

**РОМАШОВА ОЛЬГА ЮРЬЕВНА**

**РАСПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЗОК НА ТЭЦ  
С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ  
С УЧЕТОМ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

Автореферат диссертации  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена в Томском политехническом университете на кафедре атомных и тепловых электрических станций

Научный руководитель: кандидат технических наук,  
доцент

Беляев Л.А.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

Андрюшин А. В.

доктор физико-математических наук, профессор

Логинов В. С.

Ведущая организация: ОАО «КУЗБАССЭНЕРГО» (г. Кемерово)

Защита состоится 30 мая 2007 года в 12 часов на заседании диссертационного совета К 212.269.04 при Томском политехническом университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, корпус 4, ауд. 406.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета

Автореферат разослан «29» апреля 2007 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

А.С. Заворин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одно из главных направлений повышения эффективности топливоиспользования на ТЭЦ – внутростанционная оптимизация режимов, которая дает значительную экономию топлива без дополнительных капитальных вложений.

На современном этапе развития энергетики вопрос распределения нагрузок особенно актуален по причине возросшей конкуренции на рынке производства электрической и тепловой энергии, а также в связи с тем, что существенно изменились объемы отпуска теплоты от теплоэлектроцентралей по сравнению с теми, которые были заложены при проектировании станций.

Задача распределения нагрузок на промышленно-отопительных ТЭЦ, имеющих в своем составе разнотипное турбинное оборудование и отпускающих тепло в виде пара разного потенциала и с горячей водой на несколько тепломагистралей, относится к многомерным, поэтому очень сложна и окончательно не решена.

Кроме того, для ТЭЦ с поперечными магистралями проблема усугубляется еще и тем, что на характеристики турбин существенное влияние оказывают связи турбоустановок с общестанционными коллекторами пара и воды и гидравлические характеристики последних.

С учетом этого работа является весьма актуальной и своевременной.

Работа выполнялась в соответствии с основными направлениями научной деятельности Томского политехнического университета «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов», в русле критических технологий Российской Федерации «Технологии производства топлива и энергии из органического сырья».

### **Цель работы**

Целью работы является решение задачи распределения нагрузок и выбора состава работающего оборудования на ТЭЦ с поперечными связями.

### **Решаемые вопросы для достижения поставленной цели**

- 1) Моделирование гидравлического тракта питательной воды и расчет потокораспределения.
- 2) Определение влияния потокораспределения питательной воды на энергетические характеристики групп турбоустановок.
- 3) Разработка математической модели многомерного распределения нагрузок между теплофикационными турбинами.
- 4) Исследование эффективности отпуска тепла с сетевой и подпиточной водой.

### **Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем

1. Доказано влияние потокораспределения питательной воды на энергетические характеристики групп турбинного оборудования и распределение нагрузок.
2. Разработан алгоритм многомерного распределения нагрузок на ТЭЦ на основе метода динамического программирования с целью выбора оптимального состава работающих турбоустановок. Впервые используется аппарат двумерного динами-

ческого распределения тепловых нагрузок в прямой постановке с видоизмененным критерием Беллмана.

3. Впервые предложена схема решения задачи потокораспределения для выбора состава работающих насосов.

4. Впервые аналитически получена формула для расчета оптимального распределения подогрева сетевой воды в двухступенчатой сетевой установке турбин типа ПТР- при использовании пара нижнего отбора на общестанционные нужды.

5. Обоснован способ распределения тепловой нагрузки между параллельно работающими теплофикационными турбинами с двухступенчатым подогревом сетевой воды. Дано теоретическое обоснование полученного эффекта и выявлены границы эффективности применения данного способа.

### **Практическая значимость**

1. Разработанные модели потокораспределения питательной воды могут быть использованы при решении задач расчета нормативных удельных расходов топлива (НУРТ) для ТЭЦ с поперечными связями.

2. Разработанные программные комплексы используются на Ново-Кемеровской ТЭЦ для выбора оптимального состава работающего оборудования и распределения нагрузок.

3. Результаты исследований используются в учебном процессе в Томском политехническом университете в дисциплинах «Режимы работы и эксплуатации ТЭС» и «Методы оптимизации и расчеты на ЭВМ технико-экономических задач» для студентов специальности «Тепловые электрические станции».

4. Результаты исследований режимов турбоустановки ПТР-80-130/13 могут быть использованы для выбора оптимальной загрузки отопительных отборов в соответствии с изменением параметров теплосети.

### **Достоверность результатов** обеспечивается :

- применением апробированных математических моделей и надежных методов вычислений;

- сравнением результатов, полученных различными методами расчета;

- хорошей сходимостью результатов вычислений с экспериментальными данными, полученными другими исследователями.

### **На защиту выносятся**

1). Научно-методические основы решения многомерной задачи распределения нагрузок на ТЭЦ.

2). Результаты численных экспериментов по влиянию потокораспределения питательной воды на энергетические характеристики групп турбинного оборудования.

3). Аналитическое определение оптимального расчетного давления в нижнем отопительном отборе при проектировании турбоустановок на совместный подогрев сетевой и подпиточной воды.

4). Способ повышения эффективности ступенчатого подогрева сетевой воды.

**Апробация работы** . Основные положения диссертационной работы лично представлялись и докладывались автором на IX, X, XI и XII Всероссийских науч-

но-технических конференциях «Энергетика: экология, надежность, безопасность» (Томск 2003, 2004, 2005, 2006 г.г.); II и IV семинарах вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике (Томск, 2002; Владивосток, 2005); международной научно-технической конференции «Электроэнергия и будущее цивилизации», (Томск: 2004).

**Публикации.** Основные положения и результаты исследований, представленных в диссертации, опубликованы в 17-ти работах, среди которых 2 статьи в рецензируемых изданиях, а также материалы докладов на конференциях разного уровня.

**Объем и структура диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (110 наименований) и приложений. Работа содержит 129 страниц с приложениями, 17 таблиц и 30 рисунков.

**Личное участие автора.** Автором выполнены полностью самостоятельно работы по разработке математических моделей решения задач оптимального распределения нагрузки между турбоагрегатами ТЭЦ сложной технологической структуры и потокораспределения питательной воды в тракте подогревателей высокого давления, их алгоритмизации и созданию пакетов прикладных программ, разработаны методики проведения вычислений и обработки их результатов, проведены все вычислительные эксперименты и анализ полученных данных. Постановка задач исследований, обсуждение методики вычислительных экспериментов и осмысление полученных результатов выполнены с участием научного руководителя к.т.н. Беляева Л.А.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

*Во введении* обоснована актуальность темы исследования, сформулированы основные цели и задачи и намечены пути их решения.

*В первой главе* дается анализ современного состояния рассматриваемого вопроса.

Установлено, что промышленно-отопительные ТЭЦ с поперечными связями характеризуются сложной тепловой схемой и разнообразием основного и вспомогательного оборудования. Оптимизация режимов работы таких ТЭЦ возможна с использованием математических моделей, адекватно отражающих работу элементов тепловой схемы, а также учитывающих тепловые и гидравлические процессы, характерные для станции с поперечными связями.

Наибольшую трудность при математическом описании станции представляют энергетические характеристики теплофикационных турбин, экономичность которых на переменных режимах зависит от большого числа факторов.

Доказано, что задача распределения нагрузок на промышленно-отопительных ТЭЦ с поперечными магистралями имеет размерность больше трех, поэтому в общей постановке окончательно не решена.

Проанализированы способы распределения нагрузок между теплофикационными турбоагрегатами. Обзором установлено, что универсальным методом оптимизации, пригодным для любого вида ЭХ турбин и позволяющим учитывать лю-

бые ограничения, накладываемые на оптимизируемые переменные, является метод динамического программирования. Он успешно применяется для одномерного распределения электрических нагрузок, однако использование его для ТЭЦ наталкивается на значительные трудности вычислительного плана.

Проанализированы эффективность ступенчатого подогрева сетевой воды и режимы загрузки противодавленческих турбин на действующих ТЭЦ в течение года.

На основе проведенного анализа поставлены задачи исследования.

**Во второй главе** показано влияние потокораспределения питательной воды на энергетические характеристики теплофикационных турбоустановок и распределение нагрузок между ними.

На станциях с поперечными связями расход питательной воды  $G_{не}$  через группы подогревателей высокого давления (ПВД) отдельных установок функционально не связан с расходом острого пара  $D_0$  на них.

В таблице 1 приведены результаты испытаний для одной из ТЭЦ с начальным давлением  $P_0=12,8$  МПа, подтверждающие сказанное.

Таблица 1

Сводная таблица значений расхода острого пара и питательной воды по отдельным турбоустановкам одной из ТЭЦ ОАО «Кузбассэнерго»  $P_0=12,8$  МПа

Ст. №	Тип турбо-агрегата	Режим работы							
		1		2		3		4	
		$D_0$ , т/час	$G_{не}$ , т/час						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
7	ПТР-80-130/13	385	340	314	234	325	277	-	-
9	Р-50-130/7	-	-	-	-	-	-	-	-
10	Р-50-130/13	-	-	204	290	156	393	187	203
11	ПТ-50-130/7	200	-	242	362	223	350	183	305
12	ПТ-50-130/7	220	320	230	327	-	-	230	170
13	Р-50-130/18	290	390	290	367	-	-	-	-
14	ПТ-150-130/18	-	-	638	603	605	612	296	153

Не смотря на разнообразие способов представления ЭХ, все они получены при равенстве расхода питательной воды расходу острого пара, а несоответствие значений  $G_{не}$  и  $D_0$  учитывается введением соответствующих поправок.

Однако область использования таких поправок слишком мала ( $\pm 10\%$ ) и не соответствует фактическому отклонению параметров в реальных режимах.

При значительном отклонении  $G_{не}$  от  $D_0$  ЭХ отдельных турбин, полученные при равенстве  $G_{не} = G_0$ , теряют физический смысл. Для ТЭЦ с поперечными связями они должны быть «разомкнутыми» по рабочему телу:

$$Q_{myi} = f(N_{Эi}, D_{Pi}, D_{Ti}, P_{Pi}, P_{Ti}, G_{nei}, \dots) \quad (1)$$

$$h_{nei} = f(N_{Эi}, D_{Pi}, D_{Ti}, G_{nei}, P_{Pi}, P_{Ti}, G_{ovi}, \dots), \quad (2)$$

и служить основой энергетической характеристики станции или отдельных групп оборудования

$$\sum Q_{TVi} = \sum D_{TVi} \cdot h_{0i} - \sum G_{nei} \cdot h_{nei} \quad (3)$$

Для построения энергетической характеристики группы турбин необходимо совместное моделирование параллельно работающих агрегатов с выбором в качестве основного показателя удельного расхода тепла на группу оборудования

$$q = \frac{\sum Q_{myi}}{\sum N_{Эi}} \quad (4)$$

Физический смысл влияния  $G_{ne}$  на показатели работы отдельных турбин отражен в поправках к ЭХ. Добавим, что это влияние неоднозначно. При увеличении  $G_{ne}$  растет регенеративная выработка отборов на ПВД из-за увеличения расхода греющего пара, однако энергетический эффект сдерживается ростом недогревов в подогревателях. Так как давление пара в регенеративных отборах определяется основным потоком, работающим в турбине, его изменение незначительно. Учитывая практически прямо пропорциональную зависимость температуры насыщения от давления и экспоненциальный характер зависимости недогрева от расхода воды, изменение температуры воды за ПВД отдельных турбин от расхода носит экстремальный характер. Расчеты подтверждают его наличие при снижении  $G_{ne}$  до (30-50) % от  $D_0$ . Кроме того, в большинстве режимов на влияние потокораспределения накладывается влияние КПД проточной части вследствие изменения объемных пропусков пара.

Влияние потокораспределения питательной воды на распределение нагрузок анализировалось на примере совместной работы двух однотипных турбин - Т-110-130 и ПТР-80-130/13 в характерных режимах работы. Критерием оптимального распределения нагрузок во всех режимах принимался удельный расход тепла на группу  $q$ . Потокораспределение питательной воды задавалось относительным расходом воды на первую турбоустановку  $g_{ne1} = G_{ne1} / G_{ne\Sigma}$  при изменении  $G_{ne1}$  от нуля до суммарного  $G_{ne\Sigma} = G_{ne1} + G_{ne2}$  при соблюдении условия равенства суммарных расходов питательной воды и острого пара на турбины  $G_{ne\Sigma} = D_{0\Sigma}$ .

Оптимальному распределению нагрузок при заданном потокораспределении питательной воды  $g_{ne1}$  соответствует минимальное значение удельного расхода тепла на группу  $q^{onm}$ . Изменение тепловой экономичности определялось относительно режима  $G_{ne} = G_0$  с показателем  $q_0^{onm}$

$$\delta q^{onm} = \frac{(q^{onm} - q_0^{onm})}{q_0^{onm}} \cdot 100 \quad (5)$$

На рис. 1 приведены выборочные результаты оптимального распределения электрической мощности при работе турбоустановок Т-110 в конденсационном режиме, которые позволяют установить, что до суммарных нагрузок, составляющих примерно (60-70) % от суммы номинальных мощностей, неравномерная загрузка по питательной воде разных турбин оказывается более выгодной по сравнению с равномерной. При суммарной мощности выше 70 % оптимальное распре-

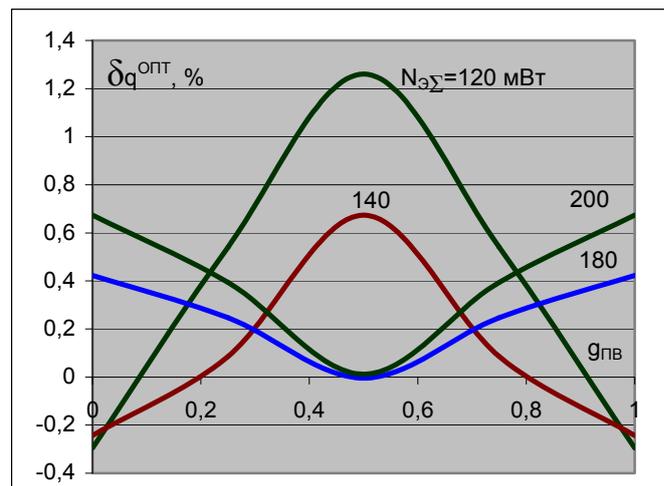
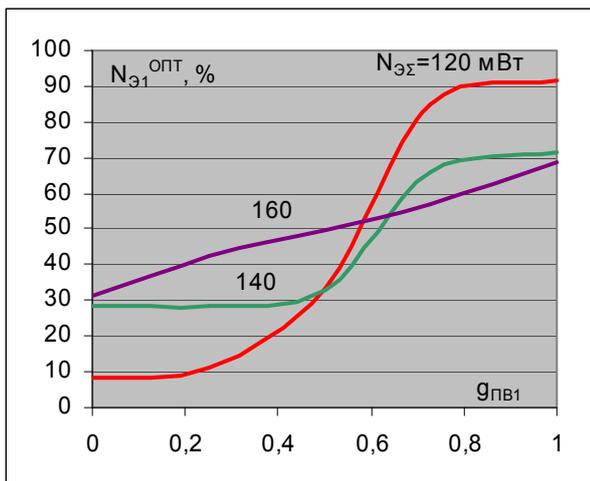


Рис. 1. Зависимость оптимальной загрузки первой турбины от потокораспределения питательной воды при совместной работе двух установок Т-110-130 в конденсационном режиме

Рис. 2. Перерасход тепла в оптимальных конденсационных режимах работы двух турбин Т-110-130 в связи с изменением потокораспределения

деление между турбинами – равномерное и не зависит от потокораспределения.

Расчет и анализ совместной работы турбоустановок в разных режимах позволяет обобщить полученные результаты - преимущественно загружать по электрической и тепловой мощности следует ту турбину, которая в соответствии с гидравлическим сопротивлением питательного тракта имеет большее значение  $G_{нв}$ . Объясняется это тем, что в большинстве случаев рост регенеративной выработки отборов на ПВД приводит к снижению относительных приростов тепла на установку.

Кроме того, по результатам исследований можно сделать вывод, что экономичность совместной работы турбин меняется при изменении  $g_{нв1}$  (рис. 2). В целом отметим, что оптимальная нагрузка агрегатов при несоответствии расходов  $G_{нв}$  и  $D_0$  при незначительной экономии в отдельных режимах, в большинстве случаев приводит к увеличению расхода тепла в среднем на (0,5-1,5) % с ростом до (2,5-3) % в отдельных режимах по сравнению с оптимальными режимами при  $G_{нв} = G_0$ . Неучет потокораспределения снижает эффективность оптимизации в среднем на (0,3-1,0) %. При сочетании неблагоприятных факторов рост тепла в свежем паре может достигать (3-5) %.

**В третьей главе** дано математическое описание гидравлической модели питательного тракта ТЭЦ с поперечными связями, отмечены методические особенности потокораспределения питательной воды и представлен алгоритм расчета гидравлического контура параллельно работающих питательных насосов.

Математическая модель расчета гидравлической схемы ПТ может быть включена в расчет ЭХ турбин и котлов при их компьютерном моделировании либо использоваться при расчете поправок к ЭХ.

Принципиальная схема питательного тракта ТЭС с поперечными связями в общем виде приведена на рис. 3. Математическая модель распределения питательной воды по группам ПВД отдельных турбин строится на базе теории гидрав-

лических цепей (ГЦ). Топология схемы задается количеством ветвей  $n$ , узлов  $m$ , контуров  $c$  и матрицами:  $A$  - размера  $(n \times n)$  соединений ветвей в узлах; и  $B$  -  $(c \times n)$  – контуров. Движение рабочего тела в гидравлической цепи в установившемся режиме происходит в соответствии с двумя законами Кирхгофа. Параметрами, характеризующими режим, являются давления в узлах  $p_i$  и расходы (потoki)  $g_i$  на участках системы. Математической моделью питательного тракта ТЭЦ являются системы смешанных (линейных и нелинейных) уравнений, которые в матричной форме имеют следующий вид

$$A \cdot G = Q; \quad (6)$$

$$B \cdot Y = 0; \quad (7)$$

$$Y + H = S \cdot G_m \cdot G \quad (8)$$

относительно неизвестных векторов  $G = (g_1, g_2, \dots, g_n)$  и  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_n)$ , где  $G$  – вектор размера  $n$  расходов на участках цепи;  $Q$  – вектор размера  $(m-1)$  притоков (уравнительный коллектор деаэраторов) и оттоков (котлоагрегаты) среды в узлах;  $Y$  - вектор размера  $n$  потерь давления на ветвях;  $H$  - вектор размера  $n$  напоров питательных насосов;  $S$  - диагональная матрица  $(n \times n)$  сопротивлений ветвей;  $G_m$  - диагональная матрица  $(n \times n)$  модулей расходов рабочего тела. Для решения системы уравнений (6)-(8) используются методы контурных расходов и их «увязочные» варианты. Исходными данными для расчета являются давление в одном из узлов  $P_m$ , компоненты векторов  $Q$  и  $H$ , матрица сопротивлений  $S$ .

Отличие гидравлической модели ПТ от аналогичных, применяемых для расчета теплоснабжающих систем, в наличии большого числа (до (7-15)) параллельно работающих мощных питательных насосов, в связи с чем гидравлическое описание питательного тракта дополняется напорными характеристиками каждого агрегата

$$H = H(G) \quad (9)$$

$$N = N(G).$$

Моделирование ГЦ с учетом уравнения (9) выполняется на основе последовательного расчета контуров ПВД и ПЭН итерационным путем, в процессе которого выходные параметры одного контура являются входными для расчета другого.

Этапы моделирования представлены на рисунках 4-6.

1). Суммарное сопротивление напорного коллектора принимается равным нулю, определяется состав параллельно работающих насосов и их напор  $H_{нар}$ .

2). Составляется матричная модель «упрощенного» контура ПВД (напорный коллектор сосредоточен в одном узле) и для него решается задача потокораспределения. Вектор притоков (оттоков) среды  $Q$  в узлах этой схемы формируется с учетом заданных значений расхода воды на котлоагрегаты  $D_{КАj}$  (оттоки) и суммарного расхода  $\sum G_{ПВД}$  через группы ПВД  $\sum G_{ПВД} = G_{ПВ} - \sum g_j^{CH}$ , где

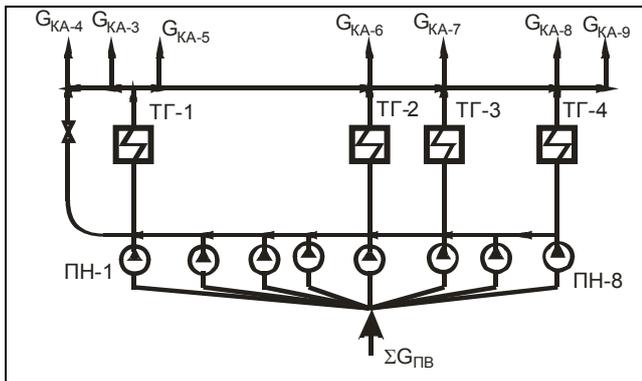


Рис.3. Принципиальная схема питательного тракта ТЭЦ с поперечными связями

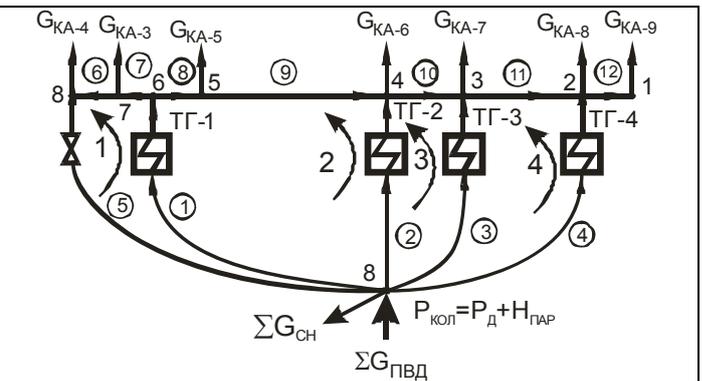


Рис.4. Расчетная гидравлическая схема упрощенного контура ПВД

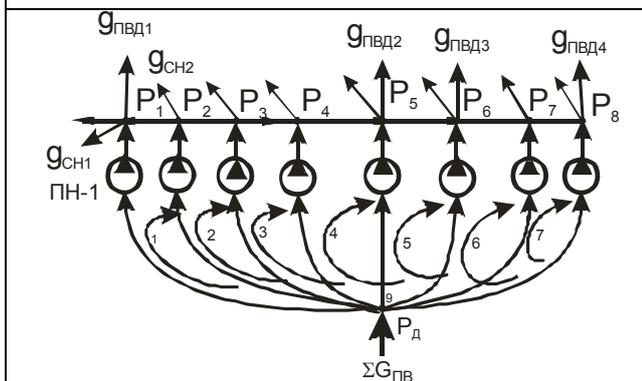


Рис.5. Расчетная гидравлическая схема контура ПЭН

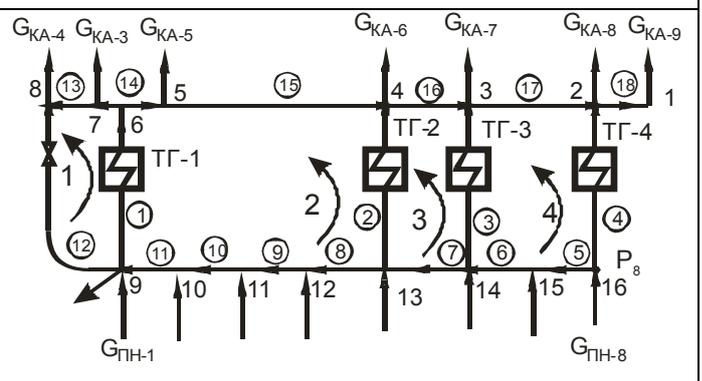


Рис.6. Расчетная гидравлическая схема контура ПВД

$\sum g_j^{CH}$  - суммарный расход питательной воды на собственные нужды, обеспечивающий непрерывную продувку котлов и впрыск в РОУ. Таким образом определяются расходы питательной воды по всем ветвям контура, включая ветви с ПВД  $g_j^{ПВД}$ .

3). Составляется модель группы параллельно работающих насосов. Она описывает суммарную характеристику и решает задачу приведения характеристик отдельных агрегатов группы к некоторому (произвольно выбранному) узлу напорного коллектора. Оттоки воды из коллектора определяются с учетом найденных выше значений  $g_j^{ПВД}$  и известных  $g_j^{CH}$ . На этом этапе определяются значения давления во всех узлах коллектора, а также подачи и напоры всех работающих насосов.

4). Выполняется расчет потокораспределения для контура ПВД, включающего напорный коллектор. За  $P_m$  принимается давление в одном из узлов коллектора. В результате расчета уточняются значения  $g_{ПВДi}$ .

Расчетный цикл повторяется, начиная с п.3 с уточненными значениями расхода питательной воды через ПВД.

Моделирование приведенной напорной характеристики заключается в итерационном расчете последовательности простых контуров, на которые разбивается исходная схема, для каждого из которых помимо выполнения двух законов

Кирхгофа однозначно решается задача соответствия подач и напоров насосов. Простой контур включает две ветки с насосами и участок коллектора между ними. Два соседних простых контура имеют общую ветку с насосом, что позволяет принимать выходные параметры одного контура за входные – соседнего. Гидравлический расчет простого контура выполняется на основе совместного решения уравнений системы (6)-(9) и предназначается для расчета его гидравлики при любом значении подачи одного из насосов  $g_1$ . Моделирование внешнего контура увязывает общий заданный расход на насосную группу с суммой подач всех включенных в работу насосов.

На базе приведенной методики реализованы в виде компьютерной программы матричные модели питательного тракта действующих ТЭЦ с начальным давлением  $P_0=8,8$  МПа и  $P_0=12,8$  МПа, имеющих в своем составе 5-8 групп ПВД и до десяти параллельно работающих питательных насосов. Погрешность расчета расходов составляет не более (3-5) %.

**В четвертой главе** выполнена постановка задачи распределения нагрузок на ТЭЦ с поперечными связями, обосновано использование метода динамического программирования, разработан алгоритм последовательного распределения тепловых и электрических нагрузок на базе декомпозиции исходной схемы ТЭЦ с целью снижения размерности оптимизационной задачи.

В общем случае на промышленно-отопительных ТЭЦ распределению подлежат электрическая мощность станции  $N_{\Sigma}$ , а также производственные и отопительные нагрузки разных параметров. Размерность оптимизационной задачи равна  $(Z+Y+1)$ , где  $Z$ - число групп турбин с одинаковым давлением пара в производственном отборе,  $Y$ - количество присоединенных к ТЭЦ тепломагистралей, объединенных параметрами температурного графика и пропускной способностью гидравлической системы.

Распределение нагрузок сводится к минимизации функции

$$F = \sum_{z=1}^Z \sum_{y=1}^Y \sum_{s=1}^S Q_s(N_s, D_{\Pi s}^z, D_{T s}^y) + \sum_{z=1}^Z \sum_{j=1}^J Q_j(N_j, D_{\Pi j}^z) + \sum_{y=1}^Y \sum_{k=1}^K Q_k(N_k, D_{T k}^y) + \sum_{z=1}^Z \sum_{r=1}^R Q_r(D_{\Pi r}^z) + \sum_{z=1}^Z \sum_{y=1}^Y \sum_{g=1}^G Q_g(D_{\Pi g}^z, D_{T g}^y) + \sum_{l=1}^L Q_l(N_l) \quad (10)$$

при следующих ограничениях

$$\sum_{i=1}^{I+J+K+R+G} N_i = N_{\Sigma}, \quad N_i^{\min} \leq N_i \leq N_i^{\max}; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^m D_{\Pi i}^Z + D_{POY}^{Z+1} = D_{np \Sigma}^Z + \sum D_{\Pi b j} + D_{POY}^{Z-1} + D_{c.h.}^Z; \quad (12)$$

$$D_{\Pi i}^{\min Z} \leq D_{\Pi i}^Z \leq D_{\Pi i}^{\max Z}, \quad z = 1 \div Z; \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^{S+K+G} D_{T i} + D_{POY} = \sum_{y=1}^Y D_{T \Sigma}^y + D_{c.h.}^{1,2}; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^H D_{Ti}^y = D_{T\Sigma}^y, \quad 0 \leq D_{Ti}^y \leq D_{Ti}^{\max y}, \quad y = 1 \div Y. \quad (15)$$

$$D_{Ti}^{\min} \leq D_{Ti} \leq D_{Ti}^{\max} \quad (16)$$

$$D_{OБj} + D_{ПБj} = D^{БYj}; \quad (17)$$

$$D_{T\Sigma}^Y = \sum_{j=1}^l D^{БYj}; \quad (18)$$

$$D_{T\Sigma} = \sum D_{T\Sigma}^Y + D_{с.н.}^{1,2}, \dots, \quad (19)$$

где  $n$  – общее число турбоагрегатов станции,  $N$  – электрическая мощность отдельных турбин;  $D_{П}$  – тепловая нагрузка производственного отбора;  $D_T$  – тепловая нагрузка отопительного отбора;  $S$  – число конденсационных турбин с двумя регулируемыми (производственным и отопительным) отборами;  $J$  – число турбин с одним производственным отбором;  $K$  – число турбин с одним отопительным отбором;  $R, G$  – число противодавленческих турбин типа Р- и ПТР- соответственно;  $L$  – число конденсационных турбин,  $m$  – количество турбин, имеющих производственный отбор с заданным давлением  $P_Z$ ;  $H$  – количество турбин, отпускающих тепло из отопительных отборов на бойлерные установки тепломагистрالی с параметрами  $Y$ ,  $l$  – число бойлерных установок, отнесенных к тепломагистрالی  $Y$ ;  $D_{П}^Z$  – тепловые нагрузки турбоагрегатов с регулируемым отбором  $P_{П}^Z$ ;  $D_{np\Sigma}^Z$  – суммарная производственная нагрузка в паре потенциала  $P_Z$ ;  $D_{OБ}$ ,  $D_{ПБ}$  – значения расхода пара на основные и пиковые бойлера;  $D^{БY}$  – суммарный расход пара на бойлерную;  $D_{T\Sigma}^Y$  – суммарный отпуск пара из отопительных отборов турбин, питаемых бойлерные установки, отнесенные к тепломагистрالی  $Y$ ;  $D_{POY}^{Z+1}$ ,  $D_{POY}^{Z-1}$  – расходы пара от РОУ с параметрами  $P_{Z+1}/P_Z$ , подключенной к паровой магистрали более высокой ступени давления и с параметрами  $P_Z/P_{Z-1}$  в нижестоящий коллектор соответственно;  $D_{с.н.}^{1,2}$  – расход пара на общестанционные теплообменники низкого потенциала (подогревателей сырой и добавочной воды, атмосферные деаэраторы и т.д.).

Универсальным методом оптимизации, пригодным для любого вида ЭХ турбин, является метод динамического программирования. Однако использование его для многомерных задач наталкивается на значительные трудности вычислительного плана.

Анализ состава и параметров различных ТЭЦ позволил предложить схему решения, в основе которой лежит известный в математическом моделировании прием – декомпозиция сложной структуры, позволяющий разбить исходную задачу на составляющие меньшей сложности и требующие более простых алгоритмов. При этом для поиска глобального оптимума строится итерационная схема последовательного решения частных задач.

Такой подход не противоречит установленным на основе обзора литературы закономерностям последовательно распределения нагрузок на ТЭЦ с поперечными связями, однако имеет ряд отличий.

1). Впервые используется аппарат двумерного динамического программирования в прямой постановке для распределения тепловых нагрузок.

2). Достаточное условие сходимости алгоритма к глобальному оптимуму проверяется в итерационном расчете.

3). За критерий оптимизации при работе по тепловому графику принимается не максимум выработки на тепловом потреблении, а удельный расход тепла на группу оборудования  $q = \frac{\sum Q_i}{\sum N_i} \rightarrow \min$ . Эта величина, во-первых, учитывает, помимо

максимума выработки мощности на тепловом потреблении, экономичность конденсационного потока, во-вторых, является обобщающим критерием при распределении нагрузок по тепловому и электрическому графикам, и, в третьих,

механизмом, включающим в работу итерационный цикл последовательного распределения.

4). В отличие от предыдущих работ предлагается не комбинация различных методов оптимизации, а единый метод – динамического программирования.

Использование аппарата динамического программирования дает возможность автоматически определять оптимальный состав турбинного цеха. В соответствии с разработанным алгоритмом (рис.7) исходная тепловая схема разбивается на пересекающиеся подмножества (группы оборудования).

Использование аппарата динамического программирования дает возможность автоматически определять оптимальный состав турбинного цеха. В соответствии с разработанным алгоритмом (рис.7) исходная тепловая схема разбивается на пересекающиеся подмножества (группы оборудования).

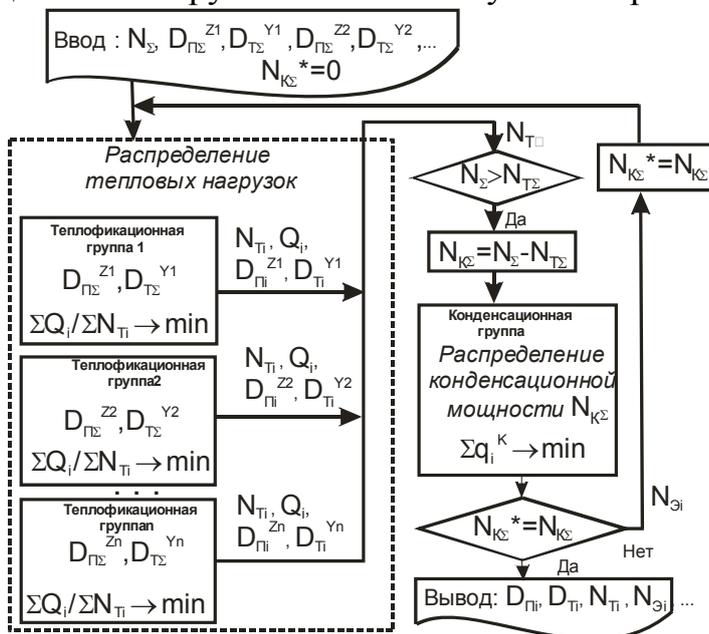


Рис.7. Алгоритм распределения электрических и тепловых нагрузок между турбоагрегатами ТЭЦ в итерационном цикле

Принципиально различают две группы, объединенные между собой конденсационными турбинами с отпуском тепла. Первая группа включает теплофикационные турбины различных типов (Т-, П-, ПТ-, Р-, ПТР-). Вторая группа - конденсационные турбины (К-, Т-, П-, ПТ-). Первая группа разбивается на подгруппы из агрегатов, объединенных отпуском производственного пара одного давления и (или) отопительной нагрузки на независимую тепломагистраль. Распределение тепловых нагрузок осуществляется методом поступенчатого нагружения: последовательно распределяются тепловые нагрузки  $D_{\sum \Pi}^{Z1}, D_{\sum \Pi}^{Z2}, \dots$ , при этом  $P_{\Pi}^{Z1} < P_{\Pi}^{Z2} < \dots$ , избыток пара более низкого потенциала передается в группы более высокого потенциала вплоть до использования для покрытия заданных нагрузок РОУ свежего пара.

Распределение электрической мощности осуществляется в итерационном цикле последовательно в названных группах, в то время как тепловая нагрузка - параллельно в подгруппах «теплофикационной» группы. Распределение тепловой нагрузки дает «привязанную» к ней электрическую мощность станции на тепловом потреблении, значение которой определяет конденсационную мощность, распределение которой осуществляется между турбинами конденсационной группы. Декомпозиция исходной структуры позволяет использовать аппарат динамического программирования для малого числа турбоагрегатов при распределении не более двух видов нагрузки. Распределение электрической нагрузки производится на основе одномерного динамического программирования.

Для распределения тепловых нагрузок применяется метод двумерного динамического программирования, который заключается в пошаговом построении функций согласно рекуррентным соотношениям Беллмана. Используя принцип оптимальности, распределение нагрузок сводят к решению  $n$  двумерных задач.

На первом шаге многостадийного процесса строятся функции

$$f_{Q_1}(D_{II}, D_T) = Q_1(D_{II}, D_{T1}); \quad (20)$$

$$f_{N_1}(D_{II}, D_T) = N_{T1}(D_{II}, D_{T1}) \quad (21)$$

при  $D_{II}^{\min} \leq D_{II} \leq D_{II}^{\max}; D_{T1}^{\min} \leq D_{T1} \leq D_{T1}^{\max}$ .

На каждом последующем шаге в соответствии с рекуррентными соотношениями Беллмана определяются зависимости

$$f_{Q_k}(D_{II}, D_T) = Q_k(D_{IIk}, D_{Tk}) + f_{Q_{k-1}}[(D_{II} - D_{II(k-1)}), (D_T - D_{T(k-1)})]; \quad (22)$$

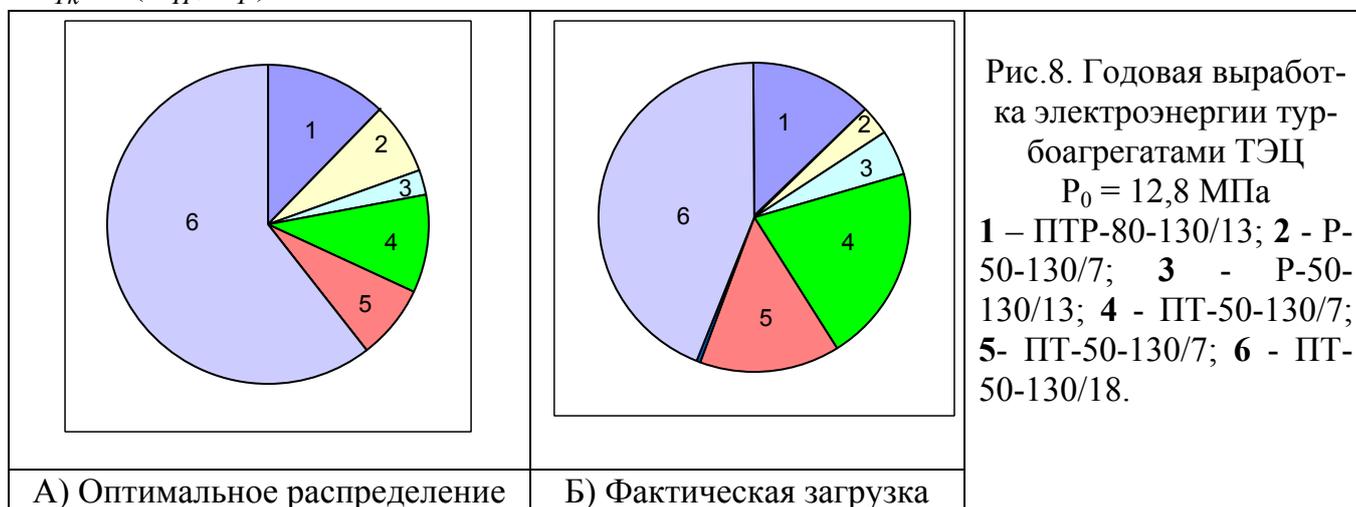
$$f_{N_k}(D_{II}, D_T) = N_{Tk}(D_{IIk}, D_{Tk}) + f_{N_{k-1}}[(D_{II} - D_{IIk}), (D_T - D_{Tk})] \quad (23)$$

$$D_{IIk}^{\min} \leq D_{IIk} \leq D_{IIk}^{\max}; D_{Tk}^{\min} \leq D_{Tk} \leq D_{Tk}^{\max},$$

с использованием которых решаются оптимизационные задачи

$$\gamma_k(D_{II}, D_T) = \min F_k = \min \left[ \frac{Q_k(D_{IIk}, D_{Tk}) + f_{Q_{k-1}}((D_{II} - D_{IIk}), (D_T - D_{Tk}))}{N_{Tk}(D_{IIk}, D_{Tk}) + f_{N_{k-1}}((D_{II} - D_{IIk}), (D_T - D_{Tk}))} \right]$$

при изменении  $D_{IIk}^{\min} \leq D_{IIk} \leq D_{IIk}^{\max}; D_{Tk}^{\min} \leq D_{Tk} \leq D_{Tk}^{\max}$ , в результате чего определяются дискретные функции оптимальных значений  $D_{IIk}^{opt}(D_{II}, D_T)$  и  $D_{Tk}^{opt}(D_{II}, D_T)$ .



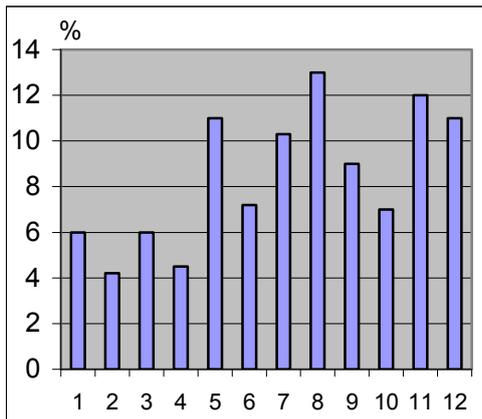


Рис.9. Экономия тепла на ТЭЦ  $P_0 = 12,8$  МПа по месяцам отчетного периода



Рис.10. Оптимальная загрузка отопительных отборов турбин ТЭЦ  $P_0 = 8,8$  МПа в зависимости от температуры наружного воздуха:  
 1 – Т-25-90, 2 – ПТ-25-90, 6 – Т-50-90, 7 – ПТ-25-90, 11,12,14 – Т-100-90.

Как видно из математического описания, особенность критерия оптимизации видоизменило рекуррентную формулу Беллмана по сравнению с ее классическим представлением.

На рисунках 8-10 представлены результаты выбора оптимального состава турбинного цеха двух ТЭЦ сложной технологической структуры с начальным давлением  $P_0 = 12,8$  МПа и  $P_0 = 8,8$  МПа, имеющих в своем составе разнообразное турбинное оборудование.

**В пятой главе** исследуется эффективность отпуска тепла с сетевой и подпиточной водой на ТЭЦ с поперечными связями

**Выбор оптимальных режимов работы турбоустановки типа ПТР-80-130**

К покрытию отопительной нагрузки на промышленно-отопительных ТЭЦ широко привлекаются противодавленческие турбины. Значительный энергетический эффект при их эксплуатации может быть получен лишь при эффективной загрузке отопительных отборов.

В работе исследовались режимы работы турбоустановки ПТР-80-130 (рис. 11), отработавший пар которой используется для общестанционных целей. В таких условиях на распределение нагрузки между нижним и верхним отопительными отборами, помимо параметров теплосети, влияют также расходы пара в общестанционный коллектор и в пусковой конденсатор для нагрева подпиточной воды теплосети  $G_x$ .

Приведены результаты расчета схемы турбоустановки ПТР-80-130 при заданном расходе сетевой воды  $G_{св} = 1200$  т/ч и изменении расхода  $G_x$  от нуля до максимальной пропускной способности конденсатора 1000 т/ч для трех режимов работы теплосети: 90/40; 100/50; 120/70. Давление в производственном отборе принято номинальным, расход - 100 т/час. Температура химически очищенной воды на входе в пусковой конденсатор – 30°C. На рис.12 представлен график снижения доли подогрева сетевой воды в нижнем подогревателе  $\beta$  при росте  $G_x$  для разных параметров теплосети. Рост экономичности с увеличением расхода подпиточной воды в большинстве режимов двухступенчатого подогрева подтверждает-



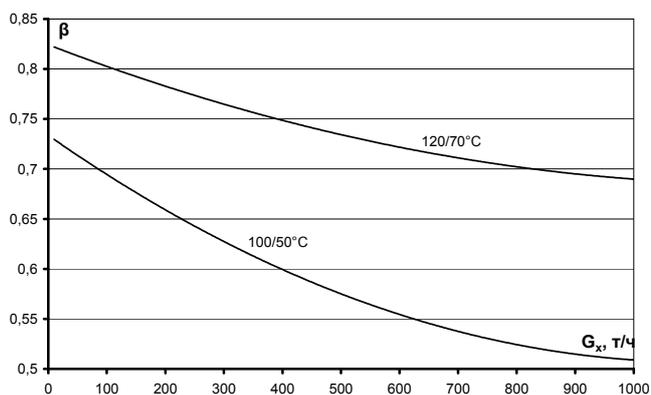


Рис.12. Отношение доли подогрева в нижней ступени к общему подогреву сетевой воды в зависимости от расхода подпиточной воды

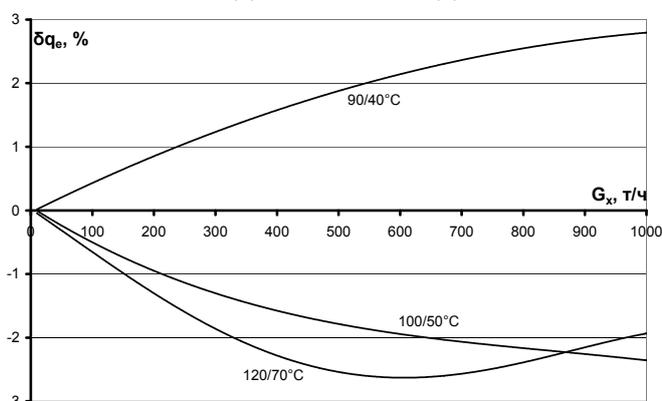


Рис.14. Относительное изменение удельного расхода тепла на выработку электроэнергии в режиме совместного подогрева сетевой и подпиточной воды теплосети

по причине разогрева и вибрации хвостовой части. Подключение деаэратора и верхнего сетевого подогревателя к одному отбору позволит сократить потери рабочего тела до минимума, а увеличение площади поверхности нижней ступени сетевой установки приведет к снижению температурного напора ПК и понижению противодавления. Рассматривалась работа турбины при изменении расхода  $G_x$  при нагреве в пределах турбоустановки ПТР-80 от температуры  $t_x=30^\circ\text{C}$  до температуры насыщения ДПТС  $104^\circ\text{C}$ . Наибольшее значение  $G_x$  соответствует максимальной нагрузке отопительных отборов турбины ПТР-80-130. Расчетными исследованиями получено, что во всем диапазоне нагрузок основной нагрев подпиточной воды осуществляется в нижней ступени. В диапазоне расходов  $G_{\text{дп}}=(800-1400)$  т/ч тепловая экономичность – наивысшая. Оптимальное значение  $G_{\text{дп}}$  составляет (1100-1200) т/ч, что соответствует (70-80) % отопительной нагрузки турбины.

**Факторы, определяющие эффективность ступенчатого подогрева сетевой воды при совместном отпуске тепла с сетевой и подпиточной водой**

Известно, что максимальная эффективность ступенчатого подогрева достигается при равном подогреве по ступеням. Этот вывод нельзя использовать для тур-

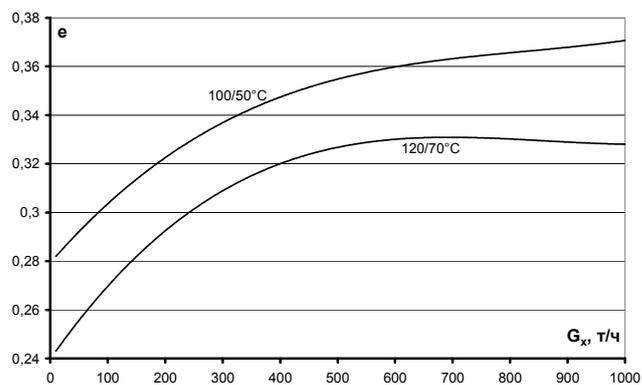


Рис.13. Доля выработки электроэнергии на тепловом потреблении паром сетевой установки в зависимости от расхода подпиточной воды

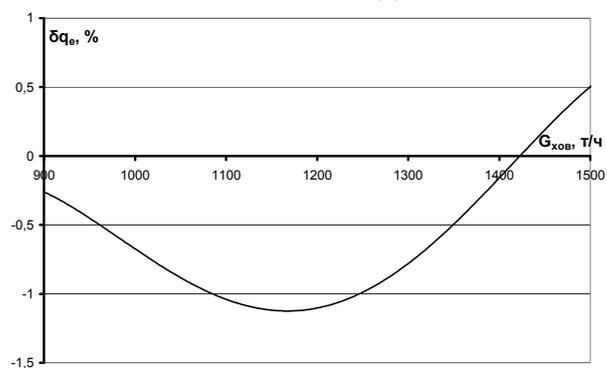


Рис.15. Относительное изменение удельного расхода тепла на выработку электроэнергии при переводе турбоустановки ПТР-80 на подогрев подпитки теплосети

боустановок, тепловой схемой которых предусмотрен отпуск пара из нижнего отбора на общестанционные нужды – для подогрева подпиточной воды теплосети или котлов (рис.10). При проектировании таких турбин расчетные параметры нижнего отопительного отбора следует определять с учетом максимальной выработки электроэнергии в течение года на базе совместного подогрева сетевой, добавочной и подпиточной воды теплосети.

С использованием известной методики получена формула для расчета оптимальной температуры сетевой воды за нижним подогревателем турбоустановки

$$t_{C1}^{opt} = \frac{t_{C2} + \delta t_2 + \frac{G_{CB}}{G_{CB} + G_X} \cdot (t_{oc} - \delta t_1) + \frac{G_X}{G_{CB} + G_X} \cdot (t_{X1} + \delta t_K - 2 \cdot \delta t_1)}{2}.$$

$$\text{В случае } \delta t_1 = \delta t_2; \delta t_2 + \delta t_K = 2 \cdot \delta t_1 \quad t_{C1}^{opt} = \frac{t_{C2} + \bar{G}_{CB} \cdot t_{oc} + \bar{G}_X \cdot t_{X1}}{2}.$$

### ***Способ повышения эффективности ступенчатого подогрева сетевой воды на ТЭЦ при совместной работе турбоустановок***

Подогрев сетевой воды в нижнем и верхнем подогревателях двухступенчатой сетевой установки в течение отопительного сезона значительно отличается от равномерного. При снижении температуры наружного воздуха тепловая нагрузка нижнего теплофикационного отбора и доля подогрева воды в НСП растет (до 70-80 % от номинальной тепловой нагрузки сетевой установки). При уменьшении расхода сетевой воды при прочих равных условиях неравномерность подогрева увеличивается. При совместной работе однотипных теплофикационных турбин по тепловому графику для обеспечения равномерного подогрева сетевой воды предлагаются сетевые установки отдельных турбин включать по воде последовательно. Для этого каждая турбина переводится на одноступенчатый подогрев с регулированием давления  $P_{T1}$  в нижнем отборе. Нижний и верхний сетевые подогреватели одной турбоустановки включаются по сетевой воде и пару параллельно.

Совместная работа двух турбоустановок Т-110-130 по тепловому графику по предложенной схеме дает повышение электрической мощности на (3-4) %, выработки электроэнергии на тепловом потреблении - на (5-6) % при общем снижении удельного расхода тела на турбоустановку. Мощность теплофикационных отборов увеличивается на (4-9) %. При снижении нагрузки отопительных отборов эффект от равномерного распределения при последовательном соединении сетевых установок возрастает.

### **Выводы**

1. На основе обобщенного анализа загрузки ПВД действующих промышленно-отопительных ТЭЦ с поперечными магистралями в различных режимах работы установлено, что отклонение расхода питательной воды от расхода острого пара для отдельных турбоустановок может достигать  $\pm (50-100)$  % и тем самым влияет на энергетические характеристики групп турбинного оборудования и распределение нагрузки между ними.

2. Разработаны алгоритмы многомерного распределения нагрузок на ТЭЦ, на базе которых созданы программные комплексы с использованием метода ди-

намического программирования. Предложена схема двумерного распределения тепловых нагрузок в прямой постановке с видоизмененным критерием Беллмана.

3. Впервые сформулированы научно-методологические основы гидравлического расчета питательного тракта ТЭЦ с поперечными связями, которые дают возможность определять расходы воды в трактах ПВД и выбирать состав работающих питательных насосов.

4. На основании расчетных исследований с использованием программных комплексов на примере нескольких ТЭЦ сложной структуры и разнотипными турбинными установками показано, что оптимальное распределение нагрузки дает экономию топлива на уровне (4-12) %, в основном, за счет выбора состава работающего оборудования.

5. Аналитически обоснованное распределение подогрева сетевой воды в двухступенчатой установке турбин, отпускающих тепло с сетевой и подпиточной водой может быть использовано на стадии технико-экономического обоснования расчетных параметров тепловых схем.

### **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях**

1. Л.А.Беляев, О.Ю.Ромашова. Использование тепла промперегрева для увеличения отпуска тепла от турбоустановки // Известия Томского политехнического университета, 2002. – Т. 305. - № 2. - С.114-120.
2. Л.А.Беляев, О.Ю.Ромашова. Потокораспределение в тракте питательной воды ТЭЦ с поперечными связями // Известия Томского политехнического университета, 2002. – Т. 305. - № 2. - С.187-190.
3. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Методические особенности расчета потокораспределения питательной воды на ТЭЦ с поперечными связями // Энергетика: Экология, надежность, безопасность. Материалы докладов девятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 3-5.12.2003. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - с. 160-162.
4. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Численное моделирование характеристики группы питательных насосов ТЭЦ // Энергетика: Экология, надежность, безопасность. Материалы докладов девятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 3-5.12.2003. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - с. 163-165.
5. Ромашова О.Ю., Габидуллин О.Р. Перераспределение поверхностей нагрева между нижней и верхней ступенями сетевой установки теплофикационных турбин // Энергетика: Экология, надежность, безопасность. Материалы докладов девятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 3-5.12.2003. - Томск: Изд. ТПУ, 2003. - с. 239-242.
6. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю. Приложение динамического программирования к оптимизации режимов ТЭЦ на основе декомпозиции исходной структуры станции // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Материалы докладов десятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 8-10 дек. 2004. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 189-191.
7. Ромашова О.Ю., Габидуллин О.Р. Способ повышения эффективности ступенчатого подогрева сетевой воды на ТЭЦ при совместной работе турбоустановок // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Материалы докладов десятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 8-10 дек. 2004 г. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 222-225.
8. Ромашова О.Ю., Жмакин Д.А. Исследование режимов работы турбоустановки ПТР-80-130/13 в составе ТЭЦ с поперечными связями на математической модели // Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Материалы докладов десятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 8-10 дек. 2004. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с.

9. Ромашова О.Ю., Мухаммадеев К.М. Выбор расчетных параметров отопительных отборов противоаварийных турбин //Энергетика: Экология, надежность, безопасность: Материалы докладов десятой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 8-10 дек. 2004 г. - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 225-228.
10. Ромашова О.Ю. Способ получения пиковой мощности на промышленно-отопительных ТЭЦ //Электроэнергия и будущее цивилизации: Материалы Международной научно-технической конференции - Томск, . - Томск: Изд. ТПУ, 2004. - с. 438-440.
11. Ромашова О.Ю., Мухаммадеев К.М. Перевод турбины ПТР-80-130/13 на подогрев подпиточной воды теплосети //Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 7-9 дек. 2005. - Томск: Изд. ТПУ, 2005. - с. 242-245.
12. Ромашова О.Ю., Волков В.А. Распределение отопительной нагрузки на ТЭЦ //Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов XI Всероссийской научно-технической конференции - Томск, 7-9 дек. 2005. - Томск: Изд. ТПУ, 2005. - с. 245-247.
13. Мухаммадеев К.М., Ромашова О.Ю. Выбор схемы и параметров теплофикационных турбин при проектировании на подогрев подпитки //Современные техника и технологии: Труды XII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых в 2-х т. - Томск, 27-31.03.2006. - Томск: Изд. ТПУ, 2006. - с. 389-392.
14. Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Волков В.Н. Распределение тепловых нагрузок между турбинами ТЭЦ СХК методом динамического программирования //Энергетика: экология, надежность, безопасность: Материалы докладов двенадцатой Всероссийской научно-технической конференции - Томск, ТПУ, 6-8 дек. 2006. - Томск: Изд. ТПУ, 2006. - с. 220-222.
15. Л.А. Беляев, А.А. Боярский, О.Ю. Ромашова. Выбор оптимального состава турбоагрегатов ТЭЦ на период. // Материалы двенадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, -2006. -465 с., с. 216-220.
16. Боярский А.А., Беляев Л.А., Ромашова О.Ю., Мухаммадеев К.М. Выбор оптимальных режимов работы турбоустановки ПТР-80-130/13 //Повышение эффективности производства и использования энергии на Дальнем Востоке: Материалы IV семинара Вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике - Владивосток, ДВГТУ, 6-9 сент. 2005. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. - с. 183-190.
17. Боярский А.А., Беляев Л.А., Пушкин С.В., Ромашова О.Ю. Особенности распределения нагрузок на ТЭЦ с поперечными связями //Повышение эффективности производства и использования энергии на Дальнем Востоке: Материалы IV семинара Вузов Сибири и Дальнего Востока по теплофизике и теплоэнергетике - Владивосток, ДВГТУ, 6-9 сентября 2005. - Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2006. - с. 190-201.

Подписано к печати 27.04.2007. Формат 60×84/16. Бумага «Классика».

Печать RISO. Усл. печ. л. 1,16. Уч.- изд. л. 1,05.

Заказ . Тираж 100 экз.

---

ИЗДАТЕЛЬСТВО ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.