

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

На правах рукописи

**Хассан Моайед Р.**

**Повышение эффективности работы ТЭЦ , оснащенных  
противодавленческими турбинами, путем совершенствования  
программ управления тепловой и электрической мощностью**

Специальность 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург - 2002**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Снижение уровня энергопотребления, сочетающегося с устойчивым ростом цен на энергоносители, значительное сокращение государственных централизованных инвестиций в развитие энергетики, рост тарифов на электрическую и тепловую энергию, характерный для последних десятилетий, все это способствовало резкому усилению интереса к интенсификации сооружения промышленных энергоустановок малой мощности, а также к переводу котельных в режим работы мини-ТЭЦ. Турбины типа Р играют здесь большую роль, и применение их считается перспективным направлением повышения эффективности ТЭЦ.

В настоящее время традиционно у турбин типа Р регулируется лишь давление пара, отбираемого для производственных нужд, а его температура в зависимости от значений тепловых нагрузок может изменяться в широких пределах.

Известно, что режимы потребления тепловой энергии в ходе технологических процессов зависят от исходного сырья выпускаемой продукции, технологической схемы предприятия и климатической характеристики района расположения ТЭЦ.

Таким образом, турбина типа Р в настоящее время не может удовлетворять требованиям поддержания температурного режима технологического процесса, а также запросам потребителя. Так, степень перегрева отборного пара у некоторых типов турбин составляет 150–200 °С, в то же время некоторые производства химических комбинатов (например, фенола и ацетона) потребляют насыщенный пар и столь высокий перегрев отборного пара вызывает дополнительные потери необратимого теплообмена в аппаратах потребителя, перерасход металла паропроводов. С другой стороны для химических комбинатов органического синтеза требуется перегретый пар с температурой 350–450 °С, для нефтеперерабатывающих комбинатов перегретый пар с температурой 350–400 °С, а отпуск от промышленных ТЭЦ насыщенного или слабо перегретого пара.

Однако для качественного ведения технологического процесса в ряде отраслей промышленности (химической, нефтехимической и др.) требуется не менее точное регулирование температуры отборного пара, как и его давления. Поэтому ряд предприятий, использующих турбины типа Р, своими силами устанавливают на паровых магистралях регулирующие теплообменники, где используются впрыск воды для уменьшения температуры пара за турбиной или отпуск части свежего пара из котла через РОУ для повышения этой температуры. Разумеется, использование этого способа для регулирования температуры пара за турбиной сопровождается потерей теплоты, что приводит к перерасходу топлива. Кроме того, использование охлаждающей воды ограничивается возникновением гидравлических тепловых ударов, и реализация отмеченного спо-

соба приводит к усложнению и удорожанию схемы, а также к снижению надежности.

Таким образом, существующие недостатки способов регулирования температуры пара за турбиной типа Р требует разработки новых способов регулирования температуры пара за турбиной, которые были бы малозатратными и более эффективными.

**Цель диссертационной работы** — целью исследований является разработка возможности регулирования температуры пара за турбиной типа Р способами, направленными на повышение экономичности и надежности работы ТЭЦ. Отличительной особенностью их внедрения является отсутствие необходимости существенных капиталовложений, а также простота эксплуатации. Для достижения поставленной цели были проведены исследования турбоустановки Р-50-12,7/1,3.

**Научная новизна** — к новым научным результатам относятся:

– впервые получены статические характеристики регулирования температуры пара за турбиной типа Р следующими способами:

- изменением температуры пара перед турбиной;
  - применением скользящего давления свежего пара;
  - отключением ПВД;
  - комбинированным способом (скользящее начальное давление свежего пара + отключение ПВД) при номинальной температуре свежего пара;
  - комбинированным способом с повышением температуры свежего пара на 20 °С;
  - применением скользящего противодействия;
- оценка экономичности турбоустановки при ее работе без регулирования температуры пара за турбиной и с регулированием ее вышеуказанными способами.

**Достоверность и обоснованность результатов работы.** Характеристики изменения параметров и экономичности турбин типа Р получены автором с использованием апробированных и обоснованных методов математического моделирования турбоустановки. Полученные расчетные результаты исследования с высокой точностью совпадают с многочисленными теоретическими и экспериментальными характеристиками, полученными другими авторами.

**Практическую ценность работы** представляет предложенная автором программа регулирования температуры пара за турбиной и обеспечения постоянства ее для отпуска тепловым потребителям промышленными ТЭЦ, оборудованными турбинами типа Р. Особенность программы состоит в возможности ее реализации как на действующих, так и на вновь проектируемых турбоустановках типа Р без реконструкции при минимальных дополнительных затратах. Результаты нашего исследования составили основу научной работы «Перспективные технологии совершенствования режимов эксплуатации турбин с целью поддержания заданных параметров пара производственных отборов», важной для промышленности России и Ирака.

**Автор выносит на защиту:**

1. Анализ применения способа переменной температуры свежего пара для уменьшения температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3 и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки.

2. Эффективность использования способа скользящего давления свежего пара для увеличения температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3 и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки.

3. Исследование возможности отключения ПВД для регулирования температуры пара за турбиной и уменьшения расхода свежего пара, проходящего через турбину, исходя из чего возникает возможность расширения предела регулирования температуры пара за турбиной.

4. Оценка эффективности скользящего давления свежего пара при отключении всех ПВД (комбинированный способ) для повышения температуры пара за турбиной и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки.

5. Исследование возможности повышения температуры свежего пара на 20 °С при использовании способа комбинирования для расширения диапазона регулирования температуры пара за турбиной и повышения экономичности установки.

6. Исследование возможности регулирования температуры пара за турбиной способом скользящего противодавления.

7. Возможность применения рациональной последовательности способов регулирования температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований докладывались и обсуждались на научных конференциях:

1. Межвузовская научная конференция «XXIX Неделя науки СПбГТУ». Доклад «Анализ путей регулирования температуры и давления пара турбины типа Р», Санкт-Петербургский государственный технический университет, 27 ноября — 2 декабря 2000 года.

2. Материалы IX Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования и науки». Доклад «Возможности повышения температуры свежего пара для регулирования температуры пара за турбиной типа Р» как составляющая часть «Режима работы ТЭС», Санкт-Петербургский государственный технический университет, 14–15 февраля 2002 г.

3. Межвузовский сборник «Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на пром. предприятиях и ТЭЦ». Доклады «Регулирование температуры пара за турбиной типа «Р» способом перемены температуры свежего пара», «Влияние изменения температуры свежего пара на характеристики турбины Р-50-12,7/1,3» и «К вопросу о повышении температуры пара турбины Р-50-12,7/1,3», СПб., 2002.

4. Сборник научных трудов НПО ЦКТИ. Доклад «Паровые турбины с противодавлением типа «Р» и их перспективы в повышении эффективности ТЭС малой и средней мощности», 2002.

**Публикации результатов работы.** Основные результаты диссертации отражены в шести публикациях.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка и 174 источника, приложений, включающих таблицы расчетов. Полный объем диссертации (195) страниц, включающий (40) таблиц, (54) рисунка.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Введение** содержит обоснование актуальности темы, цель работы, основные положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена анализу турбоустановок с турбинами типа Р и их перспективам в повышении эффективности ТЭЦ. Здесь указаны проблемы регулирования температуры пара за турбиной для технологических процессов, его влияние на эффективность работы ТЭЦ, а также обоснован выбор турбины Р-50-12,7/11,3 в качестве объекта исследования.

Анализ работ показал, что применение турбин типа Р получило широкое распространение на промышленных ТЭЦ, особенно на нефтехимических комбинатах и нефтеперерабатывающих заводах, считающихся перспективными для России и Ирака.

**Во второй главе** проведен обзор литературы по существующим способам расширения диапазона регулирования КЭС и ТЭЦ. Рассмотрены способы, реализуемые за счет изменения существующей структуры тепловой схемы, к ним можно отнести:

- скользящее начальное давление свежего пара;
- переменная температура свежего пара;
- отключение подогревателей высокого давления (ПВД);
- комбинированные способы.

Рассмотрение названных способов позволяет сделать вывод о возможности их эффективного применения для регулирования температуры пара за турбиной типа Р. Безусловное преимущество этих способов состоит прежде всего в практическом отсутствии затрат на их реализацию, а также немедленный эффект от их внедрения.

На основании обзора литературных источников сформулированы направления исследования и задачи диссертационной работы:

- оценка возможности уменьшения температуры пара за турбиной типа Р и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки способом переменной температуры пара перед турбиной;
- использование возможности повышения температуры пара за турбиной типа Р и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки способом скользящего начального давления свежего пара;
- анализ возможности расширения предела регулирования температуры пара за турбиной типа Р комбинированными способами;
- определение возможности регулирования температуры пара за турбиной типа Р способом скользящего противодавления.

– разработка программы регулирования температуры пара производственного отбора, турбинами типа Р с наибольшей тепловой экономичностью.

**В третьей главе** подробно описано использование турбины типа Р в качестве надстройки существующих станций. Рассмотрена программа регулирования мощности надстроек и отмечено преимущество использования способа скользящего противодавления для регулирования мощности рассматриваемых установок.

**В четвертой главе** исследована тепловая схема турбины типа Р-50-12,7/1,3, представлена математическая модель расчета принципиальной тепловой схемы. Предложены методы оценки эффективности работы турбины при наличии возможности регулирования температуры пара за турбиной и без нее.

Программа реализована с помощью математического пакета Mathcad. Она включает в себя уравнения тепловых и материальных балансов элементов тепловой схемы и уравнений элементов системы регулирования, а также уравнений методов оценки работы ТЭЦ. При решении системы уравнений использован следующий метод. Для каждого элемента тепловой схемы  $x_i$  записано нестационарное уравнение в виде:

$$\frac{dx_i}{dt} = f(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

Исходными данными для расчетов являются значения расхода пара турбоустановкой, параметров и расхода пара на регулируемые отборы, а также значение давления пара в камере регулирующей ступени.

В результате решена система нелинейных дифференцированных уравнений, построен условный переходный процесс, по окончании которого определены параметры нового искомого режима.

Система уравнений дополнена подпрограммой построения процесса расширения пара в проточной части турбины в  $h-s$  диаграмме.

Проточная часть турбины представлена отсеками, границами которых являются камеры отборов к регенеративным подогревателям, а также регулирующей и перегрузочной ступени. Расходная характеристика каждого из отсеков определена по формуле Стодолы. Работа регулирующих клапанов турбины оценивалась по формуле Бендемана:

$$G = F_k B_1 P_0 / \sqrt{P_0 v_0}$$
$$B_1 = \frac{2x}{1 - \Pi_k} \sqrt{-0,09 + 1,09 \frac{P_1}{P_0} - \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^2}, \text{ если } \frac{P_1}{P_0} > \Pi_k$$
$$B_1 = \frac{2x}{1 - \Pi_k} \sqrt{-0,09 + 1,09 \Pi_k - (\Pi_k)^2}, \text{ если } \frac{P_1}{P_0} \leq \Pi_k,$$

где  $F_k$  — площадь проходного сечения клапана;  $P_0, P_1$  — давление пара, соответственно, перед клапаном и за ним;  $B_1$  — коэффициент Бендемана;  $\Pi_k$  — газодинамическая функция критического давления;  $v_0$  — удельный объем пара перед регулирующим клапаном.

Камеры отборов описаны уравнением необогреваемого отбора:

$$A \frac{dP_i}{dt} = G_{j-1} - G_j,$$

где  $A$  — константа,  $G_{j-1}$ ,  $G_j$  — расход пара, притекающего в объем и истекающего из него.

Расход  $G_{aj}$  пара регенеративными подогревателями определяется с помощью уравнения теплового баланса:

$$G_{aj} = \frac{G_{ej} \cdot [h(t_{\text{вых}j}, P_{ej}) - h(t_{\text{вх}j}, P_{ej})] - \Sigma G_{\text{др}} \cdot (h_{\text{др}} - h'_j)}{h_{aj} - h'_j},$$

где  $t_{\text{вых}j}$ ,  $t_{\text{вх}j}$  — температура нагреваемой воды на выходе и входе в подогреватель;  $P_{ej}$ ,  $G_{ej}$  — давление и расход нагреваемой воды;  $G_{\text{др}}$ ,  $h_{\text{др}}$  — расход и энтальпия дренажей, сливаемых в подогреватель;  $h_{aj}$ ,  $h'_j$  — значения энтальпий пара в камере отбора и дренажа в подогревателе.

Процесс расширения пара в проточной части турбины смоделирован следующим способом. Составлена функция  $H(h, P_1, P_2, \eta)$  для расчета расширения пара в отдельном отсеке. Исходные данные для программы — давление  $P_1$  и энтальпия  $h_1$  перед отсеком, давление  $P_2$  за отсеком и КПД отсека.

Функция возвращает значения энтальпии  $h_2$  и энтропии  $s_2$  пара за отсеком. Расчет энтропии  $s_2$  производится в программе для вывода графика процесса расширения в турбине в  $h, s$ -диаграмме.

Для известных значений параметров пара перед турбиной и давлений пара перед турбинными отсеками последовательным применением функции  $H(h, P_1, P_2, \eta)$  рассчитаны значения энтальпии и температуры пара по проточной части турбины. Серия расчетных кривых изменения температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3 с расходом пара, проходящего через турбину представлена на рис. 1.

Таким образом, для каждой температуры пара, требуемой тепловыми потребителями, определен способ регулирования, удовлетворяющий этой температуре, при разных тепловых нагрузках.

Оценка эффективности турбоустановки выполнена при использовании способов регулирования температуры пара за турбиной и при отсутствии возможности ее регулирования (при использовании впрыска охлаждающей воды или отпуска части свежего пара из котла через РОУ для регулирования температуры пара за турбиной). Сравнение эффективности выполнено исходя из двух предположений:

1. Турбина при ее работе без регулирования температуры за ней может удовлетворять требуемой потребителями температуре пара только за счет увеличения расхода пара, проходящего к потребителям (качественное регулирование);

2. Турбина при ее работе без регулирования температуры за ней удовлетворяет требуемым потребителям температуре и тепловой нагрузке (качественное и количественное регулирование).

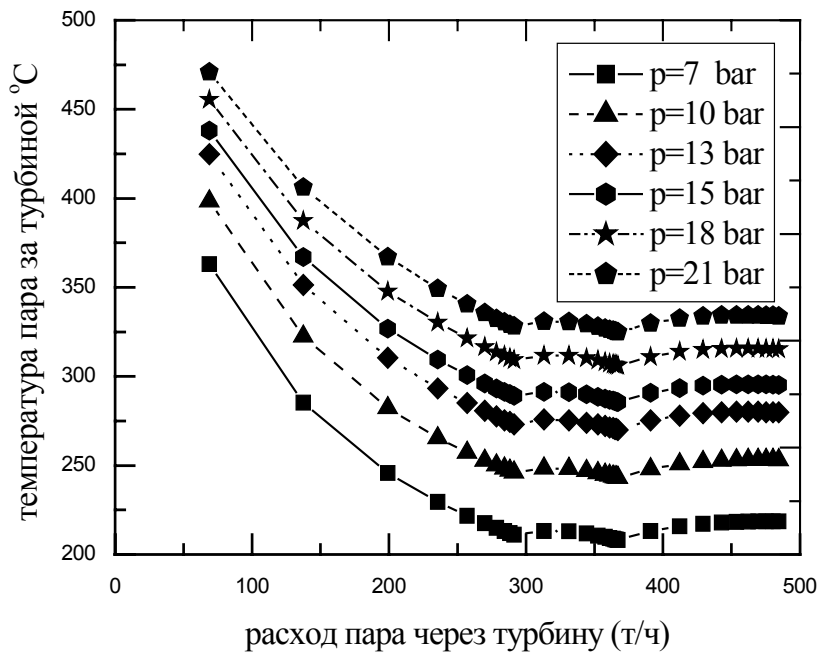


Рис.(1) . Изменение температуры пара за турбиной при изменении расхода пара и разных значениях противодействия

Для оценки эффективности работы турбины были использованы следующие методы:

– метод относительной экономии теплоты при равной выработке тепловой и электрической энергии

$$\varepsilon = \frac{Q_{t1} - Q_{t2}}{Q_{t1}},$$

где  $Q_{t1}$  — расход теплоты на турбину при ее работе без регулирования температуры пара за ней;  $Q_{t2}$  — расход теплоты на турбину при ее работе с внедрением способа регулирования температуры пара за ней.

– метод коэффициента ценности теплоты для определения дополнительного расхода теплоты из-за использования части расхода свежего пара через РОУ для повышения температуры пара за турбиной

$$\Delta Q = G_0 (h_0 - h_{\text{пв}} + \sum \xi_j \Delta h_j),$$

где  $G_0$  — расход части свежего пара;  $\xi_j$  — коэффициент тепловой ценности  $j$ -го отбора;  $h_0, h_{\text{пв}}$  — значения энтальпий свежего пара, соответственно, и питательной воды;  $\Delta h_j$  — изменение энтальпий питательной воды через  $j$ -й подогреватель.

– метод коэффициента эффективности эксплуатации ТЭЦ

$$\eta_{\text{э.э}}^{\text{ТЭЦ}} = \frac{(B_{\text{раз}} - B_{\text{ТЭЦ}})}{(B_{\text{раз}} - B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{min}})},$$



где  $B_{\text{раз}}$  — расход топлива на отдельную выработку электроэнергии;  $B_{\text{ТЭЦ}}$  — полный фактический расход топлива на ТЭЦ при отдаче в сеть тепловой и электрической нагрузки;  $B_{\text{ТЭЦ}}^{\text{min}}$  — минимальный расход топлива на ТЭЦ, который определяется по максимальному значению удельной выработки электроэнергии на тепловом потреблении и коэффициенту использования теплоты топлива  $K_{\text{и.т.}} = 1$

$$\Delta\eta_{\text{э.э}}^{\text{ТЭЦ}} = \eta_{\text{э.э.2}}^{\text{ТЭЦ}} - \eta_{\text{э.э.1}}^{\text{ТЭЦ}},$$

где  $\eta_{\text{э.э.2}}^{\text{ТЭЦ}}$  — коэффициент эффективности эксплуатации ТЭЦ при работе турбины с внедрением способа регулирования температуры пара за турбиной;  $\eta_{\text{э.э.1}}^{\text{ТЭЦ}}$  — коэффициент эффективности эксплуатации ТЭЦ при работе турбины без регулирования температуры за ней. При расчете экономичности работы турбины учитывалась возможность повышения КПД котла из-за использования способа скользящего начального давления свежего пара и отключения ПВД для регулирования температуры пара за турбиной.

**Пятая глава** диссертации посвящена анализу результатов выполненного исследования. Даются характеристики изменения параметров пара для регулирования температуры пара за турбиной и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки, а также сравнительные показатели работы турбины при наличии возможности регулирования температуры пара и без нее.

Для уменьшения температуры пара за турбиной до температуры насыщения, соответствующей противодавлению, и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки, предложен автором способ переменной температуры свежего пара.

На рис. 2, 3 представлены расчетные величины понижения температуры свежего пара для удержания постоянной температуры пара за турбиной при различных расходах пара к потребителям. Приведенные результаты показывают, что с уменьшением температуры пара, требуемой потребителями, и повышением противодавления величина понижения температуры пара перед турбиной возрастает.

Рис. 4 показывает, что использование способа переменной температуры свежего пара приводит к повышению расхода теплоты по сравнению с впрыском охлаждающей воды при равной выработке тепловой и электрической энергии. Расчеты, выполненные для способа скользящего начального давления свежего пара с целью повышения температуры пара за турбиной и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки показали, что, благодаря этому способу, турбина может обеспечивать при разных противодавлениях и тепловых нагрузках паром с температурой на 10 °С выше температуры, возникающей при работе турбины без регулирования в номинальном режиме, а с изменением температуры в пределах 30 - 40 °С возможности способа ограничиваются тепловой нагрузкой.

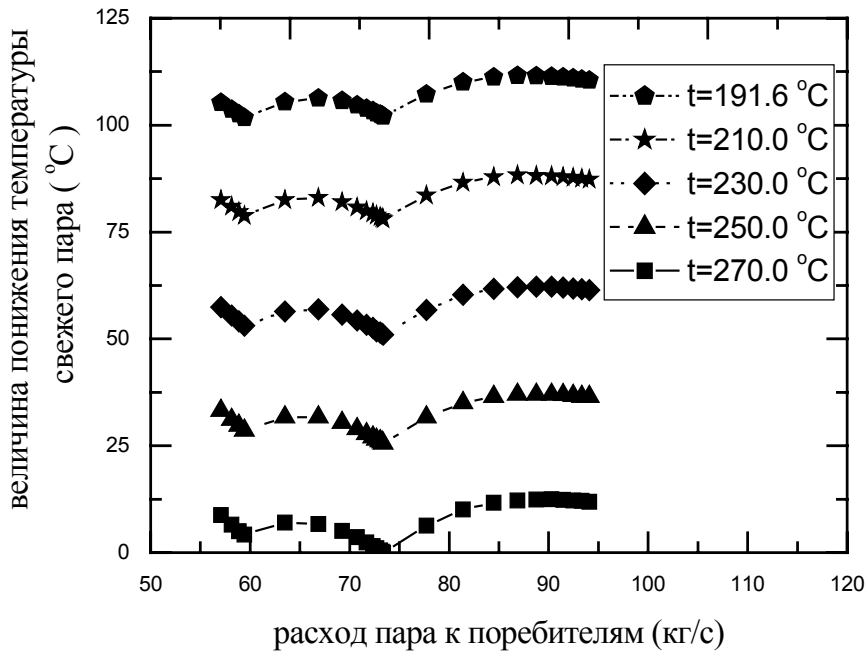


Рис.(2) . Изменение величины понижения температуры свежего пара в зависимости от расхода пара для удержания постоянной температуры пара за турбиной при противодавлении 13bar

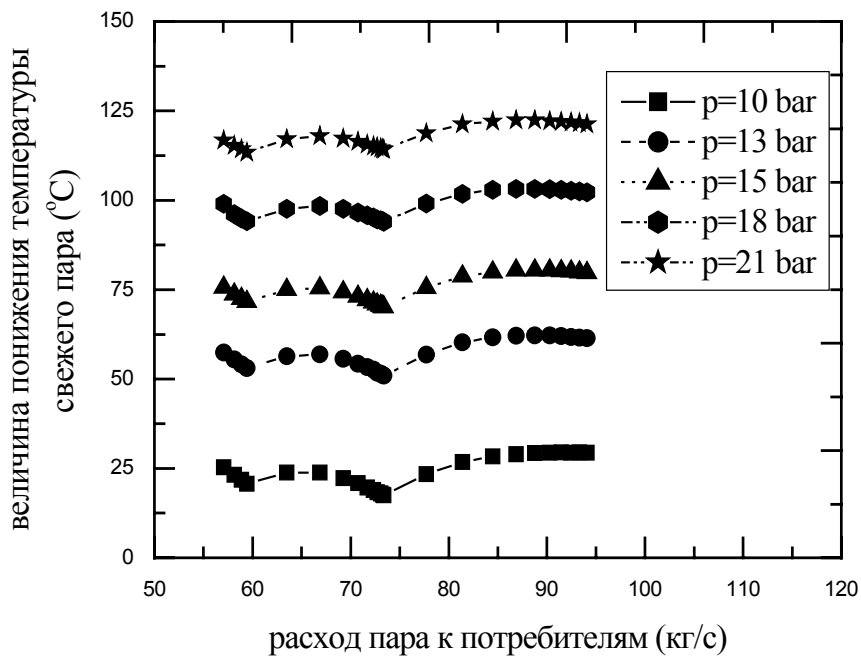


Рис.(3) . Величина понижения температуры свежего пара для удержания температуры пара за турбиной на 230 °C при разных противодавлениях и расходах

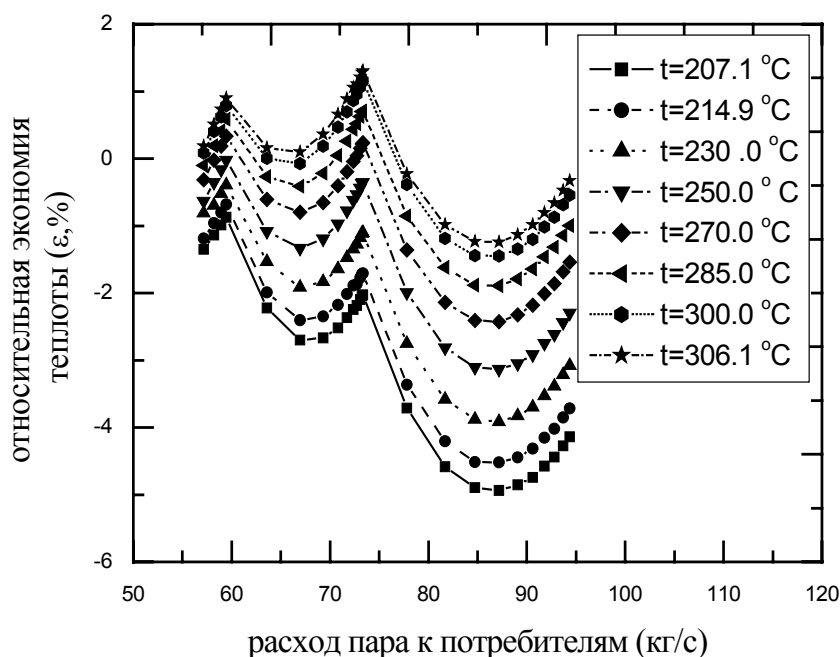


Рис.(4) . Изменение относительной экономии теплоты с изменением тепловой нагрузки при различных температурах пара за турбиной при заданном противодавлении ( $p=18 \text{ bar}$ )

На рис. 5 представлены характеристики применения скользящего начального давления свежего пара для повышения температуры пара за турбиной при различных значениях и расходах пара к потребителям.

С учетом возможности повышения КПД котла из-за использования способа скользящего давления свежего пара, что было подтверждено многими авторами, внедрение этого способа дает экономию топлива по сравнению с отпуском свежего пара из котла через РОУ, что видно из рис. 6.

Рассмотрена возможность расширения диапазона регулирования температуры пара за турбиной путем сочетания способа скользящего начального давления свежего пара со способом отключения всех ПВД. Полученные результаты показали, что использование этого способа обуславливает возможность повышения температуры пара за турбиной и удержания ее постоянной до  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  выше температуры, которую обеспечивает турбина при ее работе без регулирования температуры в номинальном режиме, и до  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  при возможности использования способа ограничиваются тепловой нагрузкой. Однако, несмотря на возможности повышения КПД котла за счет отключения ПВД и скользящего давления свежего пара, сравнение экономичности работы турбины с использованием этого способа и регулированием температуры пара, отпускаемого потребителям частью свежего пара через РОУ, отдано предпочтение последнему (см. рис. 7).

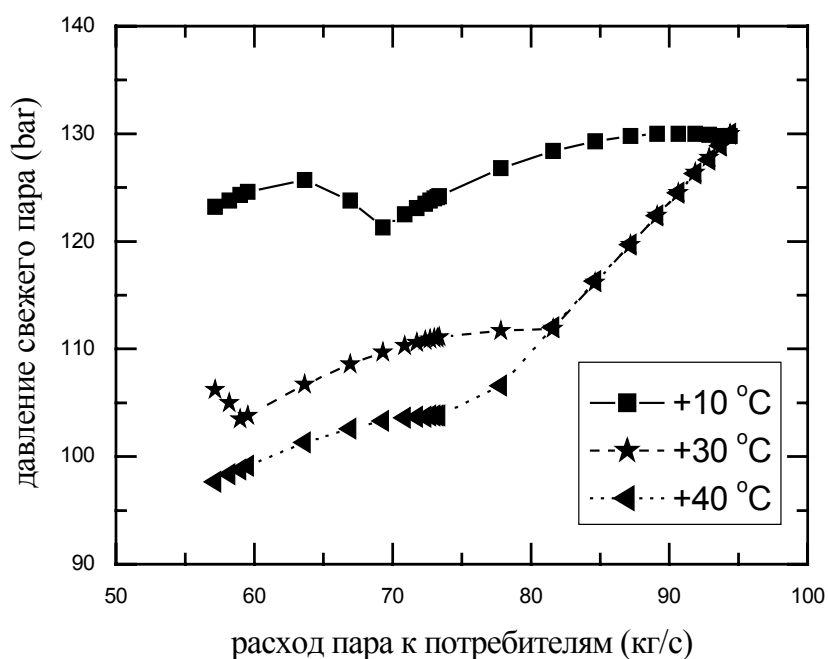


Рис.(5) . Изменение давления свежего пара при изменении тепловой нагрузки для повышения температуры пара за турбиной на значения +10, +30, +40 °С способом скользящего начального давления при противодавлении 15 bar

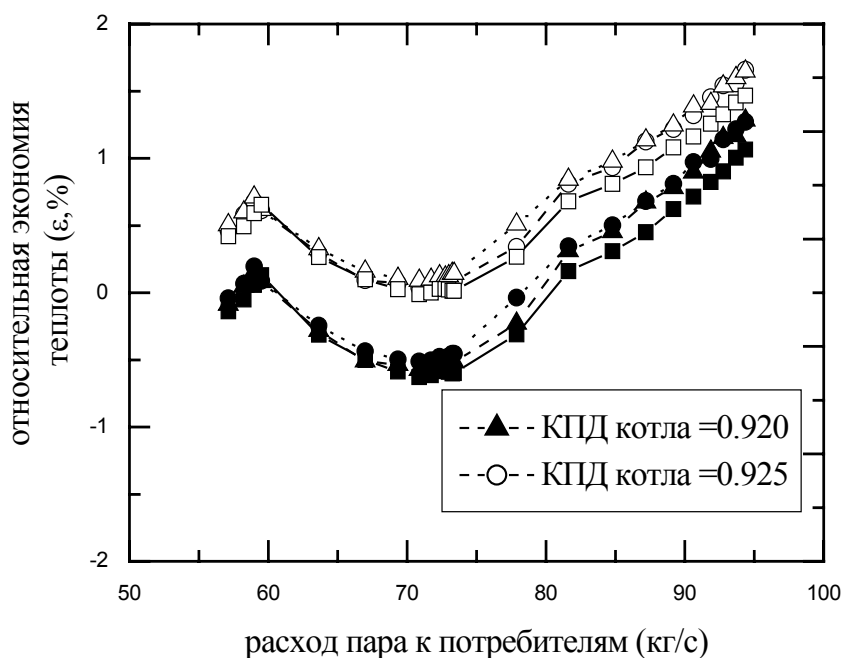


Рис.(6) .Изменение относительной экономии теплоты с изменением тепловой нагрузки при различных противодавлениях при использовании способа скользящего давления свежего пара ( $t = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

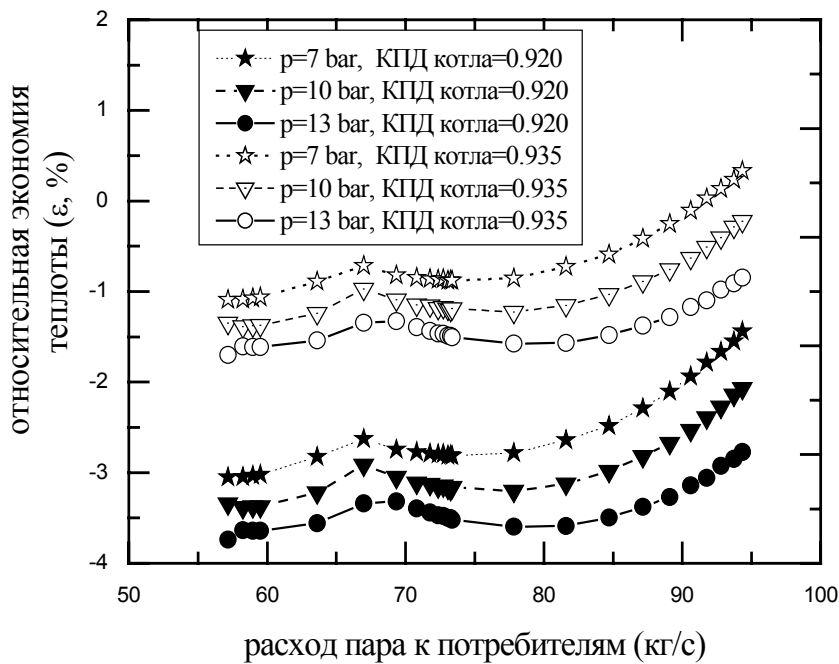


Рис.(7) . Изменение относительной экономии теплоты с изменением тепловой нагрузки при различных противодавлениях при использовании способа комбинирования ( $t = +30\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

По мнению некоторых авторов, можно повышать температуру свежего пара на  $20\text{--}25\text{ }^{\circ}\text{C}$  при использовании способа скользящего давления свежего пара.

Таким образом, чтобы сэкономить топливо и расширить пределы возможности регулирования температуры пара за турбиной автором предложен комбинированный способ с повышением температуры свежего пара на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Расчеты, выполненные с применением этого способа, показали, что турбина может обеспечивать при разных противодавлениях и любых тепловых нагрузках паром с температурой на  $40\text{--}60\text{ }^{\circ}\text{C}$  выше температуры, возникающей при работе турбины без регулирования в номинальном режиме, как видно из рис. 8.

С учетом возможности повышения КПД котла предпочтения отдано этому способу (см. рис. 9).

Расчеты выполнены при работе турбины без регулирования температуры пара за ней с возможностью удовлетворения только температуры, требуемой потребителями, показали преимущество использования всех предлагаемых способов регулирования. Величина роста экономии теплоты повышается с повышением отличия температуры пара за турбиной от температуры, требуемой потребителями, как показано на рис. 10.

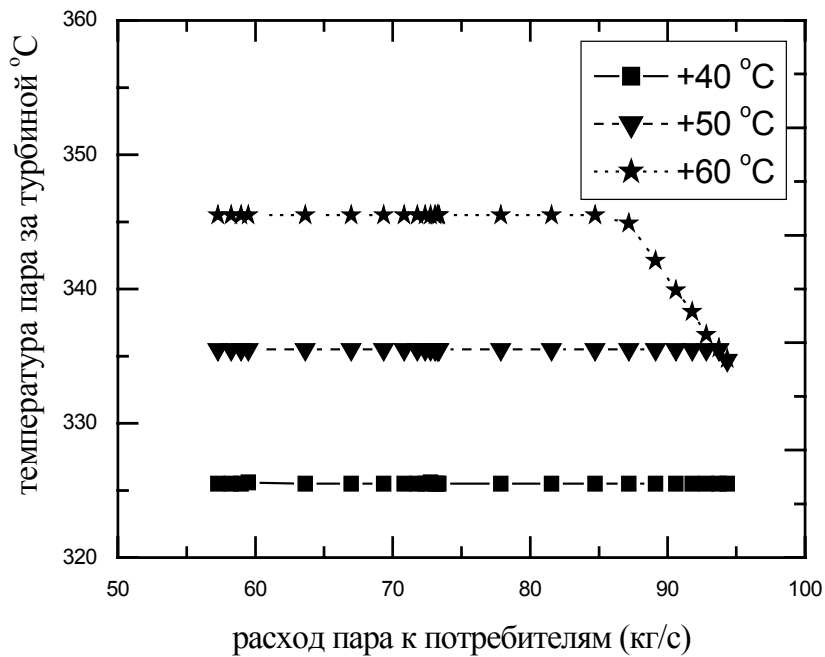


Рис.(8) . Изменение температуры пара за турбиной при использовании способа комбинирования с повышением температуры свежего пара до  $585\text{ }^{\circ}\text{C}$  при противодавлении  $15\text{ bar}$

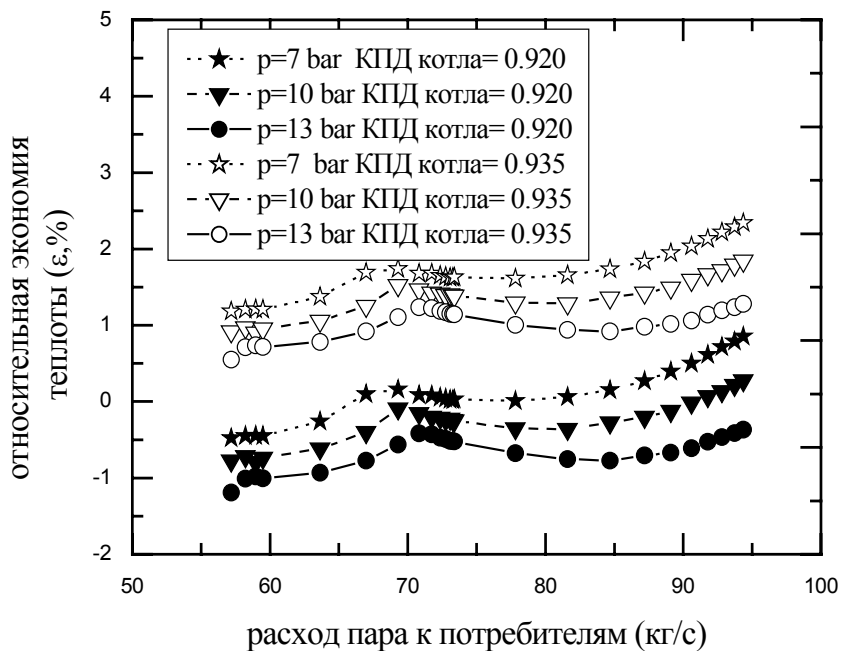


Рис.(9) . Изменение относительной экономии теплоты с изменением тепловой нагрузки при различных противодавлениях при использовании способа комбинирования с повышением температуры свежего пара на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $t = +40\text{ }^{\circ}\text{C}$ )

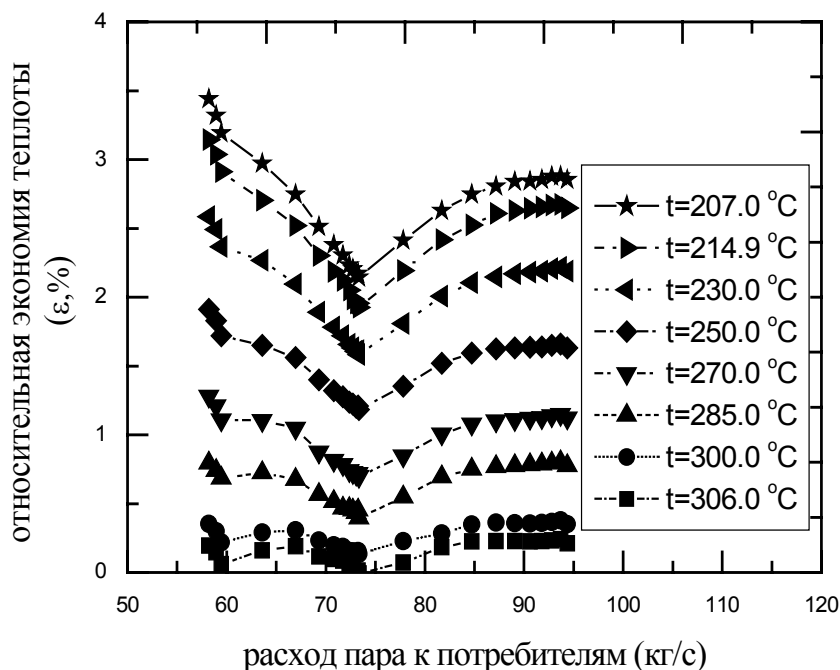


Рис.(10) .Изменение относительной экономии теплоты при использовании способа переменной температуры свежего пара при противодавлении 18 bar для разных расходов пара к потребителям

В пятой главе рассмотрена также возможность регулирования температуры пара за турбиной способом скользящего противодействия. Анализ полученных результатов использования этого способа показывает, что максимальное и минимальное давление пара за турбиной, определенные заводом-изготовителем для турбины Р-50-12,7/1,3 может служить ограничивающими параметрами использования этого способа.

Таким образом, максимальная и минимальная температура пара, которым обеспечивает потребителей турбина Р-50-12,7/1,3 ,способ скользящего противодействия дает, соответственно, 324, 214 °С.

Сравнение экономичности работы турбины при использовании способа скользящего противодействия с другими способами повышения температуры пара за турбиной и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки ( способ скользящего давления свежего пара и комбинированный способ с повышением температуры свежего пара на 20 °С) дало преимущества последним способам, учитывая большее повышение КПД котла. Несмотря на то, что рост экономии топлива повышается при использовании способа скользящего противодействия для уменьшения температуры пара за турбиной по сравнению со способом переменной температуры свежего пара, его применение ограничивается давлением и температурой пара требуемыми потребителями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Расчетными исследованиями установлена возможность уменьшения температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3 до температуры насыщения, соответствующей противодействию, и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки способом переменной температуры свежего пара. Даны рекомендации по его реализации.

2. Установлена принципиальная возможность повышения температуры пара за турбиной Р-50-12,7/1,3 на 60 °С (до 384 °С) при различных противодействиях и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки следующими способами:

- скользящего начального давления свежего пара;
- скользящего давления свежего пара при отключении всех ПВД;
- повышения температуры свежего пара на 20 °С при использовании скользящего начального давления свежего пара с отключением всех ПВД.

3. Расчетными исследованиями определен наиболее экономичный способ повышения температуры пара за турбиной Р-50—12,7/1,3 до 324 °С при различных противодействиях и удержания ее постоянной при изменении тепловой нагрузки.

4. Показана экономическая эффективность внедрения следующих способов для регулирования температуры пара за турбиной типа :

- переменной температуры свежего пара;
- скользящего противодействия;
- скользящего давления свежего пара;
- скользящего начального давления свежего пара при отключении всех ПВД;
- скользящего начального давления свежего пара при отключении всех ПВД и повышении температуры свежего пара на 20 °С.

5. Внедрение способов регулирования температуры пара за турбиной связано со снижением параметров пара, что гарантирует увеличением паркового ресурса котлов и надежности работы металла труб поверхности нагрева.

6. Благодаря внедрению рассматриваемых способов регулирования температуры пара за турбиной, турбина Р-50-12,7/1,3 может обеспечивать потребителей паром с температурой насыщения до температуры, равной 384 °С при любых противодействиях и тепловых нагрузках.

## СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. М.Р. Хассан, В.А. Иванов. Анализ путей регулирования температуры и давления пара турбины типа «Р»// XXIX Неделя науки СПбГТУ. ч.11: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2000 года , С. 87.

2. М.Р. Хассан, В.А. Иванов, В.М. Боровков. Возможность повышения температуры свежего пара для регулирования температуры пара за турбиной



типа «Р» как составляющая часть курса «Режимы работы ТЭС»// Материалы IX Международной научно-методической конференции «Высокие интеллектуальные технологии образования науки» 14–15 февраля 2002 года. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2002. С. 167.

3. М.Р. Хассан, В.А. Иванов, В.М. Боровков. Регулирование температуры пара за турбиной типа «Р» способом перемены температуры свежего пара// Межвузовский сборник «Проблема экономии топливно-энергетических ресурсов на пром. предприятиях и ТЭЦ». СПб., 2002. С. 185–193.

4. М.Р. Хассан, В.А. Иванов, В.М. Боровков. Влияние изменения температуры свежего пара на характеристики турбины Р-50-12,7/1,3// Межвузовский сборник «Проблемы экономии топливно-энергетических ресурсов на пром. предприятиях и ТЭЦ». СПб, 2002. С. 177–185.

5. М.Р. Хассан, В.А. Иванов, В.М. Боровков. К вопросу о повышении температуры пара за турбиной типа Р-50-12,7/1,3// Межвузовский сборник «Проблема экономии топливно-энергетических ресурсов на пром. предприятиях и ТЭЦ». СПб, 2002. С. 193–203.

6. М.Р. Хассан, В.М. Боровков. Паровые турбины с противодавлением типа «Р» и их перспективные в повышении эффективности ТЭЦ малой и средней мощности// Сборник научных трудов НПО ЦКТИ, выпуск 288, 2002.