

*На правах рукописи*

**КОШЕЛЕВ**  
**Степан Михайлович**

**ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ СИСТЕМЫ РЕГЕНЕРАЦИИ НА  
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ЭНЕРГОБЛОКОВ КЭС И ТЭЦ**

Специальность: 05.14.14 — "Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты"

**Автореферат**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ — 2005**

Работа выполнена в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Научный руководитель:

— доктор техн. наук, профессор *Боровков Валерий Михайлович*

Официальные оппоненты:

— доктор техн. наук *Кругликов Петр Александрович*

— кандидат техн. наук, доцент *Демидов Олег Игоревич*

Ведущая организация: *ОАО "Территориальная генерирующая компания №1", Санкт-Петербург.*

Защита состоится 27 декабря 2005 г. в 16-00 на заседании диссертационного совета Д 212.229.04 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:

195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29  
в аудитории 411 ПК

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан "\_\_\_" 2005 г.

Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, в двух экземплярах просим направить по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Факс: (812) 5527684

E-mail: kg@kg1210.spb.edu

Ученый секретарь  
диссертационного совета

*К.А.Григорьев*

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность работы.**

Современные тепловые электростанции характеризуются большим разнообразием режимов работы. В связи с изменением структуры энергопотребления и разуплотнением графиков электрических нагрузок оборудование, работавшее в базовом режиме, привлекается для регулирования нагрузок и переходит в полупиковый режим работы, что приводит к необходимости глубоких разгрузок.

Неотъемлемой частью любой современной паротурбинной установки является система регенеративного подогрева питательной воды. Применение регенеративного подогрева на ТЭС увеличивает КПД конденсационных турбоустановок, приводит к росту электрической выработки на тепловом потреблении для теплофикационных установок.

Системы регенеративного подогрева питательной воды турбоустановок разрабатывались достаточно давно. Их характеристики и режимы работы соответствовали режимам работы соответствующих блоков. Роль систем регенерации для установок различных классов неодинакова, она меняется в зависимости от режима работы установки.

В связи с этим актуальной является задача оценки роли регенерации и влияния ее на экономичность ПТУ на ряде режимов:

- роль регенерации при работе конденсационной ПТУ на частичных нагрузках исследована недостаточно.

- для ТЭЦ остается неясной роль регенерации при работе на режимах с малыми пропусками пара в конденсатор. Эти режимы являются практически основными для ПТУ, работающих по тепловому графику нагрузок.

### **Цель работы.**

Оценка влияния регенерации на эффективность конденсационных и теплофикационных турбоустановок, работающих на ряде характерных режимов; определение оптимальных коэффициентов регенерации при работе на этих режимах; разработка технических предложений по повышению эффективности блоков КЭС и ТЭЦ с учетом работы системы регенерации; разработка технических предложений по модернизации теплофикационных энергоблоков по парогазовой схеме с учетом работы системы РППВ.

### **Научная новизна работы.**

- исследована работа конденсационной турбоустановки на частичных режимах, теплофикационной турбоустановки на режимах с малыми пропусками пара в конденсатор.

- выявлено влияние режимов работы системы РППВ на показатели и эффективность работы котла, определена зависимость температуры уходящих газов котла от температуры питательной воды, обоснована возможность работы котла с пониженной температурой уходящих газов.

- определены оптимальные режимы работы системы РППВ для теплофикационных и конденсационных ПТУ, определено влияние режима работы системы РППВ на эффективность энергоблоков ТЭЦ.

- в ходе испытаний на турбине ПТ-25-90 ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго» выявлены ограничения, имеющие место при переводе турбины на режим с отключенными подогревателями высокого давления. Определены особенности работы ПТУ с отключенными ПВД на неблочных ТЭЦ.

### **Практическая ценность работы.**

- заключена в разработке технических предложений по повышению эффективности работы энергоблоков КЭС на частичных нагрузках и ТЭЦ на режимах с минимальными пропусками пара в конденсатор:

- для энергоблоков КЭС: переключение последнего по ходу питательной воды ПВД на дополнительный отбор, подключение дополнительного ПВД;

- для энергоблоков ТЭЦ: отключение последнего по ходу питательной воды ПВД в целях вытеснения пара отбора в проточную часть и получения дополнительной мощности без потерь в конденсаторе.

- снижение температуры уходящих газов котла теплофикационных блоков при отключении ПВД;

- проработка технических решений по модернизации теплофикационных блоков по схеме ПГУ с вытеснением регенерации.

**Надежность и достоверность** полученных результатов обеспечиваются: проведением расчётных и экспериментальных исследований в соответствии с действующими в России стандартами, методиками и нормативными документами; применением современной электронно-вычислительной техники и программного обеспечения. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными в результате испытаний на ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго».

### **Апробация работы.**

Апробация результатов работы проводилась

- на научно-технической конференции «Проблемы развития централизованного теплоснабжения», г. Самара, 2004 г;
- на научно-техническом совете кафедры «Промышленная теплоэнергетика» Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбГПУ)
- в ходе испытаний на ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго».

В диссертационной работе **лично автором:**

- проанализировано состояние вопроса о роли системы регенеративного подогрева питательной воды для турбоустановок различных классов;
- проведена оценка влияния работы системы регенерации на эффективность конденсационных и теплофикационных турбоустановок на различных режимах их работы;
- исследовано влияние режима работы системы регенерации на характеристики котла;
- разработаны мероприятия по повышению эффективности работы системы регенерации турбоустановок теплофикационных блоков при их работе на режиме с малым пропуском пара в конденсатор;
- исследованы характеристики теплофикационной парогазовой установки, выполненной по схеме с вытеснением пара регенеративных отборов;
- принималось непосредственное участие в проведении испытаний турбоустановки ПТ-25-90 ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго» с отключенными ПВД, проведена обработка и анализ их результатов;
- проведен анализ и обобщение результатов исследований и сформулированы выводы.

### **Автор защищает:**

- результаты расчетного исследования работы системы РППВ конденсационных турбоустановок при их работе на частичных режимах; системы РППВ теплофикационных установок при их работе режимах с минимальными пропусками пара в конденсатор;
- способ увеличения КПД конденсационной турбоустановки при ее работе на частичных режимах;
- способ увеличения электрической и тепловой мощности теплофикационных энергоблоков при работе их турбоустановок на режимах с минимальными пропусками пара в конденсатор, а также при увеличении этого расхода до максимального.

- результаты расчета показателей работы теплофикационной парогазовой установки с вытеснением пара регенеративных отборов;
- результаты испытаний турбоустановки ПТ-25-90 ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго» при ее работе с отключенными ПВД, результаты сравнения полученных показателей с расчетными.

Автор имеет 9 публикаций, из них по теме диссертации 4 (см. список публикаций).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и списка использованных источников (102 наименования). Объем – 113 страниц, 22 рисунка, 11 таблиц, 2 приложения.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность и поставлена цель работы, определены основные задачи исследования, отражены научная новизна полученных результатов, их практическая ценность и апробация.

**В первой главе** на основании публикаций и научных трудов проведен анализ состояния вопроса о влиянии системы регенеративного подогрева питательной воды на эффективность конденсационных, теплофикационных и влажнопаровых турбоустановок. Определены основные направления совершенствования систем регенерации паротурбинных установок.

Для конденсационных блоков широко освещены в литературе такие направления, как выбор оптимального числа ступеней подогрева, оптимальных параметров отборов, получение дополнительной (пиковой) мощности за счет отключения ПВД и вытеснения пара отборов в проточную часть. Широко рассмотрены вопросы применения схем регенерации низкого давления со смешивающими подогревателями и схем включения охладителей пара и дренажа регенерации высокого давления.

В связи с изменением структуры энергопотребления и графиков электрических нагрузок, конденсационные установки часто используются для работы с периодическим снижением мощности (в полупиковых режимах). Работа системы РППВ и ее влияние на эффективность ПТУ при этих режимах работы освещено недостаточно.

Из анализа работ, посвященных оптимизации работы системы РППВ теплофикационных ПТУ, можно выделить следующие основные направления исследований в этой области: независимое регулирование тепловой и электрической мощности теплофикационных турбин и получение дополнительной

электрической мощности путем отключения ПВД. Широко освещены вопросы снижения потерь в ЦНД и конденсаторе с вентиляционным потоком пара.

Роль системы регенерации заключается в снижении потерь тепла в холодном источнике (конденсаторе), за счет чего повышается КПД цикла паротурбинной установки. Однако влияние регенерации на эффективность ПТУ при отсутствии этих потерь в работах не отмечено. Поэтому из анализа публикаций можно сделать вывод, что для теплофикационных турбоустановок, работающих с минимальным пропуском пара в конденсатор, т.е. при отсутствии потерь в холодном источнике, роль системы регенерации остается неясной.

Проанализирована роль системы РППВ при модернизации действующих турбоустановок по парогазовой схеме (с котлами-утилизаторами, со сбросом газов в топку котла, с вытеснением регенерации). Одной из перспективных схем модернизации ТЭС по комбинированному (парогазовому) циклу являются ПГУ с вытеснением регенерации. Они отличаются простотой реализации, минимумом вмешательства в конструкцию действующего оборудования, возможностью применения на твердотопливных энергоблоках. Возможности и характеристики этих комбинированных установок при работе на конденсационном и теплофикационном режимах исследованы недостаточно.

Проанализированы особенности конструкций новых теплообменных аппаратов для систем регенерации. Новые конструкции подогревателей более надежны, имеют меньшую металлоемкость, обеспечивают меньшие недогревы питательной воды до температуры насыщения. Методы и принципы, на основе которых создается новое оборудование систем регенерации паротурбинных установок, применяются и при создании теплообменного оборудования для нужд промышленной энергетики и ЖКХ.

**Во второй главе** приводятся теоретические положения, обосновывающие эффективность регенеративного подогрева. В качестве критерия оценки эффективности системы регенерации используется коэффициент регенерации

$$K_P = \frac{(h_0 - h'_z) \cdot (1 - \sum \alpha_i y_i)}{h_0 - h_{ПВ}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_i = G_i/G$  – отношение расхода пара в  $i$ -й регенеративный подогреватель, к расходу свежего пара на турбину;  $y_i = H_i/H$  – коэффициент невыработки для потока пара в  $i$ -й регенеративный подогреватель;  $h_0, h_{ПВ}, h'_z$  – энтальпии свежего пара, питательной воды и конденсата в конденсаторе соответственно.

$K_p$  определяется из формулы для внутреннего КПД конденсационной турбоустановки:

$$\eta_i^T = \frac{N}{Q} = \frac{\sum G_i H_i}{G(h_0 - h_{нс})} = \frac{GH - \sum G_i H_i}{G(h_0 - h_{нс})}$$

$$\eta_i^T = \eta_t \cdot \eta_{oi} \cdot K_p, \quad (2)$$

где  $G$  – расход пара на турбину;  $H$  – использованный перепад энтальпий турбины;  $G_i$  – количество пара, отбираемого в  $i$ -й регенеративный подогреватель;  $H_i$  – недоиспользованный перепад энтальпий пара от точки отбора до выходного патрубка турбины

Для теплофикационных ПТУ величина  $K_p$  может быть представлена в следующем виде:

$$K_p = \frac{(1 - \sum \alpha_i y_i - \sum \alpha_j y_j) \left[ (h_0 - h_z') - \sum \alpha_j (h_a - h_a') \right]}{(h_0 - h_{нс}) - \sum \alpha_j (h_a - h_a')}, \quad (3)$$

что следует из формулы для внутреннего КПД теплофикационной установки:

$$\eta_i^T = \frac{N - Q_{OT}}{Q} = \frac{(1 - \sum \alpha_i y_i - \sum \alpha_j y_j) H}{(h_0 - h_{нс}) - \sum \alpha_j (h_a - h_a')} \cdot \frac{H_t \left[ (h_0 - h_z') - \sum \alpha_j (h_a - h_a') \right]}{H_t \left[ (h_0 - h_z') - \sum \alpha_j (h_a - h_a') \right]}$$

где  $Q_{OT}$  – тепловая нагрузка турбины;  $\alpha_j = G_j/G$  – отношение расхода пара в  $j$ -й теплофикационный подогреватель, к расходу свежего пара на турбину;

$y_j = H_j/H$  – коэффициент недовыработки для потока пара в  $j$ -й теплофикационный отбор;  $h_a$  и  $h_a'$  – энтальпия пара и конденсата, отбираемого на теплофикацию.

Как следует из формулы (3), коэффициент регенерации теплофикационной установки находится в зависимости не только от параметров и числа отборов пара на регенеративные подогреватели, но и от тепловой нагрузки турбины. При прочих равных условиях

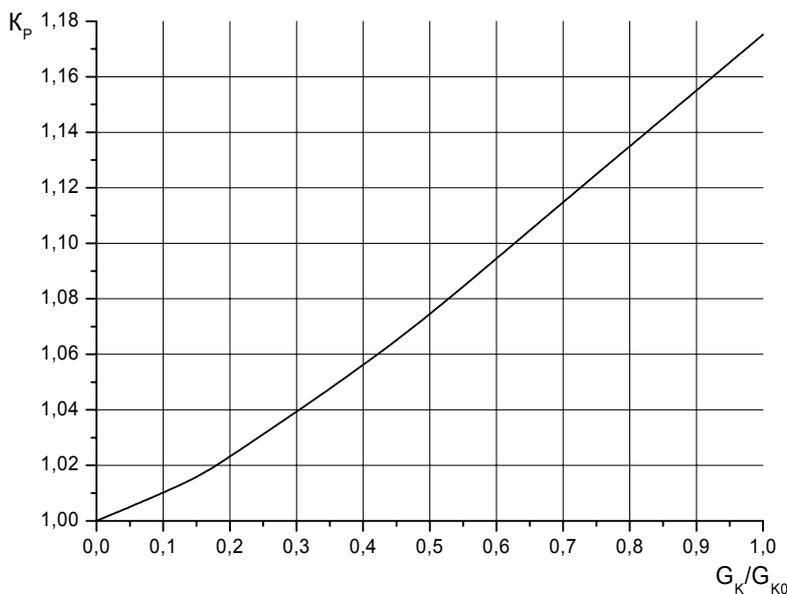


Рис. 1. Зависимость коэффициента регенерации от пропуска пара в конденсатор теплофикационной турбоустановки

тепловая нагрузка характеризуется пропуском пара в конденсатор. На рис. 1 показана зависимость коэффициента регенерации от относительного пропуска пара в конденсатор  $G_K/G_{K0}$ .

Как видно из графика, при нулевом пропуске пара в конденсатор, т.е. на режиме, когда весь пар из турбины поступает в теплофикационные отборы, т.е.  $G_K/G_{K0} = 0$ ,  $K_P = 1$ . Это означает, КПД установки на этом режиме не зависит от регенерации.

**В третьей главе** проведено исследование работы системы регенерации турбоустановок энергоблоков КЭС при их работе на частичном режиме (с пониженной нагрузкой). Регенеративные подогреватели подключены к камерам нерегулируемых отборов пара из турбины, давление в которых меняется при изменении расхода пара, поступающего в турбину. Этим фактором, а также изменением расхода питательной воды через подогреватели определяется изменение условий работы системы РППВ на частичных нагрузках.

Показано, как изменится коэффициент регенерации при снижении нагрузки турбины путем уменьшения расхода пара на нее, характеризуемого относительным расходом  $G_{II}/G_{II0}$ . Преобразуем формулу (1) к виду:

$$K_P = \frac{1 - \sum \alpha_i y_i}{1 - (h_{IIВ} - h'_z) / (h_0 - h'_z)} \quad (4)$$

С уменьшением мощности турбины давление в камерах регенеративных отборов понижается. Соответственно этому уменьшается температура подогрева питательной воды и доля теплоты, подведенной к рабочему телу в системе РППВ, характеризуемая величиной  $(h_{IIВ} - h'_z) / (h_0 - h'_z)$ . Одновременное уменьшение расхода питательной воды и общего подогрева ее в системе РППВ приводит к тому, что доля пара, отбираемого в регенеративные подогреватели, сокращается. В то же время в связи со снижением давления в разных точках проточной части турбины уменьшаются недоиспользованные перепады энтальпии от камер отбора до выхлопного патрубка. Совокупность отмеченных факторов приводит к тому, что при снижении нагрузки уменьшается доля мощности, невыработанной паром регенеративных отборов, характеризуемая величиной  $\sum \alpha_i y_i$  в формуле (4). Одновременное уменьшение значений обуславливает неопределенность в направлении изменения  $K_P$ . Однако, по результатам расчета коэффициент регенерации  $K_P$  снижается при уменьшении нагрузки

(рис. 2-б, кривая 1), чем обусловлено общее снижение эффективности системы РППВ при разгрузке турбины.

Подогрев питательной воды до температуры, близкой к номинальной приведет к восстановлению  $K_p$  при работе турбины на частичной нагрузке. Для этого используется дополнительный отбор пара, с давлением выше, чем в последнем отборе на ПВД. Возможно два варианта использования теплоты пара этого отбора: переключение на него последнего по ходу питательной воды ПВД (ПВД-8) и подключение дополнительного ПВД.

Переключение последнего ПВД на дополнительный отбор производится тогда, когда давление в нем станет равно давлению в основном отборе при номинальной нагрузке. Это происходит при  $G_{п} / G_{п0} = 0,72$  (пунктирная линия на рис. 2).

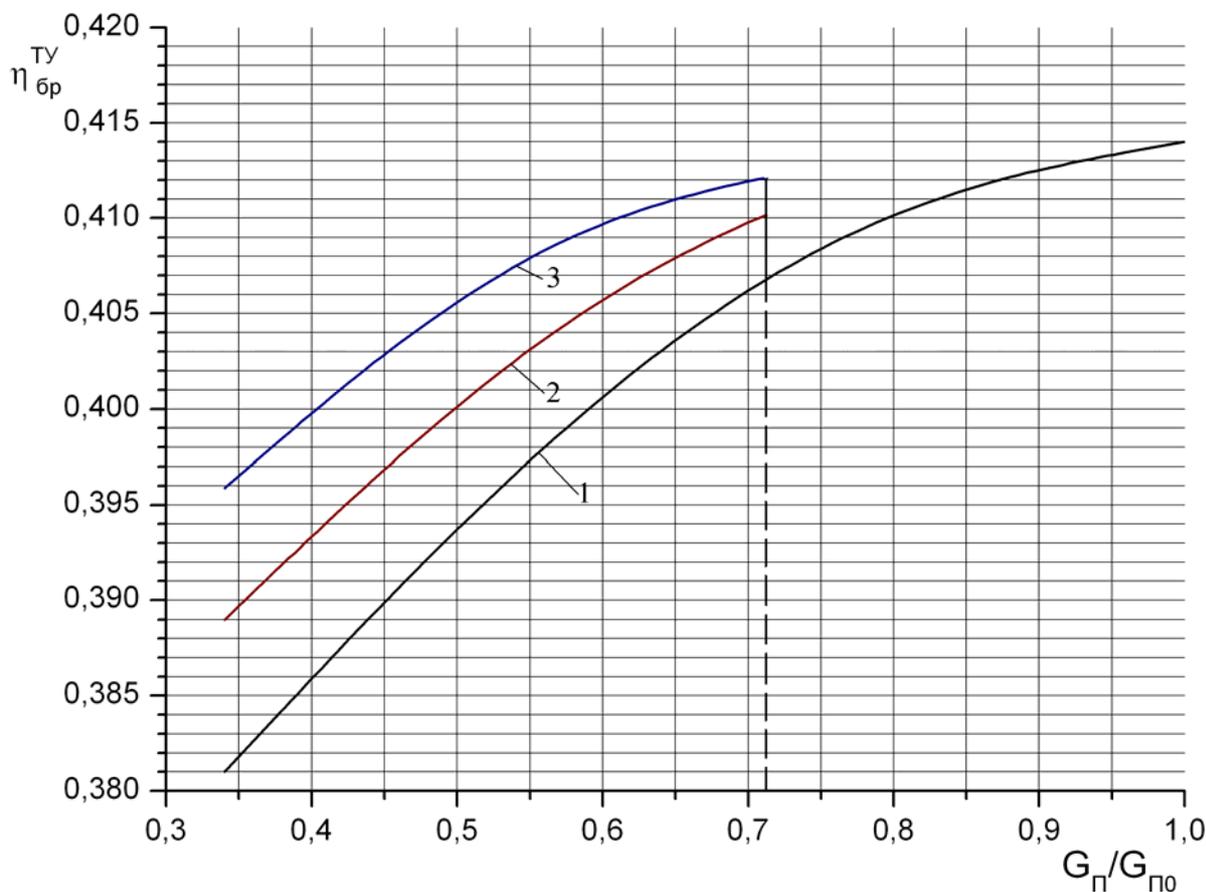


Рис. 2. Изменение КПД турбоустановки в зависимости от расхода пара на турбину. 1 – базовый вариант, 2 – переключение ПВД на дополнительный отбор, 3 – подключение дополнительного ПВД.

При переключении ПВД на дополнительный отбор происходит повышение температуры питательной воды до 509 К (236<sup>0</sup>С), рост коэффициента регенерации, а как следствие и КПД ПТУ (рис. 2, кривая 2). При дальнейшем сни-

жении нагрузки КПД продолжает снижаться, однако его значение выше, чем в базовом варианте.

Подключение к дополнительному отбору дополнительного ПВД обеспечивает повышение КПД ТУ на 0,8% при минимальной нагрузке, равной  $0,38 N_{ном}$ , чем переключение на него ПВД-8.

Проведена оценка характеристик работы котла при работе блока на частичной нагрузке. На рис. 3. приведена  $Q\vartheta$  – диаграмма котла с указанием тепловосприятий поверхностей нагрева  $BQ$ . Параметры, лежащие на линии 2, соответствуют режиму снижения производительности при сохранении  $t_{не} = const$  (режим с использованием дополнительного отбора пара). Как видно из диаграммы, при уменьшении нагрузки котла общее тепловосприятие поверхностей уменьшается, однако доля в нем конвективного тепловосприятия растет, а радиационного уменьшается. Это приводит к уменьшению температур газов за поверхностями, в том числе и температуры уходящих газов  $\vartheta_{yx}$ . Поэтому КПД

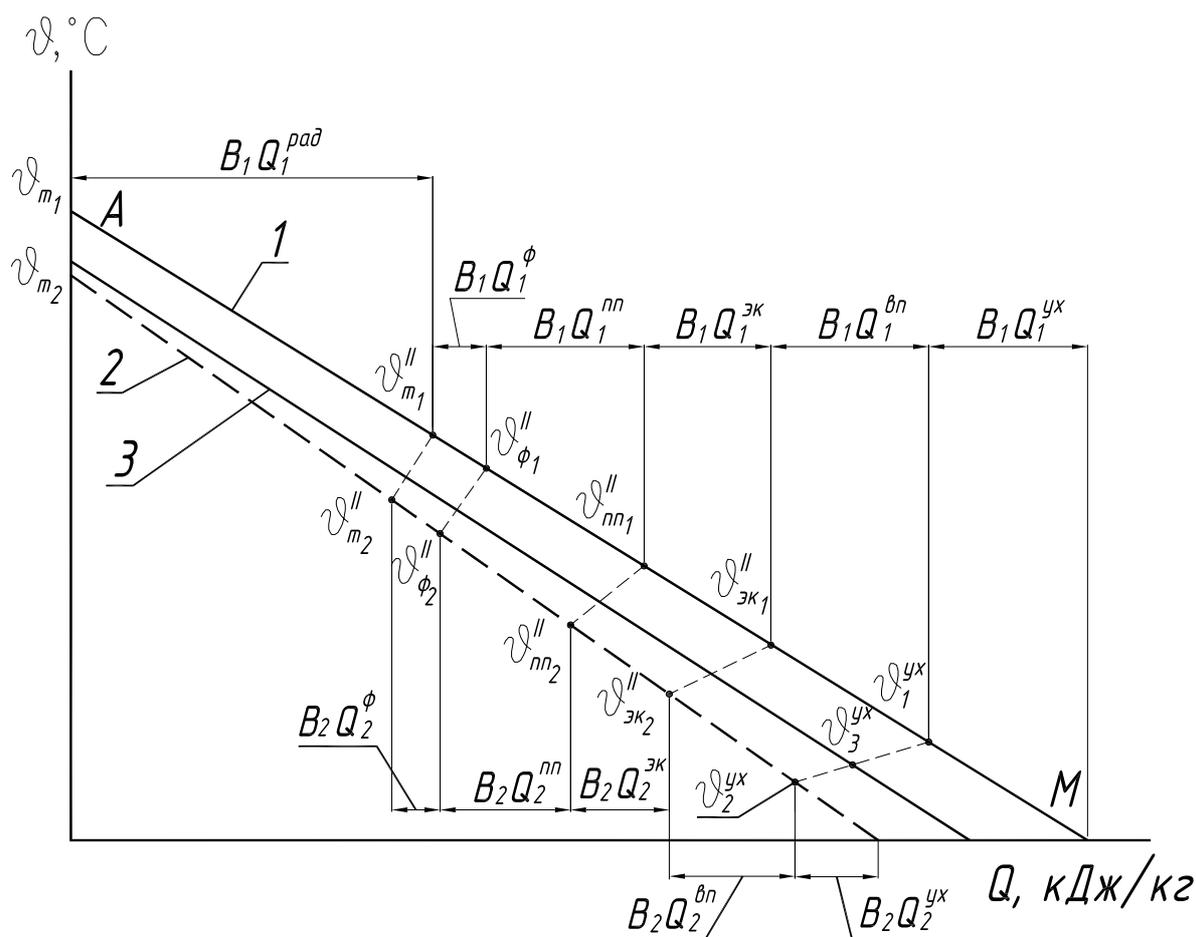


Рис. 3.  $Q\vartheta$  – диаграмма котлоагрегата при изменении нагрузок. 1 – начальная паропроизводительность  $G_1$ ; 2 – сниженная паропроизводительность  $G_2$ ,  $t_{не} = const$ ; 3 – сниженная паропроизводительность  $G_2$  и сниженная  $t_{не}$ .

котла брутто при прочих равных условиях увеличится.

Линия 3 соответствует режиму разгрузки со снижением  $t_{ng}$  (базовый режим). Как видно, из диаграммы, температура уходящих газов  $\mathcal{G}_2^{yx} < \mathcal{G}_3^{yx}$ , что свидетельствует о росте КПД котла на частичной нагрузке при использовании дополнительного отбора пара для подогрева питательной воды.

**В четвертой главе** исследуется работа системы регенерации для теплофикационных турбоустановок.

При работе паротурбинной установки с малым пропуском пара в конденсатор потери в холодном источнике практически отсутствуют. Коэффициент регенерации равен 1 (рис. 1). Следовательно, система регенерации не влияет на внутренний КПД ПТУ, который на этом режиме приближается к 1,0. Отключение части подогревателей (ПВД) позволит вытеснить пар их отборов в проточную часть и получить дополнительную мощность без снижения КПД установки.

При отключении ПВД температура питательной воды на входе в котел уменьшается. При постоянном расходе топлива это приведет к снижению температуры уходящих газов  $t_{yx}$ , и как следствие – к увеличению КПД котла. Основным ограничивающим фактором для снижения  $t_{yx}$  на котлах, работающих на природном газе, является температура начала выпадения влаги (точка росы) на поверхностях нагрева (воздухоподогреватель, экономайзер). Парциальное давление водяного пара при сжигании газового топлива в уходящих газах  $p_{H_2O} = 0,0184$  МПа, что соответствует температуре точки росы 328 К (55<sup>0</sup>С). Исходя из этой величины, можно говорить о допустимости снижения  $t_{yx}$  от номинального значения 403 К (130<sup>0</sup>С) до 353-363 К (80-90<sup>0</sup>С) для котлов на газовом топливе.

При сохранении прежнего расхода топлива В понижение температуры (и соответственно энтальпии) питательной воды  $h_{ng}$  вызывает уменьшение паропроизводительности  $G$  котла при неизменном расходе топлива.

Для анализа тепловых процессов по поверхностям нагрева применим  $Q\vartheta$  – диаграмму котла (рис. 4). Понижение температуры питательной воды изменяет в первую очередь работу водяного экономайзера: в нем увеличивается температурный напор, а следовательно, и удельное тепловосприятие  $Q^{ЭК}$ . Температура газов при постоянном расходе топлива уменьшается как за водяным экономайзером, так и за котлом, поэтому КПД котла увеличивается. Температуры газов на выходе из топки и за пароперегревателем немного понижаются. Радиационное тепловосприятие в топке тоже несколько снижается (так как уменьши-

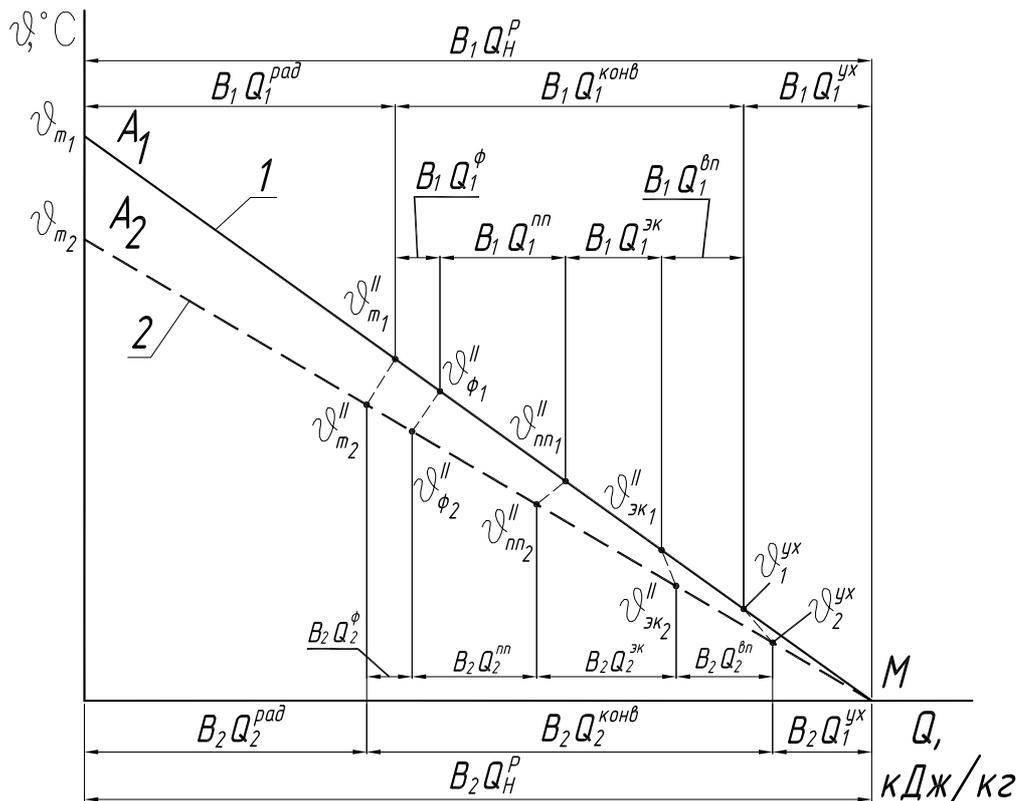


Рис. 4.  $Qv$  – диаграмма котла при изменении температуры питательной воды и постоянном значении расхода топлива.

лась теоретическая температура сгорания из-за снижения температуры подогрева воздуха в воздухоподогревателе), однако рост КПД котла, свидетельствующий о повышении общего удельного тепловосприятия ( $Q_{рад} + Q_{конв}$ ), достигается за счет более интенсивного увеличения конвективного тепловосприятия.

Уменьшение паропроизводительности котла означает уменьшение расхода свежего пара на турбину  $G_0$ , что приведет к снижению ее мощности. Соотношение мощности, получаемой при вытеснении пара отборов в проточную часть и теряемой при уменьшении  $G_0$  и будет определять эффект от отключения ПВД.

Мощность, вырабатываемая паром  $i$ -го ПВД

$$\Delta N_{\Pi i} = G_{\Pi i} (h_{\Pi i} - h_r),$$

где  $G_{\Pi i}$  и  $h_{\Pi i}$  – соответственно расход и энтальпия пара, идущего в  $i$ -й ПВД,  $h_r$  – энтальпия точки окончания процесса расширения, в данном случае – теплофикационного отбора.

Из уравнения теплового баланса котла

$$B_p = \frac{G_0 (h_0 - h_{не}) \cdot 100}{Q_p^P \cdot \eta_{ка}} \quad (5)$$

определяется новый расход пара на турбину при  $i$ -м отключенном ПВД:

$$G_0^{(i)} = \frac{\eta_{ка} \cdot Q_P^P \cdot B_P}{(h_0 - h_{нг}^{(i)}) \cdot 100} = \frac{A}{h_0 - \left( h_{нг} - \sum_{i=1}^3 \Delta h_{нг}^{(i)} \right)}, \quad (6)$$

где  $A = \frac{\eta_{ка} \cdot Q_P^P \cdot B_P}{100} = \text{const}$ ,  $\Delta h_{нг}^{(i)}$  – увеличение энтальпии в  $i$ -м ПВД (при номинальном режиме).

Мощность турбины уменьшится на величину

$$\Delta N_T^{(1)} = (G_0 - G_0^{(1)}) \cdot (h_0 - h_T).$$

Величина

$$\Delta N_i = \Delta N_{Pi} - \Delta N_T^{(i)} \quad (7)$$

будет определять изменение внутренней мощности турбины в результате отключения ПВД.

В табл. 1 приведены результаты расчета показателей теплофикационной турбоустановки Т-110/120-130 при отключении одного, двух и трех ПВД.

Наиболее оптимальным с точки зрения увеличения тепловой  $Q_{ТУ}$  и электрической  $N_i$  мощности является режим работы с одним (верхним) отключенным ПВД.

Проведено также определение эффективности отключения ПВД при появлении пропуска пара в конденсатор. Существует значение тепловой мощности (определяемой в данном случае расходом пара в конденсатор), при которой величина КПД ТЭЦ с отключенными ПВД сравнивается с КПД ТЭЦ при полностью включенной регенерации. Для турбоустановки Т-110/120-130 это значение составляет 194,9 МВт, расход пара в конденсатор 8,47 кг/с. Отключение верхнего ПВД будет выгодным только при расходе пара в конденсатор меньше 8,47 кг/с.

Таблица 1

Показатели турбоустановки Т-110/120-130 на режимах с отключенными ПВД

Параметры	Номинальный режим	Отключено 3 ПВД	Отключено 2 ПВД	Отключен 1 ПВД
$Q_{ТУ}$ , МВт	201,3	211,5	212,7	208,4
$N_i$ , МВт	103,7	101,2	103,3	105,5
$t_{нг}$ , °С	239,3	158,8	178,3	217,2
$K_p$	1,0			
$G_0$ , кг/с	126,3	113,3	116,8	124,7
$t_{вх}$ , °С	139	80	80	80
$\eta_{ка}$ , %	92,5	94,5	94,5	94,5

Полностью использовать пар регенеративных отборов помог бы подвод теплоты к питательной воде из внешнего источника. Таким источником могут быть уходящие газы газотурбинной установки.

В работе проведено исследование парогазовой установки, в которой уходящие газы ГТУ используются для подогрева питательной воды до номинальной температуры в газо-водяном теплообменнике (ГВТ). ГВТ включает три контура: высокого и низкого давления и контур сетевой воды, включаемый параллельно с сетевыми подогревателями турбины. Вытесняемый из отборов высокого и низкого давления пар вырабатывает дополнительную мощность в паровой турбине. Большинство паровых турбин не рассчитаны на пропуск начального расхода пара через последние ступени ЦНД в конденсатор, однако работа турбин с отключенными ПВД и пропуском пара в конденсатор допускается. Из этого условия определен расход пара на турбину

$$G_0 = G_{0ном} - \Sigma G_{ПВД},$$

где  $G_{0ном}$  – номинальный расход пара на турбину,  $\Sigma G_{ПВД}$  – сумма расходов пара в регенеративные отборы низкого давления.

Необходимый расход уходящих газов ГТУ определялся из условия баланса ГВТ на теплофикационном и конденсационном режиме работы ПГУ. КПД ТЭЦ с ПГУ-ВР вычислялся по следующим формулам:

- на конденсационном режиме:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{ГТУ} + N_{ПГУ}}{Q_{ГТУ} + Q_{КА}} \cdot \eta_{ка} \cdot \eta_{эм} \cdot \eta_{тр};$$

- на теплофикационном режиме:

$$\eta_{ПГУ} = \frac{N_{ГТУ} + N_{ПГУ} + Q_{от}}{Q_{ГТУ} + Q_{КА}} \cdot \eta_{ка} \cdot \eta_{эм} \cdot \eta_{тр},$$

где  $Q_{ГТУ} = N_{ГТУ} / \eta_{ГТУ}$  – теплота, подведенная к камере сгорания ГТУ.

Для турбоустановки Т-110/120-130 применена газовая турбина V-64.3 фирмы Сименс мощностью 70 МВт и КПД 36,5%. Мощность ПГУ на конденсационном режиме составляет 203 МВт, на теплофикационном – 174 МВт.

ТЭЦ с ПГУ-ВР имеет КПД на конденсационном режиме 40,66%, что на 3,09% (абсолютных) превосходящий КПД исходного блока. На теплофикационном режиме КПД равен 89,79% что выше исходного на 0,83%.

**В пятой главе** проводится анализ результатов испытаний турбоустановки ПТ-25-90 ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго» и сравнение их с расчетными. Турбоустановка ПТ-25-90 работает с ухудшенным вакуумом в конденсаторе, при этом потери в холодном источнике отсутствуют. Испытания проводились с це-

лью сравнения расчетных характеристик этой турбоустановки при работе ее с отключенными ПВД с экспериментальными. Основные показатели турбоустановки, полученные при ее работе с полностью отключенными ПВД – начальный расход пара и электрическая мощность – приведены в табл. 2. Расчетные показатели получены с помощью формул (6) и (7).

Таблица 2

Сопоставление расчетных и экспериментальных характеристик турбоустановки ПТ-25-90

Показатель	Ед. измерения	Расчетные результаты	Экспериментальные результаты
Начальный расход пара	кг/с	50,97	50,0
Мощность турбины	МВт	32,20	32,16
Изменение мощности турбины	МВт	-1,397	-1,44

Примечание: в графе «Изменение мощности турбины» знак «-» показывает уменьшение мощности по сравнению с номинальной, а знак «+» - ее увеличение.

Эксперимент показал, что мощность турбины уменьшается при полном отключении ПВД. Величина снижения мощности, полученная в ходе испытаний практически совпадает с расчетной, что говорит о достаточной точности расчета.

В результате испытаний температура уходящих газов котла снизилась до величины  $t_{yx}=386$  К ( $113^{\circ}\text{C}$ ). В таблице 3 приведены данные расчета показателей турбоустановки ПТ-25-90 при снижении температуры уходящих газов котла до 353 К ( $80^{\circ}\text{C}$ ).

Таблица 3

Расчетные характеристики турбоустановки ПТ-25-90 при температуре уходящих газов котла  $80^{\circ}\text{C}$

Показатель	Ед. измерения	Отключено 2 ПВД	Отключен 1 ПВД
Начальный расход пара	кг/с	52,72	55,47
Мощность турбины	МВт	32,20	33,87
Изменение мощности турбины по сравнению с номинальной	МВт	+0,806	+1,005

Примечание: см. примечание к табл. 2.

Сравнивая результаты, приведенных в таблицах 2 и 3, можно сказать, что снижение температуры уходящих газов котла приводит к увеличению эффекта от отключения ПВД. Оптимальным режимом работы системы РППВ турбоустановки ПТ-25-90 при ее работе без потерь тепла в конденсаторе является режим с одним отключенным ПВД.

В ходе испытаний выявлен ряд ограничений, влияющих на возможность работы турбины с отключенными ПВД. К ним относятся: рост осевого усилия ротора турбины, увеличение температуры масла на сливе из опорно-упорного подшипника, рост давления в камере за регулирующей ступенью и приближение его к предельно допустимому. Эти ограничения должны быть учтены при переводе установок на работу с отключенными ПВД.

## **Выводы**

1. Роль системы регенерации на ряде режимов турбоустановок ТЭС исследована недостаточно. Таким режимом для конденсационных установок является режим работы с частичной нагрузкой. Для теплофикационных турбоустановок влияние системы регенерации на их эффективность остается неизученным при минимальном пропуске пара в конденсатор, т.е. при отсутствии потерь в холодном источнике.

2. Проведено исследование работы системы регенерации конденсационной турбоустановки при ее работе на частичном режиме. Снижение коэффициента регенерации, приводящее к уменьшению внутреннего абсолютного КПД  $\eta_i$  турбоустановки, на этом режиме вызвано снижением давления в отборах турбины при снижении начального расхода пара и падением температуры питательной воды  $t_{нг}$ .

Для повышения эффективности работы конденсационной турбоустановки предлагается организовать дополнительный нерегулируемый отбор пара повышенного давления. Предлагаются два варианта использования этого отбора: переключение на него последнего по ходу воды ПВД и подключение дополнительного ПВД, производимое при снижении давления в этом отборе до уровня номинального давления в основном отборе.

К росту КПД конденсационного энергоблока приводят следующие факторы:

- рост  $t_{нг}$  практически до номинального значения, из-за чего происходит рост коэффициента регенерации и соответственно, увеличение  $\eta_i$  ПТУ.

- рост КПД котла при его работе на частичной нагрузке из-за повышения  $t_{нв}$ .

3. Исследовано влияние работы системы регенерации на эффективность теплофикационных турбоустановок. На режимах с минимальным пропуском пара в конденсатор абсолютный внутренний КПД турбоустановки близок к 1 и не зависит от работы системы регенерации. Предлагается использовать пар регенеративных отборов для получения дополнительной электрической и тепловой мощности.

4. При отключении части регенеративных отборов происходит понижение температуры питательной воды. Проведена оценка работы котла при снижении  $t_{нв}$  и постоянном расходе топлива. Показано, что при этом производительность котла уменьшится, а КПД котла возрастет за счет снижения температуры уходящих газов  $t_{ух}$ . Рост КПД котла способствует увеличению КПД энергоблока ТЭЦ при отключении ПВД на режимах с минимальным расходом пара в конденсатор.

5. Эффект (изменение мощности ПТУ) от отключения одного, двух или трех ПВД определяется соотношением мощности, вырабатываемой вытесняемым паром отбора, и мощности, теряемой при уменьшении расхода пара от котла. Рост электрической мощности обеспечивается при отключении последнего по ходу воды ПВД и составляет для турбоустановки Т-110/120-130 1,8 МВт. Рост тепловой производительности турбины при этом составляет 7,1 МВт.

6. Определено значение тепловой мощности и расхода пара в конденсатор, при которой величина КПД блока ТЭЦ с отключенными ПВД сравнивается с КПД блока ТЭЦ при полностью включенной регенерации. Для турбоустановки Т-110/120-130 отключение верхнего ПВД будет выгодным только при расходе пара в конденсатор меньше 8,47 кг/с и величине тепловой мощности больше 194,9 МВт.

7. В работе проведен расчет показателей парогазовой установки с вытеснением регенерации на основе турбоустановки Т-110/120-130. Определение параметров установки проводилось с учетом ограниченной пропускной способности последних ступеней ЦНД паровой турбины. ПГУ-ВР имеет КПД на конденсационном режиме, на 3,09% (абс.) превосходящий КПД исходного блока. На теплофикационном режиме увеличение КПД составляет 0,83%.

8. Испытания турбоустановки ПТ-25-90 при работе ее с отключенными ПВД, проведенные на ТЭЦ-7 ОАО «Ленэнерго», показали следующее:

- при работе турбины ПТ-25-90 на режиме с ухудшенным вакуумом с полным отключением группы ПВД, происходит снижение мощности на 1,44 МВт. Расчет показывает, что увеличение мощности турбины происходит при отключении одного (верхнего) ПВД, и снижении температуры уходящих газов котла и равно 1,01 МВт.

- имеется ряд ограничений, влияющих на возможность работы турбины с отключенными ПВД. К ним относятся: рост осевого усилия, увеличение температуры масла на сливе из опорно-упорного подшипника, рост давления в камере за регулирующей ступенью и приближение его к предельно допустимому. Эти ограничения должны быть учтены при принятии решений о переводе установок на работу с отключенными ПВД.

### **Список публикаций:**

1. Боровков В.М. Кошелев С.М. Исследование работы системы РППВ конденсационной турбоустановки при ее работе на частичных режимах // Проблемы экономии ТЭР на промпредприятиях и ТЭС: Межвузовский сборник научных трудов. СПб.: ГОУ ВПО СПбГТУРП, – 2005. – с. 157-165.
2. Боровков В.М. Кошелев С.М. Оптимизация работы системы регенерации теплофикационных турбоустановок на режимах с минимальными пропусками пара в конденсатор // Известия вузов: Проблемы энергетики – 2005. – №7-8 – с.3-7.
3. Отечественные кожухотрубные подогреватели нового поколения для технического перевооружения систем теплоснабжения / В.А. Пермяков, В.М. Боровков, С.М. Кошелев и др. // Промышленная энергетика – 2004. – №11 – с.22-30.
4. Пермяков К.В., Пермяков В.А., Кошелев С.М. Эффективное и надежное теплообменное оборудование НПО ЦКТИ для систем ЖКХ // Проблемы развития централизованного теплоснабжения: Материалы международной научно-практической конференции – 21-22 апреля 2004 г. – Самара: Самараэнерго, 2004. – с. 269-275.

Лицензия ЛР № 020593 от 7.08.97

---

Подписано в печать  
Тираж 100 экз.

Объем в п.л. \_\_\_\_  
Заказ №

---

Отпечатано с готового оригинал-макета,  
предоставленного автором,  
в типографии Издательства СПбГПУ  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

Отпечатано на ризографе RN-2000 FP  
Поставщик оборудования — фирма “Р-ПРИНТ”  
Телефон: (812) 110-65-09  
Факс: (812) 315-23-04