного отсека, т. е. перед регулирующей диафрагмой, что увеличивало и неравномерность динамического воздействия потока пара на нее.

Сделанный вывод подтверждает опытная зависимость пропускания пара в ЧНД от давления пара в камере нижнего теплофикационного отбора (рис. 1): опытные точки для режима «Т-2» ближе расположены к прямой, выходящей из начала координат (такая зависимость соответствует физической сущности процесса). Среднеквадратичное отклонение по опытным точкам режима «Т-2» составляет 0,3 т/ч, а по опытным точкам режима «Т-1» – 1,8 т/ч, т. е. в 6 раз больше.

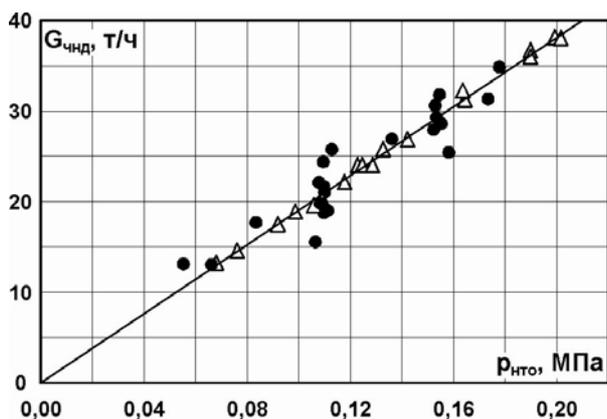


Рис. 1. Опытная зависимость расхода пара в ЧНД от давления пара в камере нижнего теплофикационного отбора в режимах работы по тепловому графику нагрузок:  $G_{\text{ЧНД}}$  – расход пара в ЧНД, т/ч;  $p_{\text{нто}}$  – абсолютное давление пара в камере нижнего теплофикационного отбора, МПа; ● и Δ – опытные данные при работе в режимах соответственно «Т-1» и «Т-2»; линия – линейная аппроксимация опытных данных

Указанная особенность привела к необходимости расчета при обработке результатов испытаний поправки к тепловой нагрузке регулируемого теплофикационного отбора  $\Delta Q_{\text{т}}$ , Гкал/ч, на отклонение фактического пропускания пара в ЧНД от номинального:

$$\Delta Q_{\text{т}} = (G_{\text{ЧНД}} - G_{\text{ЧНД}}^{\text{ном}})(h_{\text{нто}} - h_{\text{кп}}^{\text{ПСГ-1}}) \cdot 10^{-3},$$

где  $G_{\text{ЧНД}}$  – расход пара в ЧНД в условиях опыта, т/ч;  $G_{\text{ЧНД}}^{\text{ном}}$  – то же, с приведением к номинальным условиям, т/ч;  $h_{\text{нто}}$  – энтальпия пара в камере нижнего теплофикационного отбора в условиях опыта, ккал/кг;  $h_{\text{кп}}^{\text{ПСГ-1}}$  – энтальпия конденсата греющего пара нижнего сетевого подогревателя (ПСГ-1) в условиях опыта, ккал/кг.

В качестве номинального расхода пара в ЧНД  $G_{\text{ЧНД}}^{\text{ном}}$  в зависимости от давления пара перед регулирующей диафрагмой  $p_{\text{нто}}$  в условиях опыта принята линейная аппроксимация опытных данных (рис. 1).

Рассчитанная таким образом поправка суммировалась с опытным значением тепловой нагрузки теплофикационного отбора, в результате чего определялась тепловая нагрузка в условиях опыта, приведенная к номинальным условиям, которая и использовалась при построении диаграммы режимов.

По результатам обработки опытных данных построены основные зависимости диаграммы режимов работы турбоагрегата в теплофикационном режиме с одноступенчатым подогревом сетевой воды – линии, описывающие работу по тепловому графику нагрузок (рис. 2). Эти зависимости приведены к следующим основным номинальным условиям:

- номинальной тепловой схеме с полностью подключенной системой регенерации (кроме регенеративного подогревателя низкого давления № 1, связанного по конденсату греющего пара с верхним сетевым подогревателем и поэтому отключенного при работе в режиме «Т-1») со снабжением деаэратора питательной воды паром от стороннего источника при отсутствии отпуска пара из ограниченного регулируемого производственного отбора;

- абсолютному давлению 12,553 МПа (128 кгс/см<sup>2</sup>) и температуре свежего пара перед стопорным клапаном 550 °С; абсолютному давлению отработавшего пара в конденсаторе 0,004903 МПа (0,05 кгс/см<sup>2</sup>); абсолютному давлению в деаэраторе 0,588 МПа (6,0 кгс/см<sup>2</sup>).

Учтены следующие ограничения по турبوустановке: максимальный расход свежего пара 500 т/ч; максимальная электрическая мощность (ввиду установки турбогенератора непроектной марки) 121 МВт; номинальная тепловая нагрузка 209,34 МВт (180 Гкал/ч); максимальная тепловая нагрузка 238,42 МВт (205 Гкал/ч); максимальный расход пара в ЧНД 225 т/ч.

В отличие от диаграммы режимов при двухступенчатом подогреве сетевой воды [2], полученную диаграмму режимов при одноступенчатым подогревом сетевой воды нельзя сопоставить с данными завода-изготовителя ввиду отсутствия последних, поэтому необходимость перестроения опытной диаграммы режимов к условиям полностью закрытой регулирующей диафрагмы ЧНД отсутствовала.

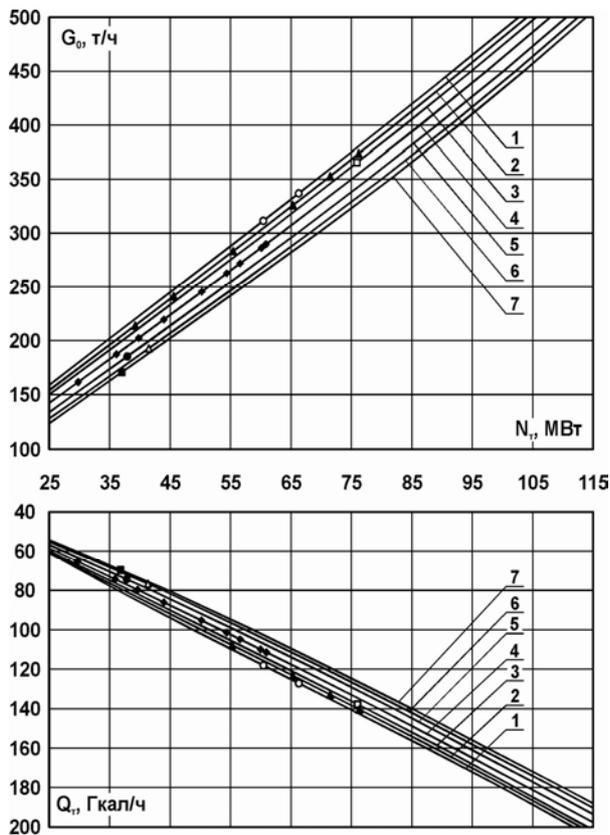


Рис. 2. Опытная диаграмма режимов работы турбоагрегата при одноступенчатом подогреве сетевой воды и работе по тепловому графику нагрузок:  $G_0$  – расход свежего пара, т/ч;  $N_t$  – электрическая мощность, МВт;  $Q_t$  – тепловая нагрузка регулируемого теплофикационного отбора; условия построения указаны в тексте, Гкал/ч; точки – опытные данные; линии – аппроксимация опытных данных;  $p_{HTO}$  – абсолютное давление пара в камере нижнего теплофикационного отбора, МПа ( $\text{кгс/см}^2$ ):  $\circ$  и 1 – 0,174 (1,774);  $\blacktriangle$  и 2 – 0,153 (1,560);  $\square$  и 3 – 0,135 (1,375);  $\blacklozenge$  и 4 – 0,109 (1,107);  $\bullet$  и 5 – 0,082 (0,841);  $\triangle$  и 6 – 0,065 (0,667);  $\blacksquare$  и 7 – 0,055 (0,558)

По результатам опытов при работе турбоагрегата по электрическому графику нагрузок рассчитаны значения коэффициента прироста электрической мощности на единицу изменения тепловой нагрузки регулируемого теплофикационного отбора  $K_3$ , кВт·ч/Гкал, при трех значениях давления пара в камере нижнего теплофикационного отбора (рис. 3).

Как было установлено в ходе обработки результатов испытаний при работе в режиме «Т-2» [2], для испытуемого турбоагрегата характерна существенная зависимость  $K_3$  от давления пара в камере регулируемого теплофикационного отбора, что требует расчета не одного значения  $K_3$ , а осреднения его на нескольких интервалах изменения давления в камере отбора.

Для режима «Т-2» в зоне малых значений давления пара в отборе это удалось сделать методом сопоставления данных по конденсационному и теплофикационному режимам при одних и тех же значениях давления пара в камере верхнего теплофикационного отбора [2]. Для проведения подобных расчетов по режиму «Т-1» требовались данные по давлению пара в камере нижнего теплофикационного отбора при работе

в конденсационном режиме, которые, как оказалось при обработке результатов испытаний, обладали низкой точностью.

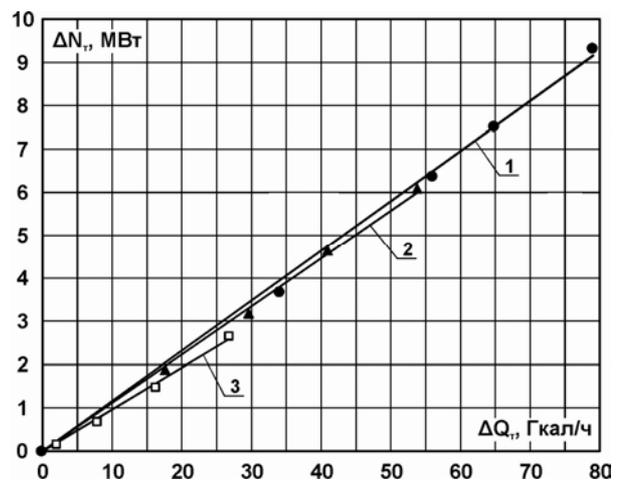


Рис. 3. Опытные зависимости прироста электрической мощности при изменении тепловой нагрузки теплофикационного отбора турбоагрегата при одноступенчатом подогреве сетевой воды и работе по электрическому графику нагрузок:  $\Delta N_t$  – прирост электрической мощности, МВт;  $\Delta Q_t$  – изменение тепловой нагрузки регулируемого теплофикационного отбора, Гкал/ч; прочие обозначения те же, что на рис. 2;  $p_{HTO}$ , МПа ( $\text{кгс/см}^2$ ):  $\bullet$  и 1 – 0,152 (1,555);  $\blacktriangle$  и 2 – 0,112 (1,141);  $\square$  и 3 – 0,064 (0,656)

По этой причине значения  $K_3$  в зоне не обеспеченных испытаниями давлений пара в камере нижнего теплофикационного отбора в режиме «Т-1» определены на основе расчетного анализа показателей работы промежуточного отсека и ЧНД турбины. В итоге получены следующие усредненные значения  $K_3$ , использованные при построении линий постоянной электрической мощности в нижнем квадранте диаграммы режимов (рис. 4): при  $p_{HTO} < 0,0686$  МПа ( $0,7 \text{ кгс/см}^2$ )  $K_3 = 93,5 \text{ кВт·ч/Гкал}$ ; при  $p_{HTO} \geq 0,0686$  МПа ( $0,7 \text{ кгс/см}^2$ )  $K_3 = 111,3 \text{ кВт·ч/Гкал}$ .

Полученные в ходе обработки результатов испытаний графические зависимости, включая диаграмму режимов, необходимы для последующего расчета энергетических характеристик турбоустановки – зависимостей удельного расхода тепловой энергии брутто на выработку электроэнергии. Учитывая, что турбоагрегат типа Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ в настоящее время широко не распространен, но является перспективной разработкой Уральского турбомоторного завода, полученные в испытаниях данные могут быть полезны при организации эксплуатации не только на Йошкар-Олинской ТЭЦ-2, но и на других электростанциях, эксплуатирующих турбоагрегаты рассматриваемого типа. Это обеспечит существенную экономию затрат времени и ресурсов на индивидуальные испытания турбоустановок до момента разработки соответствующих типовых энергетических характеристик.

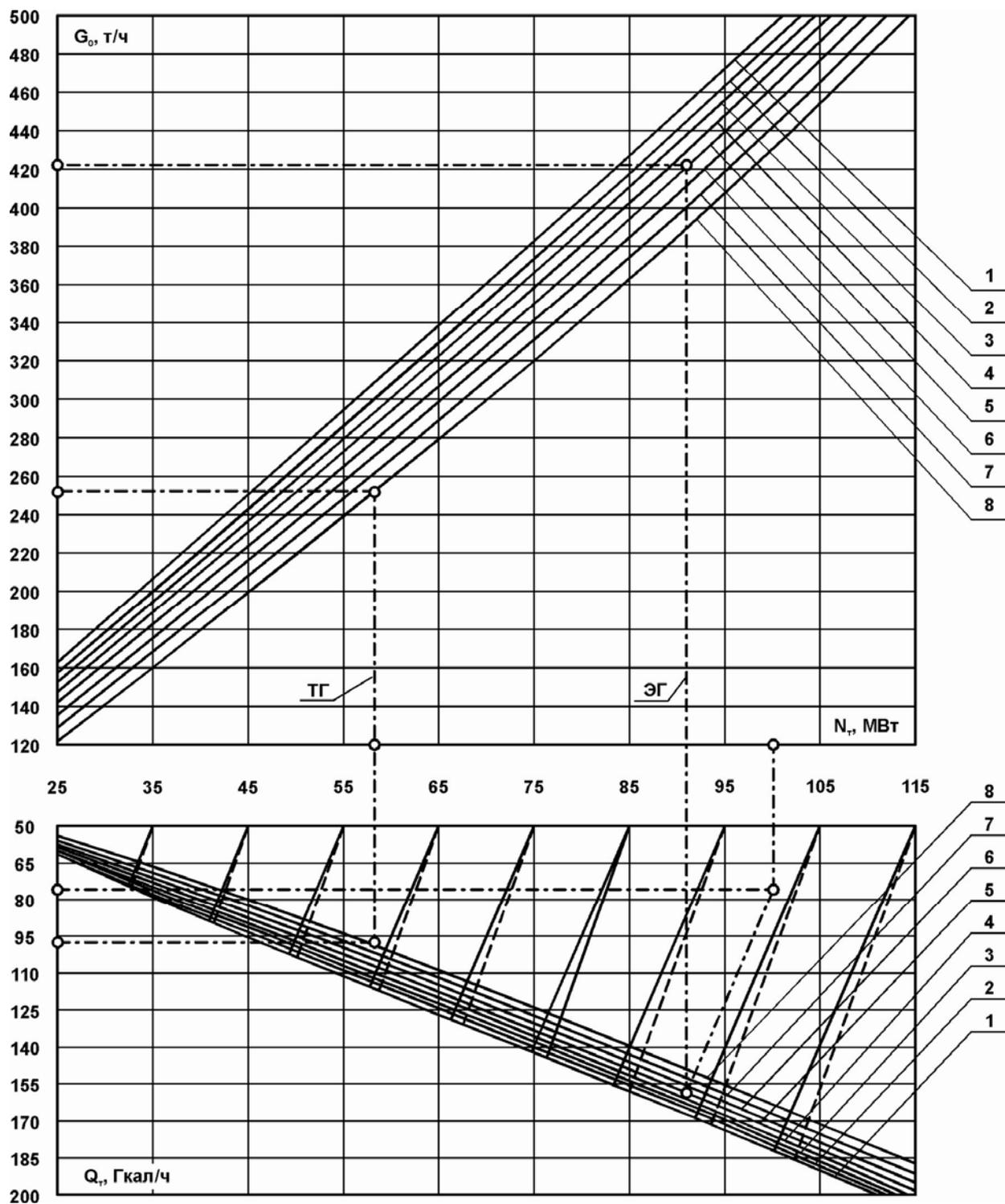


Рис. 4. Опытная диаграмма режимов работы турбоагрегата при одноступенчатом подогреве сетевой воды: линии постоянной электрической мощности в нижнем квадранте: сплошные –  $p_{\text{нто}} \geq 0,0686$  МПа ( $0,7$  кгс/см<sup>2</sup>), штриховые –  $p_{\text{нто}} < 0,0686$  МПа ( $0,7$  кгс/см<sup>2</sup>);  $p_{\text{нто}}$ , МПа (кгс/см<sup>2</sup>): 1 – 0,196 (2,0); 2 – 0,167 (1,7); 3 – 0,147 (1,5); 4 – 0,127 (1,3); 5 – 0,108 (1,1); 6 – 0,088 (0,9); 7 – 0,069 (0,7); 8 – 0,049 (0,5); штрихпунктирными линиями показаны примеры пользования диаграммой режимов (ТГ и ЭГ – при работе соответственно по тепловому и электрическому графикам нагрузок); прочие обозначения те же, что на рис. 2

#### Список литературы

1. **Экспериментальное** определение сетки поправок к мощности турбины Тп-115/125-130-1ТП УТМЗ на отклонение давления отработавшего пара в конденсаторе / Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов, М.Ю. Зорин и др. // Вестник ИГЭУ. – 2010. – Вып. 4. – С. 4–9.

2. **Испытания** турбоагрегата Тп-115/125-130-1ТП ПО ТМЗ при работе в теплофикационном режиме с двухступенчатым подогревом сетевой воды с целью построения диаграммы режимов / Г.В. Ледуховский, А.А. Поспелов, Н.С. Асташов и др. // Вестник ИГЭУ. – 2011. – Вып. 2. – С. 3–10.

*Ледуховский Григорий Васильевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон 8-910-698-99-90,  
e-mail: [lqv83@yandex.ru](mailto:lqv83@yandex.ru)

*Поспелов Анатолий Алексеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон 8-910-698-99-87,  
e-mail: [admin@tes.ispu.ru](mailto:admin@tes.ispu.ru)

*Зорин Михаил Юрьевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон 8-910-698-99-86,  
e-mail: [admin@tes.ispu.ru](mailto:admin@tes.ispu.ru)

*Асташов Николай Сергеевич,*

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина»,  
ассистент кафедры тепловых электрических станций,  
адрес: г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34, кор. В, ауд. 408,  
телефон 8-961-128-75-57,  
e-mail: [admin@tes.ispu.ru](mailto:admin@tes.ispu.ru)

*Волков Игорь Борисович,*

Филиал ОАО «ТГК-5» «Марий Эл и Чувашии», Йошкар-Олинская ТЭЦ-2,  
начальник котлотурбинного цеха,  
адрес: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Крылова, д. 47, ТЭЦ-2

*Комиссар Геннадий Борисович,*

Филиал ОАО «ТГК-5» «Марий Эл и Чувашии», Йошкар-Олинская ТЭЦ-2,  
заместитель начальника котлотурбинного цеха по эксплуатации,  
адрес: Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Крылова, д. 47, ТЭЦ-2