

Татаринова Наталья Владимировна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ
ТУРБОУСТАНОВОК ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ПОВЫШЕНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ТЭЦ**

05.04.12 – Турбомашинны и комбинированные турбоустановки

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Екатеринбург – 2014

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы (работы). Формирование рыночных отношений в энергетике обострило вопросы коммерческой эффективности теплоэлектростанций (ТЭС). Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения технико-экономических показателей работы ТЭС (при массовом старении установленного основного оборудования) в современных условиях и недостаточной разработкой вопросов, касающихся моделей тепловых процессов в теплофикационных паротурбинных установках, способов адекватной оценки переменных режимов их работы и тактических подходов к оптимизации их эксплуатации.

Работа выполнена в соответствии с утвержденными на Федеральном уровне Приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники РФ (пункт 08 – Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика) и Перечнем критических технологий РФ (пункт 27 – Технологии энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе).

Объект исследования. В качестве объекта исследования определены теплофикационные паротурбинные установки в составе действующих ТЭС.

Предмет исследования – режимы работы и параметры теплофикационных турбоустановок, энергетические и технико-экономические показатели их эффективности.

Цель исследования – разработка, научное обоснование и практическая реализация методов математического моделирования теплофикационных паротурбинных установок для решения задач исследования и повышения энергетической эффективности работы ТЭС.

Для достижения указанной цели поставлены следующие **задачи, решение которых выносятся на защиту.**

1. Анализ объектов исследования и разработка (обоснование) новых, более совершенных математических моделей и методик исследования переменных режимов работы теплофикационных турбоустановок на основе реальных энергетических характеристик турбинных отсеков и вспомогательного оборудования по результатам обобщения экспериментального материала и данных промышленных испытаний.

2. Совершенствование вычислительных методов математического моделирования, а именно методики решения системы нелинейных уравнений большой размерности (с числом независимых переменных более 50), проведение модерни-

зации существующих алгоритмов и численных методов применительно к расчету режимов работы теплофикационных турбоустановок.

3. Выполнение сравнительного анализа результатов расчетных исследований энергетической эффективности переменных режимов работы теплофикационных турбоустановок с использованием разработанных автором математических моделей с результатами расчетов, полученных на основе типовых нормативных характеристик.

4. Демонстрация применимости разработанных математических моделей для проведения детальных расчетно-экспериментальных исследований энергетической эффективности различных способов эксплуатации ТЭЦ (в частности, способов получения дополнительной и пиковой мощности, перехода с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды и др.); разработка и обоснование рекомендаций по совершенствованию эксплуатации оборудования и описание области их применения.

5. Проведение комплексных расчетных исследований, ориентированных на выявление резервов повышения энергетической эффективности работы ТЭЦ за счет оптимизации распределения нагрузок и совершенствования тепловых схем турбоустановок ТЭЦ.

6. Проведение исследований на математических моделях теплофикационных турбоустановок возможного влияния учета процессной влаги на технико-экономические показатели их работы в условиях эксплуатации.

7. Апробация результатов работы на ряде ТЭЦ и подтверждение эффективности этих результатов экспериментальными данными.

Научная новизна работы обоснована тем, что:

- разработан и исследован новый комплексный подход к оценке энергетической эффективности работы ТЭЦ на основе математического моделирования, позволяющий дать теоретическое обоснование предлагаемых решений по эксплуатации ТЭЦ и возможность исследования влияния таких факторов на экономичность работы, которые затруднительно осуществить в результате натурного моделирования;

- впервые разработаны математические модели теплофикационных турбоустановок различных типов (Т-185/220-130, Т-180/210-130, Т-100/120-130, Т-50/60-130, ПТ-80/100-130/13, ПТ-60/75-130/13) на базе реальных энергетических характеристик ступеней и отсеков турбин, позволяющих производить полный тепловой расчет во всем возможном диапазоне режимов их работы, включая вентиляционные,

что вносит существенный вклад в расширение представлений о процессах, происходящих в турбинных ступенях;

- разработана и обоснована усовершенствованная методика решения системы нелинейных уравнений с большим числом независимых переменных (более 50) применительно к расчету режимов работы теплофикационных турбоустановок, проведено уточнение существующих алгоритмов и численных методов, что обеспечило получение новых результатов по теме диссертации;

- на основе расчетных исследований на математических моделях получена количественная оценка наиболее эффективных режимов работы теплофикационных турбоустановок в периоды пиковых и частичных нагрузок в заданных условиях эксплуатации ТЭЦ;

- разработаны и обоснованы рекомендации, относящиеся к оптимизации распределения нагрузок между турбоагрегатами, и предложения по рациональным режимам их эксплуатации;

- на примере теплофикационной турбоустановки Т-50-130 представлен сравнительный анализ показателей экономичности в характерных режимах работы по тепловому и электрическому графикам и оптимизации, полученных в результате расчета по типовым энергетическим характеристикам и с использованием разработанной математической модели;

- впервые изложены и раскрыты вопросы возможного влияния учета процессной влаги на технико-экономические показатели работы теплофикационных турбин.

Значение полученных результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- разработаны, реализованы и используются в условиях эксплуатации рекомендации и математические модели (компьютерные программы) расчета показателей режимов работы оборудования на примерах ТЭЦ Кировской энергосистемы (ТЭЦ-4, ТЭЦ-5), а также других энергосистем нашей страны. При этом правильный выбор последовательности загрузки турбоустановок различных типов и степени использования паротурбинного оборудования ТЭЦ, в среднем позволил снизить удельный расход топлива на отпуск электроэнергии для большинства реальных режимов примерно на 3-5%;

- определены пределы применимости разработанных методов анализа и расчета, а также сформулированы предложения по использованию результатов расчетных исследований для научно-обоснованного выбора режимов работы теплофикационных турбоустановок в зависимости от конкретных условий их эксплуа-

тации, а также для обеспечения экономии топлива в энергосистеме за счет организации оптимального распределения нагрузки оборудования ТЭЦ. Представленные решения задач теории моделирования и оптимизации существенно сокращают объем исследований, снижают затраты материальных ресурсов на их отработку и представляют методологическую основу для создания моделей турбоустановок других типов, что способствует в конечном итоге снижению удельных расходов топлива на выработку электроэнергии и повышению КПД цикла турбоагрегатов;

- подтверждена возможность использования предложенной методики и критериев определения энергетической эффективности и разработанных автором математических моделей для решения задач управления оборудованием ТЭЦ при оптимальном распределении нагрузок между турбоагрегатами в условиях выполнения существующих графиков тепловой и электрической нагрузок.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях: *всероссийских* «Наука – производство – технологии – экология» (Киров, ВятГУ, 2003, 2004, 2005, 2006, 2008), «Общество, наука, инновации» (Киров, ВятГУ, 2014), конференции и выставке студентов, аспирантов и молодых ученых (Екатеринбург, ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005). Результаты по теме диссертации используются при выполнении хоздоговорных и инновационных работ. Методика технико-экономического сопоставления вариантов через величину $Q_{доп}$ и разработанные математические модели используются в научно-исследовательских работах и учебном процессе на кафедре теплотехники и гидравлики ВятГУ.

Достоверность и обоснованность результатов работы базируется на использовании в расчетах фундаментальных закономерностей термодинамики и теории теплообмена, обобщении передового опыта ведущих отраслевых организаций (ВТИ, МЭИ, ОРГРЭС и др.), согласованности полученных теоретических результатов с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации (в том числе для предельных случаев), а также с результатами исследований других авторов в данном направлении. Корректность разработанных математических моделей и их адекватность обусловлены качественным и количественным совпадением результатов, полученных автором, с данными испытаний оборудования ТЭЦ с учетом пределов применимости моделей. Используются современные методики сбора и обработки исходной информации, обоснован подбор объектов исследования, показана воспроизводимость результатов расчета на турбоустановках различных типов.

Личный вклад автора состоит во включенном участии на всех этапах процесса, в непосредственном участии в формировании концепции работы, получении исходных данных, разработке методик исследований, математических моделей и программных продуктов, алгоритмов их численной реализации, экспериментальных проверках, проведении расчетов, анализе, обобщении и интерпретациях полученных результатов, в апробации и реализации практических рекомендаций, подготовке основных публикаций по выполненной работе.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 28 опубликованных работах общим объёмом 12,2 печатных листов, в том числе **3 статьи в научных журналах и изданиях, определенных ВАК для опубликования основных научных результатов диссертаций**, одна из которых переведена на английский язык и опубликована в индексируемом журнале, входящем в систему цитирования «Scopus».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав основной части, заключения, списка использованных источников из 174 наименований. Работа представлена на 192 страницах, включая 48 иллюстраций, 8 таблиц и приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность развития метода математического моделирования применительно к теплофикационным паротурбинным установкам, представляющим собой сложные технические системы, детальный расчет которых невозможно выполнить без применения вычислительной техники и специальных математических методов.

В **первой главе** представлен обзор опубликованных работ, посвященных исследованиям и практической реализации и классифицированы (рисунок 1) существующие подходы к моделированию теплоэнергетических установок; рассмотрены разновидности характеристик турбинных ступеней и отсеков, используемые в практике расчета основных технико-экономических показателей турбоустановок; выполнен анализ вычислительных методов оптимизации режимов работы оборудования ТЭЦ. На основе выполненного анализа выбраны направления дополнительных исследований, сформулированы задачи работы.



Рисунок 1 – Классификация математических моделей (ММ) паротурбинных установок (ПТУ)

Во **второй** главе изложена методика расчетных исследований и произведен выбор критериев энергетической эффективности, используемых при анализе переменных режимов работы. Дается описание и обоснование выбора универсальных обобщенных мощностных и расходных характеристик турбинных отсеков, полученных по результатам специального обобщения д.т.н. Е.И. Эфросом экспериментальных данных, и заложенных в основу математических моделей паротурбинных установок. Эти характеристики имеют одинаковую структуру и отличаются друг от друга только коэффициентами. Так для описания расходных характеристик вносятся уточнения в известную формулу А.Стодолы и на основе результатов натуральных исследований и обобщения предложена полуэмпирическая зависимость вида:

$$\frac{G}{\rho_0} = \frac{\alpha}{\sqrt{\rho_0 v_0}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_2}{\rho_0} - \sigma \right)^2}, \quad (1)$$

где α - некоторый постоянный для данной проточной части коэффициент. Величина σ в (1) определяется, как

$$\sigma = \sigma_0 \sum u^2 / \rho_2 v_2, \quad (2)$$

где u - окружная скорость рабочего колеса на среднем диаметре; $\sigma_0 \approx 0,11$ - постоянный коэффициент.

При определении мощностных характеристик была выявлена закономерность, в соответствии с которой в диапазоне $(Gv_2)_{кр} \leq Gv_2 \leq (Gv_2)_p$ с погрешностью, лежащей в пределах точности эксперимента (0,5-2 кДж/кг), имеет место зависимость $H_i = \eta_{0i}^* H_0 - C / Gv_2$. Величина C в ней практически совпадает с коэффициентом пропорциональности в формуле для вентиляционных потерь $N_g = -C / v_2$. Из этого следует, что в указанном диапазоне режимов внутренняя мощность отсека или ступени линейно зависит от располагаемой мощности, причем величина потерь мощности $GH_0 \eta_{0i}^* - N_i = C / v_2 = |N_g|$ при неизменном v_2 остается постоянной и численно равной потерям в чисто вентиляционном режиме. Выражение для использованного теплоперепада дает также возможность получить взаимосвязь между величиной коэффициента C и с геометрическими параметрами проточной части и частотой вращения ротора

$$C = C_0 \cdot \tilde{F}_n \cdot \tilde{u} \cdot \sum u^2, \quad (3)$$

где $C_0 = a / 2b = 0,153$ - постоянный коэффициент¹.

Результаты обобщения экспериментальных мощностных характеристик различных турбинных отсеков и ступеней низкого давления представлены в табл. 1.

На этом надежном исходном материале построены математические модели, теплофикационных турбоустановок, представленные в виде системы нелинейных уравнений большой размерности (с числом переменных более 50) из материальных и энергетических балансов, позволяющие значительно упростить расчет теплофикационных турбоустановок в широком диапазоне изменения параметров при сохранении точности вычислений, а также провести оптимизацию режимных параметров.

Решение системы уравнений, описывающих предлагаемые модели, реализуется модифицированным численным методом Ньютона. Автором описаны частные особенности применения этого метода к решению задачи расчета любого режима работы турбоустановки и вводится целый ряд уточнений к нему. В частности предложено

¹ Эфрос Е. И. Экономичность и надежность мощных теплофикационных турбин и пути их повышения: диссертация ... доктора технических наук : 05.04.12 / Эфрос Евгений Исаакович. – Киров, 1998. – 351 с.

ны методы минимизации количества итераций, выбора величины очередного шага итераций в зависимости от степени приближения к предыдущему решению (это позволяет учитывать степень эффективности последнего шага и уменьшить общее число шагов, сохранив при этом требуемую точность приближенного решения). Кроме того, в алгоритме есть жесткие ограничения на степень увеличения очередного шага (он не может быть слишком большим). Его приходится искусственно ограничивать по всем переменным, чтобы не выйти за пределы допустимости, связанные с их физической природой. Достоинство разработанной программы состоит в том, что система уравнений формируется не для конкретной расчетной тепловой схемы турбоустановки и предусматривает возможность ее изменения без пересмотра всего алгоритма расчета.

Таблица 1 – Мощностные характеристики турбинных отсеков и ступеней низкого давления

Диапазон режимов	Обобщающая зависимость	Обозначения
$(Gv_2)_p \div (Gv_2)_H$	$\overline{H}_i = 1 + \delta_0 \overline{H}_{0xx} \left(\overline{Gv}_2 \right)_{xx} \left(1 - \frac{1}{\overline{Gv}_2} \right),$ $\delta_0 = 6,35 \approx const$	$(Gv_2)_p = (F_{\pi} u \cos \beta_2)_{\pi},$ $\overline{Gv}_2 = Gv_2 / (Gv_2)_p,$ $\overline{H}_{0xx} = H_{0xx} / H_{op},$ $\overline{H}_i = H_i / H_{ip}$
$(Gv_2)_{xx} \div (Gv_2)_p$	$\overline{H}_i = \overline{Gv}_2^{-\varepsilon} \frac{\overline{Gv}_2 - \left(\overline{Gv}_2 \right)_{xx}}{\left[1 - \left(\overline{Gv}_2 \right)_{xx} \right]},$ $\varepsilon = 0,72 \approx const$	
$(Gv_2)_{кр} \div (Gv_2)_{xx}$	$\frac{N_i v_2}{C} = \frac{\overline{Gv}_2 \left[\overline{Gv}_2 - \left(\overline{Gv}_2 \right)_{кр} \right]}{1 - \left(\overline{Gv}_2 \right)_{кр}} - 1$	$\overline{Gv}_2 = Gv_2 / (Gv_2)_{кр}$

Для оценки энергетической эффективности изменения режима работы турбины выбрана величина $q_{доп}$ (рисунок 2). В сравнительных расчетах в качестве абсолютных показателей были использованы такие величины как изменение потерь теплоты в холодном источнике (конденсаторе), изменение расхода теплоты на турбину, изменение расхода топлива и др. Для оценки экономической эффективности применения какого-либо режима использовалась величина дополнительных затрат на топливо и покупную (продаваемую) электроэнергию $\Delta \mathcal{E}$.

Показатели энергетической эффективности

Относительные

Наименование	Обозначение	Формула
удельное изменение расхода теплоты при изменении выработки электроэнергии	$q_{\text{доп}}$	$q_{\text{доп}} = (\Delta Q_0 - \Delta Q_T) / \Delta N_{\text{Э}}$, где $\Delta Q_0 = Q_0 - Q_{00}$; $\Delta Q_T = Q_T - Q_{T0}$; $\Delta N_{\text{Э}} = N_{\text{Э}} - N_{\text{Э}0}$; Q_{00} , Q_{T0} , $N_{\text{Э}0}$ и Q_0 , Q_T , $N_{\text{Э}}$ относятся соответственно к некоторому исходному и новому режимам работы турбины
удельный расход теплоты на выработку электрической энергии	q	$q = (Q_0 - Q_T) / N_{\text{Э}}$, где Q_0 - расход теплоты на турбину; Q_T - отпуск теплоты из регулируемых отборов; $N_{\text{Э}}$ - электрическая мощность.
удельный расход топлива на выработку электрической энергии	b	$b = B / N_{\text{Э}}$, где B - расход топлива на выработку электроэнергии; $N_{\text{Э}}$ - электрическая мощность

Абсолютные

Наименование	Обозначение	Формула
изменение потерь теплоты в холодном источнике (конденсаторе)	ΔQ_K	Определяется расчетом из теплового баланса
изменение расхода теплоты на турбину	ΔQ_0	$\Delta Q_0 = \Delta N_{\text{Э}} q_{\text{доп}} + \Delta Q_T$
изменение расхода сжигаемого топлива	ΔB	$\Delta B = \frac{\Delta Q_0}{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \cdot \eta_K}$, где Q_{H}^{P} - низшая теплота сгорания топлива; η_K - коэффициент полезного действия котла.

Показатели экономической эффективности

Наименование	Обозначение	Формула	Смысл показателя
дополнительные затраты на топливо и покупную (продаваемую) электроэнергию	$\Delta \mathcal{E}$	$\Delta \mathcal{E} = \Delta N_{\text{Э}} c_{\text{Э}} - \Delta B c_{\text{T}}$, где $c_{\text{Э}}$ и c_{T} - соответственно стоимость покупной (продаваемой) электроэнергии и условного топлива; $\Delta B = \Delta B_{\text{Э}} + \Delta B^{\text{ПВК}}$ - общее изменение расхода сжигаемого топлива в энергетических и водогрейных котлах (ПВК)	характеризует экономическую эффективность переменных режимов работы

Оценка степени влияния процессной влаги

Наименование	Обозначение	Формула	Физический смысл
коэффициент влажности в каждом отсеке (ступени)	$a_{\text{вл}}$	$H_{i\text{вл}} = H_i \left(1 - a_{\text{вл}} \frac{y_0 + y_{2p}}{2} \right)$, где $H_{i\text{вл}}$, H_i - использованный теплоперепад с учетом и без учета степени влажности пара соответственно y_0 , y_{2p} - степень влажности пара на входе в отсек (ступень) и на выходе соответственно	учитывает потери теплоперепада в отсеке (ступени) от степени влажности пара на входе и выходе в него
коэффициент сепарации	$K_{\text{сеп}}$	$h_{\text{заотб}} = h_{\text{доотб}} + K_{\text{сеп}} (h_{\text{свотб}}'' - h_{\text{доотб}})$, где $h_{\text{заотб}}$ - энтальпия пара за камерой отбора на входе в последующий отсек; $h_{\text{доотб}}$ - энтальпия пара на входе в камеру отбора	характеризует величину возможного изменения энергетических показателей турбоустановки в целом

Рисунок 2 – Показатели энергетической и экономической эффективности

При значительных отклонениях фактических условий работы от расчетных необходимо делать оценку целесообразности реализации того или иного решения, которая должна носить исключительно индивидуальный характер и основываться на результатах расчетных исследований, при этом использование типовых нормативных характеристик (НХ) оказывается недостаточным или проблематичным.

В подтверждение сказанного выполнен сравнительный анализ результатов определения величин $q_{\text{доп}}$ на примере турбины типа Т-50-130 с использованием НХ (диаграммы режимов) и разработанной автором математической модели (ММ). При расчетах по диаграмме режимов значения величины $q_{\text{доп}}$ оказались почти в 1,5 раза ниже, а влияние на них режимных параметров значительно слабее. Это связано с тем, что она строится на базе линеаризованных характеристик турбинных отсеков, которые при достаточно больших отклонениях режима работы от номинального заметно отличаются от действительных. В результате использование НХ дает существенные погрешности по сравнению с детальным расчетом.

В **третьей главе** рассмотрены результаты детального исследования экономичности теплофикационных турбин при прохождении переменной части графиков электрической и тепловой нагрузок на базе разработанных математических моделей с реальными энергетическими характеристиками турбинных отсеков и определено влияние основных эксплуатационных факторов на эффективность различных способов получения дополнительной мощности: перевод турбин в режим работы по электрическому графику в период частичных нагрузок; получение пиковой мощности за счет открытия регулирующих диафрагм (РД) части низкого давления (ЧНД), отключения регенеративных подогревателей высокого давления (ПВД); переход с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды в неотопительный и переходный период и др. Актуальность таких исследований обусловлена большим разнообразием конкретных условий эксплуатации турбин и необходимостью совершенствования режимов работы турбоустановок с целью экономии топливно-энергетических ресурсов.

Отличительная особенность принятого автором подхода к решению подобных задач (от уже известных в литературе подходов Е.И. Бененсона, Л.С. Иоффе, В.А. Иванова и др.) состоит в отказе от привязки к строго регламентированному температурному графику и коэффициенту теплофикации; в комплексном расчете проточной части в совокупности со всей тепловой схемой, учитывающем конкретные условия эксплуатации турбоустановок и вспомогательного оборудования на

каждой ТЭЦ; в учете возможного изменения энергетических и технико-экономических показателей в результате изменения пропускной способности закрытых регулирующих диафрагм (РД) части низкого давления (ЧНД).

На основе проведенного комплекса расчетных исследований подтвержден тот факт, что получение пиковой мощности за счет открытия РД ЧНД при постоянном максимальном расходе свежего пара из-за ее низкой энергетической эффективности при расходах сетевой воды близких к номинальным оказывается экономически нецелесообразным. По этой причине применение такого способа следует рассматривать только как крайнюю меру. В дополнение к известным работам Г.А. Шапиро, Л.Л. Симою, Е.И. Эфроса с целью уточнения методики расчета (с учетом изменения расхода пара в ЧНД) рассмотрен еще один распространенный способ получения пиковой мощности турбоустановки – отключение (полное или частичное) регенеративных подогревателей высокого давления (ПВД) с сохранением расхода свежего пара – применительно к мало мощным (а потому наименее экономичным) турбинам типа Т-50-130. Полученные расчеты показали, что при дефиците топлива (или ограничении расхода пара), когда на ТЭЦ включены водогрейные котлы, работа с отключенными ПВД оказывается экономически оправданной.

В зависимости от различных внешних условий суточная экономия денежных средств может составлять порядка сотен тыс. рублей (в ценах 2013 г.) на одну турбоустановку. Кроме того, повышается КПД котельных агрегатов (за счет снижения потерь теплоты с уходящими газами в результате снижения температуры питательной воды при отключении ПВД), что даст дополнительную экономию расхода сжигаемого топлива до 0,26 т у.т./ч на одну турбоустановку.

Представлено и разработано автором теоретическое обоснование эффективности перевода теплофикационных турбин в режим работы по электрическому графику в период частичных тепловых нагрузок. При этом приведена сравнительная оценка экономичности конденсационного потока пара теплофикационной и конденсационной турбин с идентичными начальными параметрами пара, как в количественном, так и в качественном виде. Такая оценка стала возможна благодаря предложенным и разработанным автором единым критериям, отражающим в полной мере оценку процессов, происходящих при переменных режимах работы теплофикационных турбоустановок, и позволяющим адекватно производить сравнение эффективности турбин различных типов для получения дополнительной электрической мощности (рисунок 3).

Детальными расчетами на математических моделях показано, что режимы рабо-

ты теплофикационных турбин в неотапительный период с двухступенчатым подогревом сетевой воды в нижнем и верхнем сетевых подогревателях при полностью открытых РД ЧНД являются более эффективными по сравнению с традиционной эксплуатацией (одноступенчатый подогрев) и могут быть рекомендованы для применения на ТЭЦ. В качестве обоснования этого представлены наглядные результаты натурных испытаний и математических расчетов, характеризующие эффективность перевода турбин различных типов (Т-50/60-130, Т-100/130-130, Т-180/210-130, Т-185/220-130) с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды (рисунок 4). В соответствии с расчетами, при неизменном расходе свежего пара (или общем расходе теплоты на турбину) переход на двухступенчатый подогрев сетевой воды и полное открытие РД позволяет существенно увеличить электрическую нагрузку.

Для обеспечения надежной работы подогревателей сетевой воды предлагается достаточно простое техническое решение по организации двухступенчатого подогрева сетевой воды (байпас с регулирующим клапаном на линии паропровода к верхнему сетевому подогревателю).

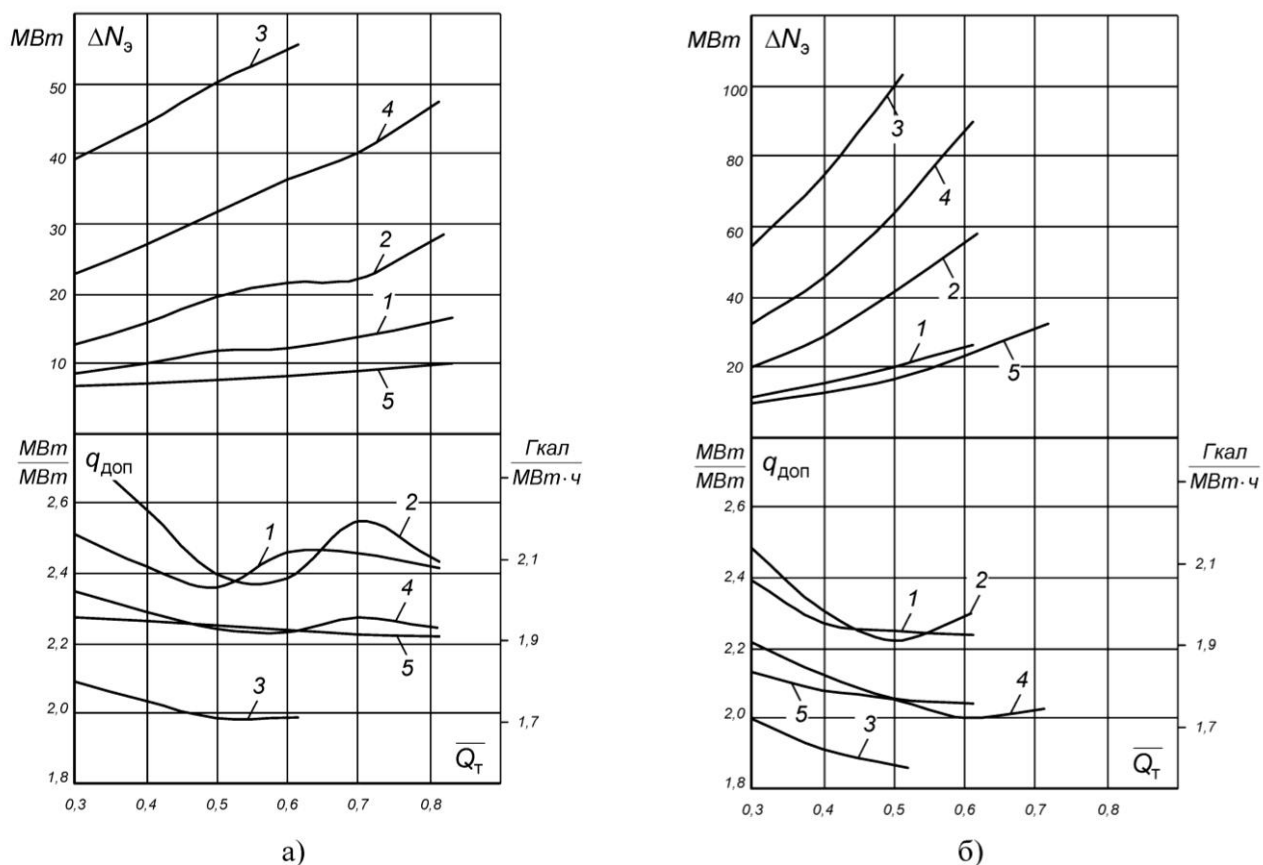
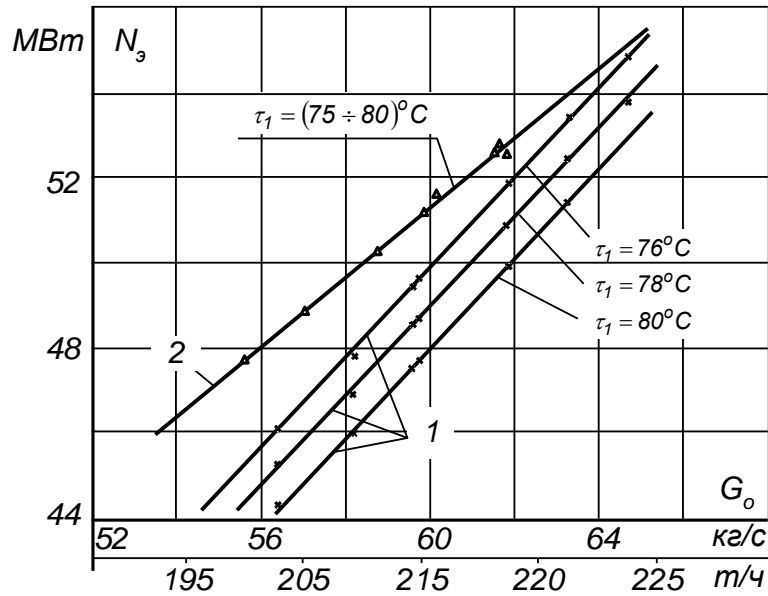
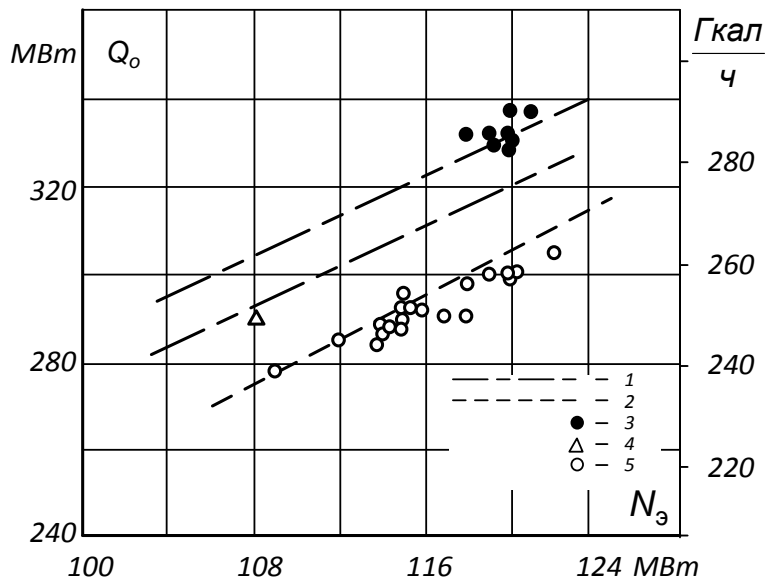


Рисунок 3 – Эффективность дополнительной конденсационной мощности в зависимости от величины частичной тепловой нагрузки для разных турбоустановок при номинальном (а) и половинном (б) расходе сетевой воды, температуре обратной сетевой воды $\tau_2 = 40^\circ\text{C}$ и полностью открытой РД ЧНД:

1 – Т-50-130; 2 – Т-100/120-130; 3 – Т-180/210-130; 4 – Т-185/220-130; 5 - ПТ-80/100-130/13



- а) основные результаты сравнительных натурных испытаний турбины Т-50-130 с одноступенчатыми и двухступенчатым подогревом сетевой воды ($W_{\text{СВ}}=250$ кг/с (900 т/ч), $\tau_2=51^\circ\text{C}$):
 1 – одноступенчатый подогрев; 2 – двухступенчатый подогрев при открытой РД ЧНД и обводе части сетевой воды помимо ПСГ



- б) расход теплоты на турбину Т-100-130 при различных режимах работы:
 1; 3; 4 – расчет и эксперимент при одноступенчатом подогреве сетевой воды
 3 – $W_{\text{СВ}}=638,9$ кг/с (2300 т/ч), $\tau_2=60^\circ\text{C}$, $\tau_1=101^\circ\text{C}$;
 4 – $W_{\text{СВ}}=694,4$ кг/с (2500 т/ч), $\tau_2=60^\circ\text{C}$, $\tau_1=92^\circ\text{C}$;
 2, 5 – расчет и эксперимент при двухступенчатом подогреве сетевой воды и открытых РД ЧНД, $\tau_2=60^\circ\text{C}$, $\tau_1=92\div 101^\circ\text{C}$.

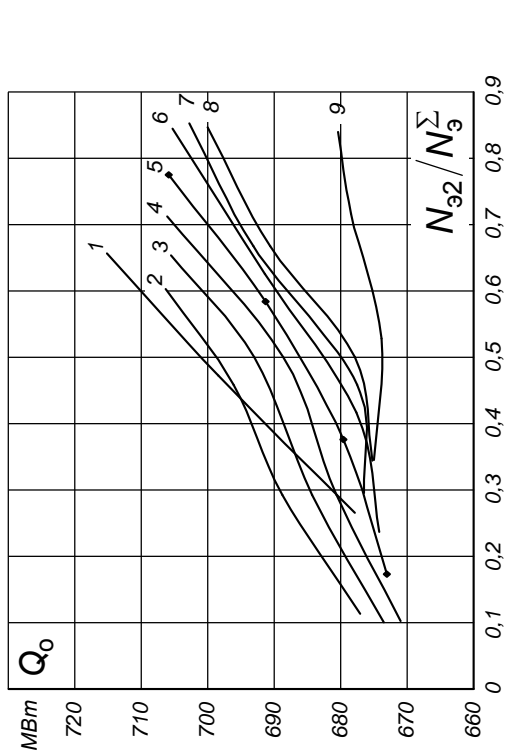
Рисунок 4 – Эффективность перехода с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды

В четвертой главе представлены варианты решения некоторых оптимизационных задач распределения нагрузок и сетевой воды между параллельно работающими агрегатами путем математического моделирования на примере нескольких ТЭЦ Кировской энергосистемы. Показана возможность реального достижения значительного экономического эффекта за счет оптимизации режимов работы турбин и ТЭЦ в целом, что обусловлено существенной нелинейностью фактических энергетических характеристик оборудования. При этом, сокращение топливных издержек в фактических условиях эксплуатации в большинстве случаев достигается за счет максимально неравномерного распределения электрических и тепловых нагрузок между турбоустановками как одного, так и нескольких типов.

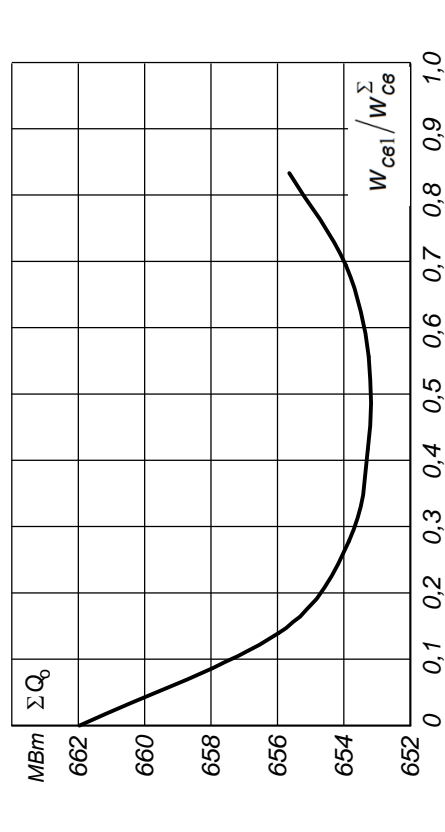
Исследования маломощных турбоустановок на примере турбин типа Т-50-130 подтвердили, что в случае необходимости получения пиковой мощности при неограниченном расходе свежего пара экономически целесообразно последовательное открытие регулирующих диафрагм теплофикационных турбин. Показано, что оптимальному принципу организации режимов работы группы турбоустановок отвечает последовательная их загрузка. В этом случае даже для однотипных турбин по сравнению с равномерным распределением нагрузок может быть получена существенная экономия теплоты и топлива (до 1 - 2,5 % от их расхода на выработку электроэнергии).

Разнообразные по структуре и методике выполнения задачи были реализованы и при использовании математических моделей теплофикационных турбоустановок других типов. При этом состав основного оборудования ТЭЦ включал турбоагрегаты разных типоразмеров.

В частности, в неотапительный период, когда ТЭЦ работает по электрическому графику (т.е. с заданной суммарной электрической мощностью $\Sigma N_{э}$) при относительно малом и неизменном отпуске теплоты для нужд горячего водоснабжения, появляется возможность оптимизации за счёт перераспределения как расхода сетевой воды между турбоустановками, так и их электрической мощности. Из приведенных данных (рисунок 5) следует, что при определённых и неизменных сочетаниях расходов воды имеет место тенденция к снижению общих затрат теплоты $\Sigma Q_{о}$ при организации предельно неравномерного распределения с учетом величины $q_{доп}$ электрической нагрузки между работающими турбоустановками. Как видно, перераспределение расходов сетевой воды оказывает незначительное влияние на экономичность работы ТЭЦ. При этом минимум $\Sigma Q_{о}$ находится в об-



ТТ№2 и ТТ№3. Суммарная мощность турбоустановок 240 МВт. Расход сетевой воды (т/ч) соответственно на ст.№2/№3:
 1 – 0/4000; 2 – 500/3500; 3 – 1000/3000; 4 – 1500/2500; 5 – 2000/2000; 6 – 2500/1500; 7 – 3000/1000; 8 – 3500/500; 9 – 4000/0



ТТ№1 и ТТ№3. Суммарная мощность турбоустановок 240 МВт. Расход сетевой воды (т/ч) соответственно на ст.№1/№3:
 1 – 0/4000; 2 – 500/3500; 3 – 1000/3000; 4 – 1500/2500; 5 – 2000/2000; 6 – 2500/1500; 7 – 3000/1000

Рисунок 5 – Расчетная эффективность перераспределения расхода сетевой воды и электрической мощности между турбоустановками в режиме работы в неотопительный период:

ТТ №1 - турбина типа ПТ-80/100-130/13; ТТ №2, 3 - турбины типа Т-185/220-130

ласти равномерного (относительно номинального) распределения расхода сетевой воды между турбоустановками. Аналогичная ситуация по эффективности перераспределения расхода сетевой воды между теплофикационными турбоустановками имеет место и в отопительный период.

В пятой главе с целью определения возможного влияния учета процессной влаги в рамках всей турбоустановки (а не только отдельных ступеней и отсеков) на показатели экономичности работы, был введен ряд коэффициентов: степени влажности пара и сепарации влаги (рисунок 2). Показано, что при полном учете влияния процессной влаги (в частности, когда эти коэффициенты равны единице) ошибка в вычислении важнейших технико-экономических показателей в абсолютном и относительном выражении лежит в пределах 1 - 2 %, что соизмеримо с точностью всего расчета (в качестве примера на рисунке 6 приведены эти показатели для режимов работы по электрическому графику, аналогичная ситуация наблюдается и в режимах работы по тепловому графику). Это справедливо даже в случаях интенсивного образования крупнодисперсной влаги и полного ее учета и отвода в отбор. Полученные данные могут представлять интерес при рассмотрении вопроса о целесообразности учета влияния процессной влаги тем или иным образом на показатели работы турбины во время проведения сравнительных и оптимизационных расчетов.

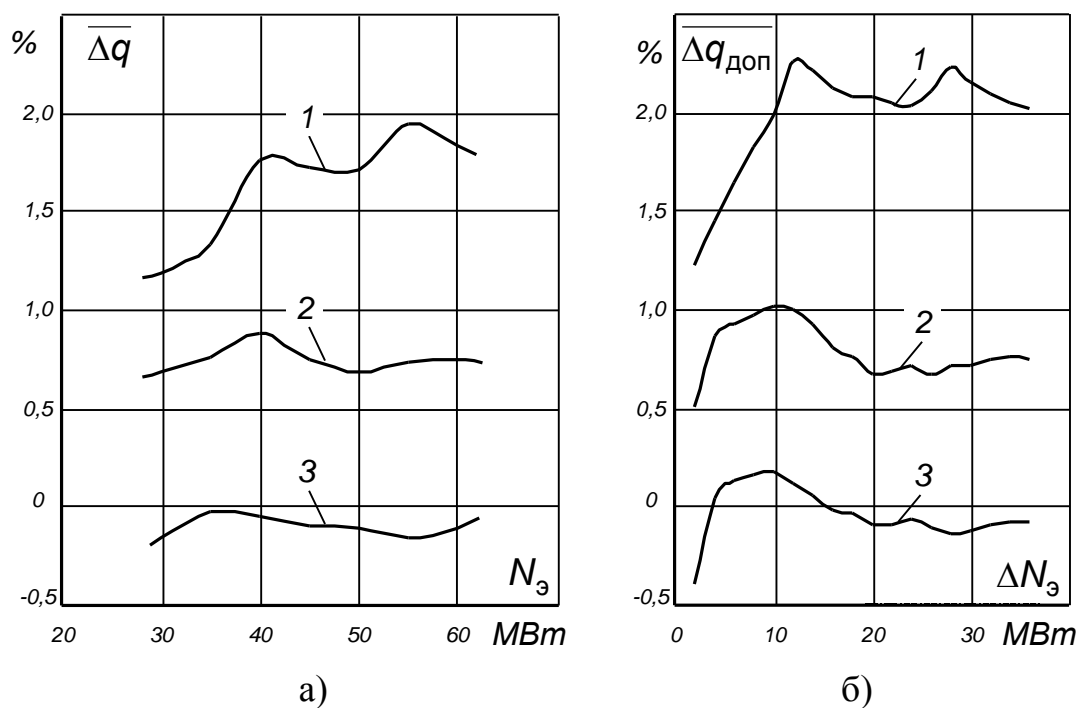


Рисунок 6 – Относительное изменение основных энергетических показателей $\overline{\Delta q}$ (а) и $\overline{\Delta q_{\text{доп}}}$ (б) в зависимости от электрической мощности при $Q_{\text{т}} = 0,5 Q_{\text{т}}^{\text{ном}}$ в сравнении с базовым режимом ($a_{\text{вл}} = 0$, $k_{\text{сеп}} = 0$) в режимах работы по электрическому графику:
 1 – $a_{\text{вл}}=1$, $k_{\text{сеп}}=0$; 2 – $a_{\text{вл}}=1$, $k_{\text{сеп}}=1$; 3 – $a_{\text{вл}}=0$, $k_{\text{сеп}}=1$

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе методов математического моделирования автором исследован новый комплексный подход к оценке энергетической эффективности работы ТЭЦ и создана библиотека новых, более совершенных математических моделей теплофикационных паротурбинных установок наиболее распространенных типов на действующих ТЭЦ (Т-185/220-130, Т-180/210-130, Т-100/120-130, Т-50/60-130, ПТ-80/100-130/13, ПТ-60/75-130/13), в которые заложен новый принцип расчета, позволяющий рассчитывать по универсальным обобщенным характеристикам отсеков всю турбоустановку в целом со вспомогательным оборудованием практически во всем диапазоне переменных режимов работы при любых начальных параметрах и могут служить основой для теоретического обоснования предлагаемых прогрессивных решений по эксплуатации ТЭЦ.

2. Модифицирован вычислительный метод решения системы нелинейных уравнений большой размерности с числом независимых переменных более 50 за счет введения целого ряда уточнений: минимизации количества итераций, искусственного ограничения шага по всем переменным, обусловленное их физической природой и др.

3. В сравнительном расчете наглядно продемонстрированы преимущества использования разработанных математических моделей перед типовыми нормативными характеристиками при оценке энергетической эффективности существенно переменных режимов работы ТЭЦ и решении оптимизационных задач.

4. В результате комплексных расчетных исследований найдены основные зависимости технико-экономических показателей работы турбоустановок от различных эксплуатационных факторов, на основании которых даны рекомендации по эффективным способам получения дополнительной мощности на ТЭЦ и целесообразности перевода турбоустановок с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды в неотапительный период. Созданные теоретические положения в совокупности с расчетно-экспериментальными сопоставлениями позволили провести качественный и количественный анализ влияния отдельных элементов тепловой схемы, начальных условий и ограничений и способа эксплуатации на конечную эффективность работы турбоустановок.

5. С привлечением методов математического моделирования автором усовершенствована методика нахождения оптимальных режимов работы ТЭЦ, выбраны критерии оценки оптимальности при переходе с одного режима на другой. Обоснованы тактические подходы к оптимизации распределения электрических и тепловых нагрузок между отдельными турбоустановками, ТЭЦ в целом и котельными, направ-

ленных на повышение энергетической эффективности их работы, даны некоторые рекомендации по совершенствованию тепловых схем ТЭЦ с учетом существующих ограничений при различных условиях эксплуатации.

6. Впервые проведено исследование и обобщение возможного влияния степени учета процессной влаги разного качества на энергетическую эффективность работы теплофикационной турбоустановки в целом в наиболее характерных режимах и поставлен вопрос о целесообразности такого учета при проведении оптимизационных расчетов.

7. Реализованы и используются в условиях эксплуатации рекомендации и разработанные математические модели (компьютерные программы) расчета показателей режимов работы оборудования на различных ТЭЦ Кировской энергосистемы. При этом правильный выбор последовательности загрузки турбоустановок различных типов и степени использования паротурбинного оборудования ТЭЦ, в среднем позволил снизить удельный расход топлива на отпуск электроэнергии для большинства реальных режимов примерно на 3-5%.

На базе разработанных математических моделей теплофикационных турбоустановок выполнены исследования их энергетической эффективности, разработан ряд новых конструктивных, режимных и схемных решений, повышающих экономичность и надежность работы ТЭЦ в фактических условиях эксплуатации. Накопленный положительный опыт позволяет рекомендовать использование метода математического моделирования для решения подавляющей части задач этого класса. Вместе с тем подобные модели обладают огромным потенциалом и нуждаются в развитии. Например, они могут быть дополнены подробным расчетом котельной установки (как впрочем и любого другого элемента тепловой схемы) и применяться для определения выбросов в окружающую среду с целью определения их негативного воздействия и изучения ряда других сопутствующих явлений, что допускает возможность моделировать их влияние на экологическую обстановку. А решив обратную задачу, в перспективе позволяют проводить диагностику и мониторинг состояния основного и вспомогательного оборудования.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК:

1. Баталова (Татарина) Н. В. Повышение эффективности теплофикационных турбоустановок / Е.И. Эфрос, В.Ф. Гуторов, Л.Л. Симою, Б.Б. Калинин, Н.В. Баталова // Электрические станции. – 2003. – № 12. – С. 39-46 (0,5 п.л./0,1 п.л.).

2. Татаринова Н. В. Эффективность получения дополнительной конденсационной мощности на теплофикационных турбоустановках / Е.И. Эфрос, Н.В. Татаринова // Электрические станции. – 2006. – № 10. – С. 26-32 (0,5 п.л./0,3 п.л.).

3. Татаринова Н. В. Результаты расчета на математических моделях переменных режимов работы теплофикационных паротурбинных установок в реальных условиях эксплуатации / Н.В. Татаринова, Е.И. Эфрос, В.М. Сущих // Перспективы науки. – 2014. – № 3(54). – С. 95-100 (0,45 п.л. / 0,2 п.л.).

Статьи в сборниках научных трудов, материалах международных и всероссийских конференций:

4. Татаринова Н.В. Получение обобщенных энергетических характеристик турбинных ступеней и отсеков / Е.И. Эфрос, Н.В. Баталова // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2002. – Т. 2. ЭТФ. – С. 63 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

5. Татаринова Н.В. Эффективность работы теплофикационных турбоустановок в условиях переменных графиков тепловых и электрических нагрузок / Е.И. Эфрос, В.М. Сущих, Н.В. Баталова // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2003. – Т. 4. ЭТФ. – С. 91-92 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

6. Татаринова Н.В. Возможное влияние учета процессной влаги на показатели экономичности работы теплофикационных установок / Е.И. Эфрос, Н.В. Татаринова // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2004. – Т. 4. ЭТФ. – С. 95-97 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

7. Татаринова Н.В. Повышение эффективности работы турбин типа ПТ в условиях малых паровых нагрузок производственного отбора / Е.И. Эфрос, Б.Б. Калинин, Н.В. Татаринова // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – Т. 6. ЭТФ. – С. 98-100 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

8. Татаринова Н.В. Практические приемы применения метода математического моделирования для оптимизации режимов работы теплофикационных турбоустановок / Е.И. Эфрос, Д.М. Суворов, Н.В. Татаринова // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – Т. 6. ЭТФ. – С. 104-106 (0,2 п.л. / 0,1 п.л.).

9. Татаринова Н.В. Результаты исследования эффективности новой системы удаления влаги из пароперепускных труб ЦНД теплофикационных турбин /

Е.И. Эфрос, Л.Л. Симою, А.Г. Шемпелев, Б.Б. Калинин, Н.В. Татарина // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – Т. 6. ЭТФ. – С. 101-103 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

10. Татарина Н.В. Сравнительный анализ показателей эффективности работы теплофикационных турбоустановок в переменных режимах с использованием нормативных характеристик и математических моделей / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2005. – Т. 6. ЭТФ. – С. 107-109 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

11. Татарина Н.В. Теоретические предпосылки эффективности перевода теплофикационных турбин в режим работы по электрическому графику / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина; Вятск. госуд. ун-т. – Киров, 2005. – 21 с.: 3 ил. – Библиогр.: с.19-20. – Деп. в ВИНТИ 21.12.2005, №1720-В2005 (0,8 п.л./0,4 п.л.).

12. Татарина Н.В. Энергетическая и экономическая эффективность дополнительной конденсационной мощности, получаемой на теплофикационных турбоустановках / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина; Вятск. госуд. ун-т. – Киров, 2005. – 36 с.: 18 ил. – Библиогр.: с. 34-35. – Деп. в ВИНТИ 19.12.2005, №1699-В2005 (1,4 п.л./0,5 п.л.).

13. Татарина Н.В. Эффективность перевода теплофикационных турбин с одноступенчатого на двухступенчатый подогрев сетевой воды в неотапительный период / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина; Вятск. госуд. ун-т. – Киров, 2005. – 20 с.: 11 ил. – Библиогр.: с.18-19. – Деп. в ВИНТИ 13.12.05, №1654-В2005 (0,8 п.л./0,4 п.л.).

14. Татарина Н.В. Возможная эффективность оптимизации режимов работы действующих ТЭЦ в реальных условиях эксплуатации / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина; Вятск. госуд. ун-т. – Киров, 2005. – 20 с.: 5 ил. – Библиогр.: с.18-19. – Деп. в ВИНТИ 13.12.05, №1655-В2005 (0,8 п.л./0,4 п.л.).

15. Татарина Н.В. Исследование возможного влияния учета процессной влаги на технико-экономические показатели работы теплофикационных турбоустановок / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина, Б.Б. Калинин; Вятск. гос. ун-т. – Киров, 2005. – 37 с.: 17 ил. – Библиогр.: с. 35-36. – Деп. в ВИНТИ 19.12.05, №1701-В2005 (1,4 п.л./0,5 п.л.).

16. Татарина Н.В. Дополнительная конденсационная мощность, получаемая на теплофикационных турбоустановках, и ее эффективность / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина // Сборник материалов ВТИ. – М.: ОАО «ВТИ», 2005. – С. 6-9 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

17. Татарина Н.В. Оптимизация работы однотипных теплофикационных турбоустановок в заданных режимных ограничениях / Д.М. Суворов,

Н.В. Татарина, Е.Л. Загарских, А.В. Черняева // Энерго- и ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых, Екатеринбург, 6-9 декабря 2005 г. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2005. – С. 157-160 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

18. Татарина Н.В. Исследование сравнительной эффективности одноступенчатого и различных вариантов двухступенчатого подогрева сетевой воды на турбоустановках ТЭЦ / Е.И. Эфрос, Д.М. Суворов, Н.В. Татарина и др. // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. – Т. 2. ЭТФ. – С. 189-192 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

19. Татарина Н.В. Оптимизация распределения сетевой воды между турбоустановками ТЭЦ / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина и др. // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. – Т. 2. ЭТФ. – С. 193-195 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

20. Татарина Н.В. Исследование влияния учета процессной влаги на экономичность работы теплофикационных турбоустановок при прохождении переменной части графика электрических нагрузок / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 5 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2006. – Т. 2. ЭТФ. – С. 196-200 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

21. Татарина Н.В. Повышение надежности работы теплофикационных турбин, выработавших проектный ресурс / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2007. – Т. 4. ЭТФ. – С. 191-196 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

22. Татарина Н.В. Экономическая эффективность реализации решений по совершенствованию условий эксплуатации ТЭЦ / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина // Наука – производство – технологии – экология: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции: в 6 томах. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2007. – Т. 4. ЭТФ. – С. 197-199 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

23. Татарина Н.В. Оценка экономической эффективности решений по совершенствованию условий эксплуатации ТЭЦ / Е.И. Эфрос, В.Ф. Гуторов, Н.В. Татарина // Инновационное развитие электроэнергетики в XX веке: доклады юбилейной научно-практической конференции, посвященной 55-летию ИПК госслужбы; под ред. д.т.н., проф. О.А. Терешко. – М.: ИПК госслужбы, 2007. – Т.4 – С. 26-28 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

24. Татарина Н.В. Повышение эффективности действующих ТЭЦ в современных условиях / Е.И. Эфрос, В.Ф. Гуторов, Ю.А. Чирков, Б.Е. Смирнов, Н.В. Татарина // Совершенствование теплотехнического оборудования. Реконструкция ТЭС, внедрение систем сервиса и диагностирования и ремонта: материалы пятой международной научно-практической конференции, Екатеринбург, 28-30 марта 2007 г. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2008. – С.148-161 (0,3 п.л./0,1 п.л.).

25. Татарина Н.В. Повышение эффективности функционирования ТЭЦ в современных условиях / Е.И. Эфрос, Н.В. Татарина, В.М. Сущих // Общество, наука, инновации: сборник материалов Всероссийской ежегодной научно-практической конференции (НПК-2014), Киров, 14-25 апреля 2014 г.; Вят. гос. ун-т; отв. ред. С. Г. Литвиненц. – Киров: Изд-во ВятГУ, 2014. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). (Электротехнический факультет. Секция «Физика и теплотехника»). – С. 1920-1923 (0,3 п.л./0,2 п.л.).

26. Татарина Н.В. Некоторые результаты расчетных исследований переменных режимов работы теплофикационных турбоустановок с целью разработки предложений по повышению их энергетической эффективности в реальных условиях эксплуатации / Е.И. Эфрос, Б.Б. Калинин, Н.В. Татарина // Advanced science. – 2014. – № 1(4). – С. 118-132 (0,4 п.л./0,2 п.л.).

27. Татарина Н.В. Сравнительные расчетные исследования переменных режимов работы теплофикационной турбоустановки с использованием предложенной математической модели и типовых нормативных характеристик / Е.И. Эфрос, Б.Б. Калинин, Н.В. Татарина // Advanced science. – 2014. – № 1(4). – С. 133-142 (0,5 п.л./0,3 п.л.).

28. Татарина Н.В. Теоретические предпосылки возможной эффективности перевода теплофикационных турбин в режим работы по электрическому графику с включенными теплофикационными отборами / Е.И. Эфрос, В.М. Сущих, Н.В. Татарина // Advanced science. – 2014. – № 1(4). – С. 143-154 (0,2 п.л./0,1 п.л.).

Подписано в печать _____, 2014. Формат 60x84 /16.

Бумага для множ. аппаратов.

Печать плоская. Усл. печ. 1,2 п. л. Уч.-изд. 1,0 л. Тираж 100 экз. Заказ № .
ФГАОУ ВПО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина».

Отпечатано