МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ "СОЮЗТЕХЭНЕРГО"

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЮЩИХ ПИТАТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ КОТЛОВ И СНИЖЕНИЮ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИВОД ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ НА ТЭС С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

СПО
СОЮЗТЕХЭНЕРГО
Москва 1987

gost.e-ecolog.ru

МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГЛАВНОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПО НАЛАДКЕ, СОВЕРШЕНСТВОВАНИЮ ТЕХНОЛОГИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ И СЕТЕЙ "СОЮЗТЕХЭНЕРГО"

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЮЩИХ ПИТАТЕЛЬНЫХ КЛАПАНОВ КОТЛОВ И СНИЖЕНИЮ РАСХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПРИВОД ПИТАТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОНАСОСОВ НА ТЭС С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

СЛУЖБА ПЕРЕДОВОГО ОПЫТА ПО "СОЮЗТЕХЭНЕРГО"

Москва 1987

УДК 621.187.1:621.65-53.001.4

С О С Т А В Л Е Н О Производственным объединением по наладке, совершенствованию технологии и эксплуатации электростанций и сетей "Союзтехэнерго"

С О С Т А В И Т Е Л Ь А.К.КИРИ

Предложен методический подход к решению задачи снижения перепада давлений на РПК котлов ТЭС с поперечными связями, в состав оборудования которых входят питательные электронасосы (ПЭН) с постоянной частотой вращения. Даны рекомендации по уменьшению давления, развиваемого ПЭН за счет удаления ступеней или подрезки рабочих колес. Показано, как разработкой и применением графиков режимов работы ПЭН с использованием дополнительного насоса меньшей подачи или насоса с одной дополнительно удаленной ступенью обеспечивается возможность снижения перепада давлений на РПК.

Рекомендации предназначены для эксплуатационного персонала электростанций.

© СПО Союзтехэнерго, 1987.

Ответственный редактор Н.К.Демурова
Литературный редактор Ф.С.Кузьминская
Технический редактор Т.Ю.Савина
Корректор Л.Ф.Петрухина

Подписано к печати 25.02.87 Формат 60x84 1/16
Печать офсетная Усл.печ.л.2,32 Уч.-изд.л. 2,4 Тираж 1100 экз.
Заказ №224/87 Издат. № 36/84 Цена 36 коп.

Производственная служба передового опыта эксплуатации энергопредприятий Союзтехэнерго
105023, Москва, Семеновский пер., д.15

Участок оперативной полиграфии СПО Союзтехэнерго
109432, Москва, 2-й Кожуховский проезд, д.29, строение 6

О Г Л А В Л Е Н И Е

I. Характеристика пароводяного тракта электростанции с поперечными связями 6

2. Характеристики ПЭН ..... IO

3. Построение характеристик параллельной работы ПЭН ... I3

4. Определение минимально допустимого давления в напорном коллекторе ПЭН I3

5. График режимов параллельной работы ПЭН на электростанциях с поперечными связями..... I6

6. Снижение давления, развиваемого насосом, путем удаления ступеней I9

7. Подрезка рабочих колес для дополнительного снижения давления, развиваемого ПЭН 2I

8. Параллельная работа разнотипных ПЭН с отличающимися напорными характеристиками 22

9. Использование для уменьшения перепадов давлений на РПК дополнительного насоса с меньшей номинальной подачей 26

I0. Уменьшение перепадов давлений на РПК при параллельной работе группы ПЭН с оптимальным числом ступеней и насоса с одной удаленной ступенью 28

II. Суммарная подача ПЭН при проведении реконструктивных мероприятий для уменьшения перепадов давлений на РПК 3I

I2. Применение выданных рекомендаций для электростанций с поперечными связями на давление 9 МПа (90 кгс/см^2) 3I

I3. Эксплуатационная проверка соответствия фактических напорных характеристик типовым энергетическим характеристикам ПЭН 33

I4. Общие замечания по реализации рекомендаций 35

П р и л о ж е н и е I. Чертежи реконструкции питательных насосов ПЭ-720, ПЭ-580, ПЭ-500, ПЭ-380 с удалением из проточной части одной или двух ступеней 37

П р и л о ж е н и е 2. Чертежи реконструкции питательного насоса ПЭ-270-I50 с удалением из проточной части одной или двух ступеней 40

УТВЕРЖДАЮ:
Главный инженер
ПО "Союзтехэнерго"
Г.Г.ЯКОВЛЕВ
22.12.83 г.

Длительная работа шиберных регулирующих питательных клапанов котлов (РПК) при повышенных перепадах давлений на них вызывает сильный эрозионный износ выходных патрубков клапанов. Это явление наблюдалось на подавляющем числе ТЭС с питательными электронасосами (ПЭН), работающими с постоянной частотой вращения, в связи с чем был выпущен Противоаварийный циркуляр № Т-2/77 "О предотвращении разрывов трубопроводов барабанных котлов, оснащенных на узле питания шиберными клапанами"(М.: СПО Союзтехэнерго, 1977), вошедший п. 5.9 в "Сборник директивных материалов по эксплуатации энергосистем. Теплотехническая часть. "(М.: Энергоиздат, 1981).

Для уменьшения перепадов давлений на РПК Противоаварийным циркуляром № Т-2/77 предусматривается увеличение площадей проходных сечений клапанов и снижение избыточных давлений, развиваемых ПЭН. В этом случае перепады давлений на седлах при полном открытии клапана и расходах питательной воды через них от 420 до 660 т/ч составляют соответственно от 0,5 до 1,2 МПа (от 5 до 12 кгс/см^2). При номинальных подачах параллельно работающих насосов перепады давлений на РПК не должны превышать 1-1,6 МПа (10-16 кгс/см^2). Исходя из этих условий в режимах параллельно работающих ПЭН с номинальной подачей развиваемое ими давление обеспечит запас по перепаду давлений на РПК в 0,4-0,5 МПа (4-5 кгс/см^2) на регулирование питания котла.

Реализация указанных мероприятий помимо повышения надежности работы питательного тракта снижает расходы электроэнергии на

привод ПЭН.

Характеристика пароводяного тракта ТЭС с поперечными связями при неизменном минимальном перепаде давлений на РПК с достаточной степенью достоверности описывается горизонтальной линией. На рис. I приведена характеристика пароводяного тракта и напорные характеристики одного, двух и трех однотипных параллельно работающих насосов. В зависимости от режима ТЭС в работе должно находиться такое количество ПЭН, которое обеспечивает подачу необходимого количества питательной воды в котлы. Точки I, 2 и 3 отвечают оптимальным режимам работы насосов с минимальным перепадом давлений на РПК. Дополнительное дросселирование на РПК неизбежно при расходах питательной воды в интервалах между точками I, 2 и 3 для обеспечения необходимого расхода питательной воды. Особенно неблагоприятный для узла питания режим соответствует точке 4. В точке 5, когда необоснованно работают три насоса, этот дополнительный перепад еще больше. Дополнительный избыточный перепад давлений на РПК часто имеет место также в случае неправильного подбора насоса, когда давление, создаваемое насосом при номинальной его подаче, оказывается значительно выше, чем это требуется по характеристике пароводяного тракта.

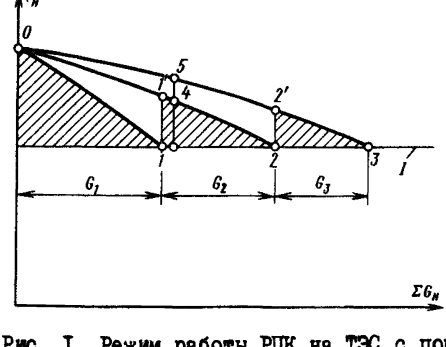

Рис. I. Режим работы РПК на ТЭС с поперечными связями
Заштрихованная площадь - перепад давлений на РПК;
I - характеристика пароводяного тракта;
G_1, G_2, G_3 - подача насосов I, 2, 3

Ниже рассматриваются возможные пути снижения перепада давлений на РПК на электростанциях с поперечными связями. Исходя из разнотипности оборудования на разных ТЭС (котлов, ПЭН, вспомогательного оборудования на пароводяном тракте, конструкций РПК, конфигурации питательных трубопроводов и других элементов водопитательного контура ТЭС) связанные с наладкой режимов РПК вопросы решаются с учетом особенностей эксплуатации конкретной ТЭС.

В Минэнерго СССР на ТЭС с давлением 13 МПа (130 кгс/см^2) с поперечными связями установлены барабанные котлы паропроизводительностью 210, 320, 420 и 480 т/ч Таганрогского и Барнаульского заводов и ПЭН Сумского насосного завода типов ПЭ-500, ПЭ-580 и в редких случаях ПЭ-380.

В приведенных ниже примерах принят этот тип оборудования.

I. ХАРАКТЕРИСТИКА ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

Схема пароводяного тракта ТЭС с большим количеством агрегатов (котлов, турбин, ПЭН) представляет собой комплекс параллельных каналов, по которым прокачиваются раздельные потоки; однако поперечные связи (коллекторы) по воде и пару между отдельными каналами позволяют с известным допущением представить такую относительно сложную схему как однопоточную; без этого допущения решение вопроса об оптимизации режима работы узла питания котлов с поперечными связями значительно затрудняется.

Для обеспечения надежности, маневренности и экономичности эксплуатации ТЭС снабжены следующими поперечными связями (рис.2):

- напорный коллектор I , объединяющий напорные трубопроводы ПЭН, что определяет параллельную работу всех ПЭН; при относительно равномерном распределении работающих насосов по питательной магистрали (по длине машинного зала) перетоки воды по коллектору минимальны и все насосы работают практически на одно и то же противодавление $P_н$. Давление в коллекторе $P_н$ определяется сопротивлением всех элементов оборудования электростанции, подключен-

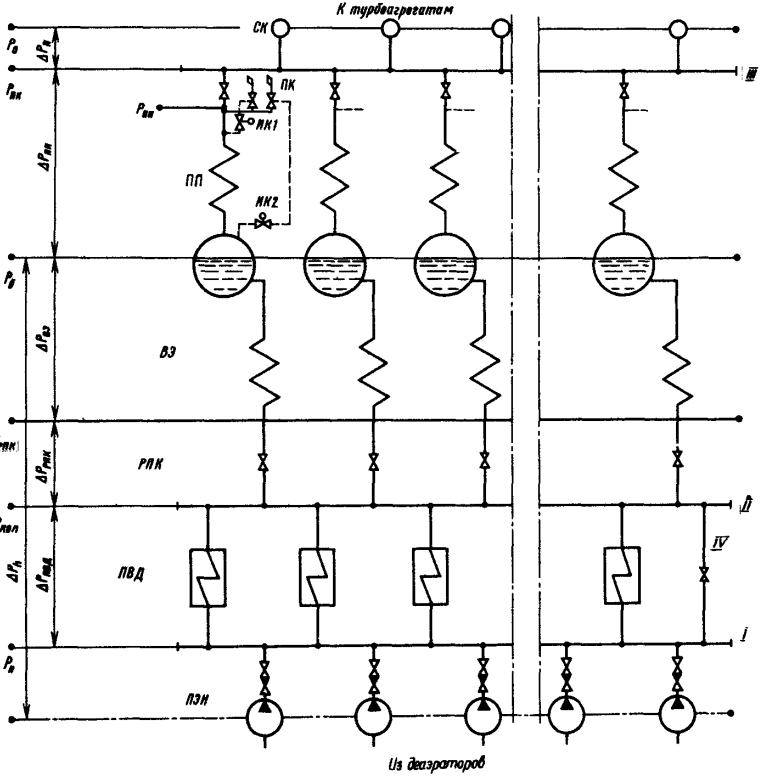

Рис. 2. Принципиальная схема пароводяного тракта с поперечными связями

ных к коллектору (ПВД, котлов, трубопроводов с арматурой и др.); суммарное сопротивление всех этих элементов зависит от общего расхода питательной воды, подаваемой ПЭН, т.е. от нагрузки электростанции в рассматриваемом режиме.

При параллельной работе насосов с различными напорными характеристиками значения их подачи при одном и том же давлении на выходе P_H будут различными (G_1, G_2, G_3 на рис. I).

Давление в напорном патрубке насоса выше давления в напорном коллекторе насосов P_H на значение потерь в обратном клапане, открытой напорной задвижке и другой арматуре на отводах от насосов к общему напорному коллектору, зависящих от подачи каждого насоса, что можно учесть, если из значения давления по фактической напорной характеристике насоса графически вычесть указанные выше переменные потери участка и в дальнейших расчетах использовать скорректированные таким образом напорные характеристики насосов (однако для рассматриваемых целей этим уточнением допустимо пренебречь);

- питательный коллектор II перед РПК с давлением $P_{кол}$, уравнивающий давление в схеме питания котлов. Давление $P_{кол}$ ниже давления, создаваемого насосом, на значение гидравлического сопротивления включенных параллельно и относящихся к турбоагрегатам ПВД, а также включаемого в ряде случаев стояка холодного питания IУ. Давление воды перед узлами питания установленных на ТЭЦ котлов при условии относительно равномерного подключения котлов к коллектору по длине здания ТЭС также может считаться одинаковым (в пределах точности измерения), т.е. может быть принято практически отсутствие перетоков по длине коллектора II. Это означает, что за исходное условие при решении задачи об уменьшении перепадов давлений на РПК следует принимать равенство давлений перед РПК всех установленных на ТЭС котлов. Исключение может составить период проведения капитальных ремонтов оборудования котлов, турбин, ПЭН; в этом случае могут появиться более или менее значительные перетечки питательной воды по коллектору из-за несимметричного по длине расположения находящегося в работе оборудования;

- общий паровой коллектор III на выходе пара из котлов, из которого пар раздается на турбины, являющийся выходной уравновеши-

вающей поперечной связью ТЭС. Давление пара, принимаемое одинаковым по длине парового коллектора Ш, определяется номинальным давлением пара перед стопорным клапаном (СК) турбин P_0 = 13 МПа (130 кгс/см^2) и сопротивлением паропроводов свежего пара между паровым коллектором и турбиной $\Delta P_п$.

Между коллектором питательной воды перед РПК и выходным паровым коллектором включены котлы, причем в общем случае они могут быть разнотипными; когда же решается гидравлическая задача, имеет значение только различие в общем гидравлическом сопротивлении котлов $\Delta P_К = P_{пК} - P_{рпК}$.

Как видно из принципиальной схемы (см.рис.2), основными слагаемыми сопротивления барабанных котлов на участке между коллекторами П и Ш являются сопротивления экономайзера (ВЭ), пароперегревателя (ПП) и РПК. Различие в гидравлическом сопротивлении котлов, включенных между коллекторами П и Ш с давлением соответственно $P_{кол}$ и $P_{пК}$ компенсируется различной степенью дросселирования в соответствующих РПК: в котле с бо́льшим гидравлическим сопротивлением или работающем с бо́льшей паропроизводительностью, чем остальные, перепад давлений на РПК будет наименьшим; на РПК остальных котлов будут срабатываться соответственно бо́льшие перепады давлений. Таким образом, характеристика пароводяного тракта ТЭС (исключая переменную слагаемую регулируемого перепада давлений на РПК) может быть принята практически постоянной, не зависящей от нагрузки ТЭС и суммарного расхода питательной воды $\Sigma G_н$ (см. рис. I).

Учитывая, что существенное снижение нагрузки ТЭС с поперечными связями обычно сопровождается отключением отдельных котлов, турбоагрегатов со своими группами ПВД и ПЭН, т.е. что одновременно с уменьшением нагрузки ТЭС по подаче питательной воды соответственно уменьшается и суммарное проходное сечение всех параллельных каналов тракта, такое условие правомерно и подтверждается практикой эксплуатации ТЭС. Полная же характеристика пароводяного тракта ТЭС с поперечными связями и параллельно работающими насосами включает в себя также переменное сопротивление РПК, меняющееся в соответствии с наклоном напорной характеристики насосов. На рис. I эта фактическая характеристика пароводя-

ного тракта ТЭС с поперечными связями изображена ломаной кривой 0-I-I'-2-2'-3.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЭН

ПО "Союзтехэнерго" были составлены и изданы типовые энергетические характеристики питательных электронасосов ПЭ-720-I85-2, ПЭ-580-200/I85-2, ПЭ-500-I80-4, ПЭ-380-200/I85-2 и ПЭ-270-I50-3, построенные в рабочих координатах: давление на напорной стороне насоса $P_н$ (кгс/см^2), подача насоса $G_н$ (т/ч), мощность насосного агрегата $N_{на}$ (кВт). На рис. 3 приведены основные характеристики для наиболее распространенных на ТЭС рассматриваемого типа питательных электронасосов ПЭ-580-I85-2 (IO ступеней), ПЭ-500-I80-4 (IO ступеней), а также для этих двух типов насосов после удалений по одной ступени. Удаление ступени из насоса является одним из способов снятия избыточного давления, развиваемого насосом, и уменьшения таким образом излишнего перепада давлений на РПК. В связи с тем, что все ступени данного насоса идентичны, расчет новых характеристик производится по следующим простейшим формулам (надо иметь в виду, что удаление ступени на подачу насоса не влияет):

$$P_{n-1} = (P_n - 9)\frac{n-1}{n} + 9 \approx P_n \frac{n-1}{n};$$

$$N_{n-1} = N_n \frac{n-1}{n},$$

где n – исходное количество ступеней в насосе;

P_n, P_{n-1} – давление на выходе из насоса при n и $n-1$ ступенях, кгс/см^2;

9 – давление на входе в насос, кгс/см^2;

N_n, N_{n-1} – мощность насосного агрегата при n и $n-1$ ступенях, кВт.

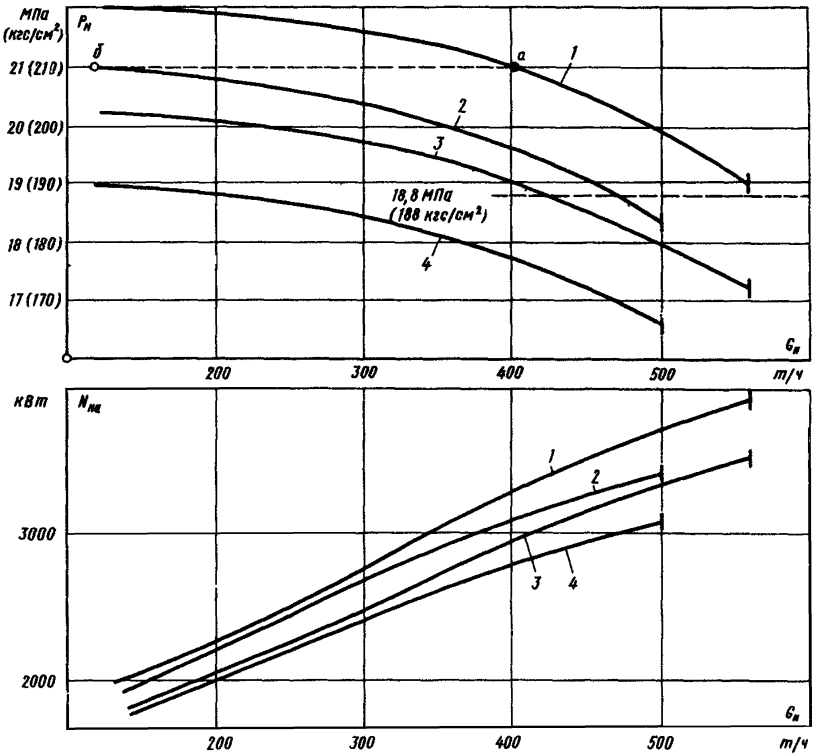

Рис. 3. Основные характеристики ПЭН ТЭС с поперечными связями на давление 13 МПа (130 кгс/см²):

1 – ПЭ-580-185-2 (10 ступеней); 2 – ПЭ-500-180-4 (10 ступеней); 3 – ПЭ-580 (9 ступеней); 4 – ПЭ-500 (9 ступеней);

⊣ – предельно допустимая подача (по данным ВНИИАЭН).

Условия: $P_{вс}$ = 0,9 МПа (9 кгс/см²); $t_{вс}$ = 164,2°С;

$\gamma_{ср}$ = 912,5 кг/м³; n = 2985 об/мин

По рекомендации ВНИИАЭН, более двух ступеней по сравнению с исходным количеством удалять не рекомендуется из-за снижения жесткости ротора насоса.

На рис. 4 приведены основные характеристики насосов ПЭ-250-I80-3 и ПЭ-380 с девятью ступенями, которые могут быть в

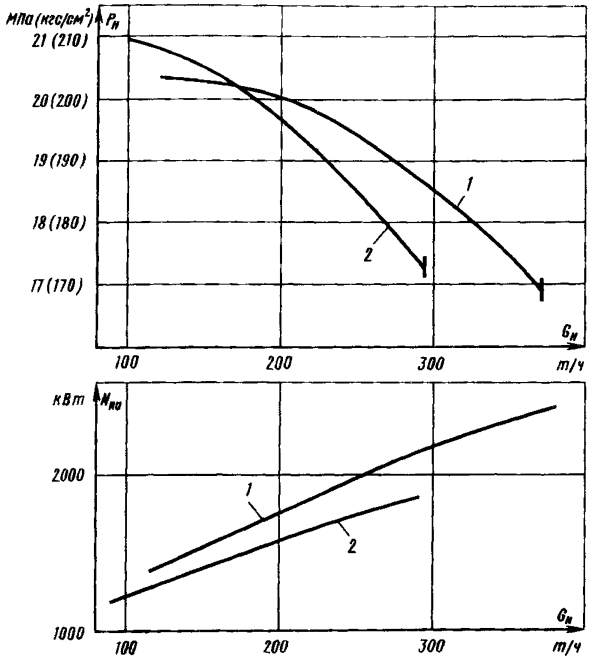

Рис. 4. Основные характеристики ПЭН девятиступенчатого ПЭ-380 (кривая I) и ПЭ-250-I80-3 (кривая 2)

Условия см.рис. 3

ряде случаев использованы в параллельной работе в комбинации с насосами ПЭ-500 и ПЭ-580 для снижения перепада давлений на РПК в интервалах между оптимальными режимами параллельной работы насосов.

3. ПОСТРОЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПЭН

Напорные характеристики строятся графическим сложением подач параллельно работающих насосов при каждом из принимаемых для построения давлений на напорной стороне насосов, например, через 0,5; I,0 МПа (5; I0 кгс/см^2) (рис. 5). Величиной, характеризующей экономичность эксплуатации параллельно работающих ПЭН, является удельный расход электроэнергии на I т перекачиваемой воды.

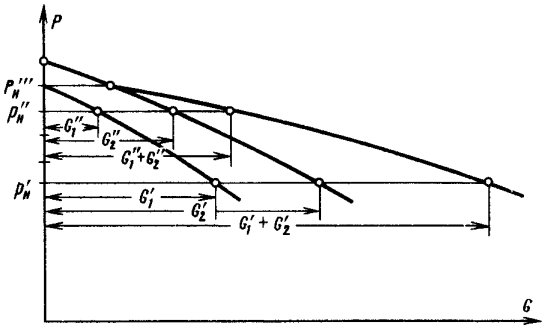

Рис. 5. Построение характеристики параллельной работы ПЭН

Для единичного насоса она определяется делением мощности насосного агрегата $N_{Hа}$ на его подачу G_H. Для группы параллельно работающих насосов сумма мощностей отдельных насосных агрегатов $\Sigma N_{Hа} = N_1 + N_2 + N_3$ делится на их суммарную подачу $\Sigma G_H = G_1 + G_2 + G_3$.

4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОГО ДАВЛЕНИЯ В НАПОРНОМ КОЛЛЕКТОРЕ ПЭН

От значения минимально допустимого давления в напорном коллекторе ПЭН зависит выбор их напорных характеристик. Выполнение требований п.7.I.3 "Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов" (М.: Недра, I977) определяет минимально допустимое давление в напорном коллекторе.

Ниже показан методический подход к решению задачи определения минимального давления в напорном коллекторе и приведен чис-

ловой пример с оценочно принятыми гидравлическими сопротивлениями отдельных участков тракта.

Согласно принципиальной схеме пароводяного тракта ТЭС, давление, которое должны обеспечивать работающие ПЭН, складывается из отдельных слагаемых (см.рис.2):

$$P_н = P_0 + \Delta P_п + \Delta P_{пп} + \Delta P_{вэ} + \Delta P_{рпк} + \Delta P_{пвд} + \Delta P_h$$

(ΔP_h - перепад давлений, соответствующий высоте столба воды между отметками уровня в барабане котла и оси питательных насосов).

В качестве примера рассматривается ТЭС с одинаковыми барабанными котлами паропроизводительностью по 420 т/ч, близкими к действительным гидравлическими сопротивлениями отдельных участков пароводяного тракта при номинальном расходе питательной воды на котлы электростанции:

P_0 = I3 МПа (I30 кгс/см^2); $\Delta P_п$ = I МПа (I0 кгс/см^2);
$P_{пк}$ = I4 МПа (I40 кгс/см^2); $\Delta P_{пп}$ = I МПа (I0 кгс/см^2);
$P_б$ = I5 МПа (I50 кгс/см^2); $\Delta P_{вэ}$ = 0,5 МПа (5 кгс/см^2)
$\Delta P_{пвд}$ = I,2 МПа (I2 кгс/см^2); ΔP_h = 0,4 МПа (4 кгс/см^2)

перепад давлений на РПК при его полном открытии $\Delta P_{рпк}^{мин}$ = 0,5 МПа (5 кгс/см^2).

Давление в напорном коллекторе ПЭН при эксплуатации ТЭС с полностью открытыми РПК котлов составит:

$P_н$ = I3,0 + I,0 + I,0 + 0,5 + 0,5 + I,2 + 0,4 = I7,6 МПа (I76 кгс/см^2).

Однако, для обеспечения безопасности при срабатывании предохранительных клапанов (ПК) необходимо, чтобы при номинальном режиме ТЭС предусматривался запас в открытии РПК.

На рис.2 показана установка ПК согласно п.5.2.8 Правил Госгортехнадзора СССР; давление начала открытия ПК должно составлять I,08 рабочего давления.

Для подачи питательной воды в барабан котла при давлении срабатывания ПК давление в напорном коллекторе ПЭН должно составлять (см.рис.2):

$$P_{н} = 1{,}08\,P_{б} + \Delta P_{вэ} + \Delta P_{рпк}^{мин} + \Delta P_{пвд} + \Delta P_{h},$$

что для исходных данных примера составит

$$P_{н} = 16{,}2 + 0{,}5 + 0{,}5 + 1{,}2 + 0{,}4 = 18{,}8 \text{ МПа } (188 \text{ кгс/см}^2).$$

Полученное выше значение минимально допустимого давления в напорном коллекторе ПЭН (18,8 МПа) отвечает потерям давления на тракте от ПЭН до барабана котла при расходе питательной воды, соответствующем номинальной нагрузке котла и электростанции в целом. При этом будет обеспечена подача воды в котел и сохранение нормального уровня в барабане при расходе пара через полностью открытые ПК. Таким образом, регулируемый перепад давления в РПК котлов электростанции при их режиме с номинальным давлением пара в барабане должен поддерживаться равным не менее 0,08 номинального давления в барабане, т.е. 0,08·15 = 1,2 МПа (12 кгс/см^2).

Этот постоянный избыточный перепад давления на РПК оказывается необходимым и используется при регулировании подачи воды в котел при переходных режимах. Для данного примера общий поддерживаемый РПК перепад давлений при минимально допустимом давлении в напорном коллекторе составит

$$P_{рпк} = 1{,}2 + 0{,}5 = 1{,}7 \text{ МПа } (17 \text{ кгс/см}^2),$$

что примерно отвечает требованиям п.5.9 "Сборника директивных материалов по эксплуатации энергосистем. Теплотехническая часть" (М.: Энергоиздат, 1981).

Уставка АВР питательных насосов должна выбираться равной минимально допустимому давлению в коллекторе питательной воды

перед РПК. Это давление меньше давления в напорном коллекторе ПЭН на сумму потерь давлений в ПВД и питательных трубопроводах - $\Delta P_{ПВД}$ и перепада давлений, обуславливаемого разностью отметок осей коллектора перед РПК и ПЭН - $\Delta P_h^{кол}$.

Для приведенного примера

$$\Delta P_{ПВД} + \Delta P_h^{кол} = 1{,}6 \text{ МПа (принято } \Delta P_h^{кол} = \Delta P_h = 0{,}4 \text{ МПа}).$$

Давление в коллекторе перед РПК - уставка АВР:

$$P_{кол}^{мин} = P_{АВР} = 18{,}8 - 1{,}6 = 17{,}2 \ (172 \text{ кгс/см}^2).$$

В приведенном примере приняты максимальные значения потерь давления в пароводяном тракте ТЭС с давлением 13 МПа, которые для тепловых схем конкретных электростанций должны определяться путем непосредственных измерений давлений. Все мероприятия по снижению потерь давления в пароводяном тракте в конечном счете приводят к снижению уровня давления воды в питательных коллекторах и, соответственно, к снижению уставки АВР.

После определения минимального уровня давлений на напорной стороне насосов разрабатываются мероприятия по приведению характеристик насосов в соответствие с характеристиками пароводяного тракта (разд. 7-11); при этом подача насосов при работе с давлением на стороне нагнетания, равном выбранному минимально допустимому давлению в напорном коллекторе ПЭН, не должна превышать значений, регламентированных заводом-изготовителем и указанных на рис.3.

5. ГРАФИК РЕЖИМОВ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ПЭН НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ

На рис. 6,*а* представлен график параллельной работы однотипных насосов ПЭ-500 с десятью ступенями (с характеристиками

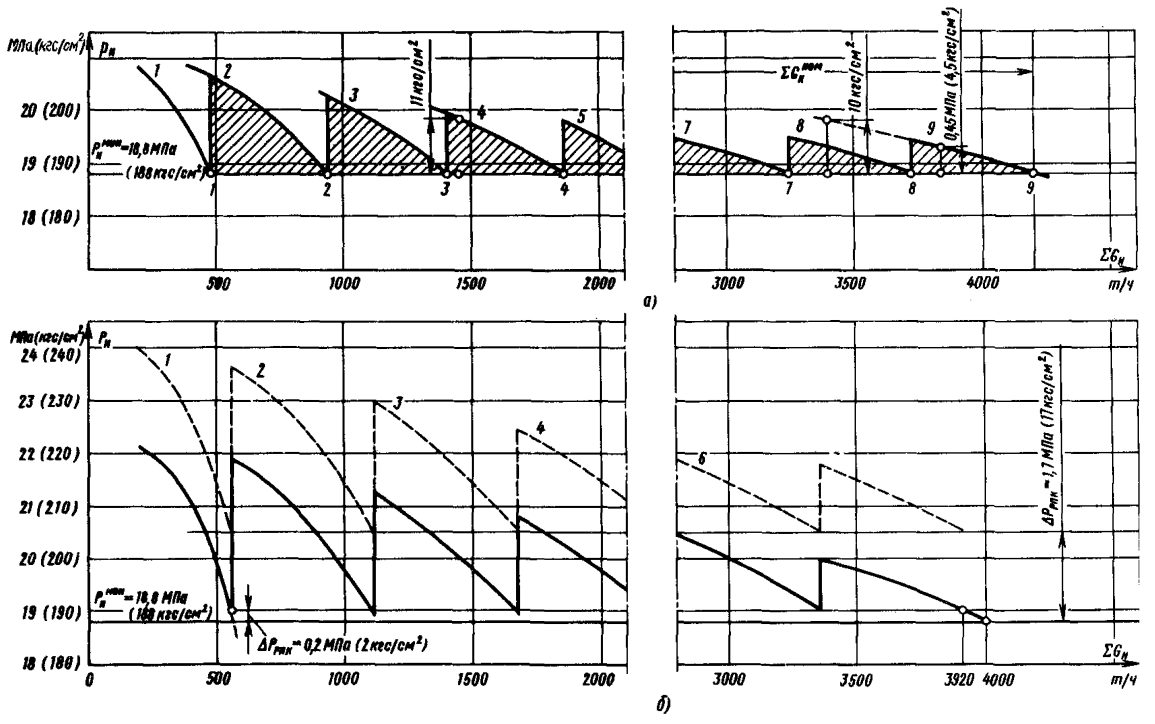

Рис.6. График режимов параллельной работы ПЭН на коллектор с $p_н^{мин}$ = 18,8 МПа (188 кгс/см^2):
а – ПЭ-500-180-4 (10 ступеней); *б* – – – – – ПЭ-580-200-2 (11 ступеней);
——— – ПЭ-580-185-2 (10 ступеней);
1-9 – режимы работы при количестве включенных насосов 1-9 соответственно

по рис.3) при рассчитанном для приведенного выше примера минимальном давлении в напорном коллекторе ПЭН. Из графика следует, что только при работе одного, двух, трех насосов и более с подачей каждого из них примерно по 470 т/ч (точки I, 2, 3 и т.д.) имеет место рассчитанное минимально допустимое давление в коллекторе I8,8 МПа (I88 кгс/см^2). При отклонении расхода питательной воды от этих оптимальных режимов в ту или другую сторону перепады давлений на РПК всегда будут больше в меру крутизны напорных характеристик насосов. Этот дополнительный регулировочный перепад на РПК составляет, например, перед переходом с четырех на три насоса (ΣG_H = I450 т/ч) около I,I МПа (II кгс/см^2).

Таким образом, давление в напорном коллекторе ПЭН во всем диапазоне изменения суммарного расхода питательной воды на электростанции (нагрузки ТЭС) изображается ломаной пилообразной линией, заштрихованные площадки под которой (см.рис. 6, α) представляют собой неизбежные потери давлений на РПК, связанные с необходимостью регулирования суммарной подачи насосов в соответствии с паропроизводительностью котлов электростанций. Этот дополнительный регулировочный перепад на РПК неизбежен, если не удерживать режим в оптимальных точках по суммарному расходу воды с давлением на напорной стороне насосов, как в примере, $P_н^{мин}$ = I8 МПа (I88 кгс/см^2). Учитывая, однако, жесткие требования диспетчерского графика выработки электростанции, реализовать такие щадящие для питательных трубопроводов режимы оказывается практически невозможным.

Некоторое уменьшение чрезмерного перепада давлений на РПК при промежуточных режимах (между точками оптимальных режимов группы работающих параллельно насосов) в отсутствие гидромуфт или электродвигателей с тиристорным возбуждением возможно комбинацией работы входящих в состав оборудования насосов различной подачи и давления (см.разд. 9).

Следующая особенность графика режима параллельной работы насосов - чем бо́льшее количество насосов установлено и работает параллельно на электростанции, тем меньше дополнительный регулировочный перепад на РПК, Так, например, при восьми работающих насосах и подключении с увеличением нагрузки электростанции девятого насоса при суммарном расходе питательной воды, например, 3850 т/ч,

дополнительный перепад давлений составит только 0,45 МПа (4,5 кгс/см^2) (см. рис. 6,*а*). Если же, не придерживаясь графика режима эксплуатации ПЭН, даже при уменьшившемся расходе питательной воды в соответствии с уменьшением нагрузки электростанции, например, до 3400 т/ч, оставить в работе также и девятый насос, то избыточный перепад давлений на РПК составит уже I МПа (I0 кгс/см^2), а общий перепад на РПК 2,7 МПа (27 кгс/см^2) (см. рис. 6,*а*). Поэтому весьма важно с целью максимально возможного за счет чисто эксплуатационных мероприятий уменьшения перепада давлений на РПК отключать по мере снижения нагрузки ТЭЦ излишние насосы, создающие избыточный перепад на РПК.

Насосы ПЭ-500 с девятью ступенями для эксплуатации в рассматриваемых условиях непригодны в связи с низким уровнем развиваемого давления. Так, при минимальном давлении в напорном коллекторе I8,8 МПа (I88 кгс/см^2) подача такого насоса составит всего около 200 т/ч (см. рис.3), а удельный расход электроэнергии - 9,9 вместо 7,I кВт·ч/т для насоса ПЭ-500 с десятью ступенями при подаче 470 т/ч. Кроме этого экономического проигрыша решающим окажется недостаточная суммарная подача насосов, которая при том же количестве насосов снизится более чем в два раза.

6. СНИЖЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ, РАЗВИВАЕМОГО НАСОСОМ, ПУТЕМ УДАЛЕНИЯ СТУПЕНЕЙ

В ряде случаев ТЭС оказываются укомплектованными ПЭН, развивающими давление, значительно превышающее минимально необходимое значение как с точки зрения обеспечения минимального перепада на РПК, так и условий безопасности эксплуатации оборудования. Большей частью это связано с поставкой на ТЭЦ насосов с превышающим необходимое количеством ступеней. На рис.6,*б* показаны режимы параллельной работы одиннадцатиступенчатых насосов ПЭ-580-200 в схеме водопитательного контура ТЭС (штрихпунктир-

ная линия), создающих даже в оптимальных режимах большой избыточный перепад давлений, который вынужден срабатывать РПК котла ($\Delta P_{РПК}$ = I,7 МПа (I7 кгс/см^2). Сплошной ломаной линией показаны значения давления в напорном коллекторе при укомплектовании ТЭС насосами ПЭ-580-I85-2 с десятью ступенями. Из сопоставления этих двух графиков видно, что применение десятиступенчатых ПЭН при заданном в примере минимально допустимом давлении в напорном коллекторе I8,8 МПа (I88 кгс/см^2) существенно облегчило бы работу узла питания котлов и обеспечило бы снижение затрат электроэнергии на перекачку питательной воды. Некоторый избыток давления (ΔP = 0,2 МПа (2 кгс/см^2), развиваемый насосами при максимально допустимой подаче (560 т/ч), существенного значения не имеет, хотя может быть также устранен, если допустить в этих оптимальных режимах некоторую (менее 4%) перегрузку десятиступенчатых насосов по расходу питательной воды. Девятиступенчатые насосы ПЭ-580 могут найти применение лишь в случае проведения каких-либо серьезных реконструктивных работ, обеспечивающих существенное снижение (на I,6-I,8 МПа $\approx$I6-I8 кгс/см^2) гидравлического сопротивления пароводяного тракта. До принятия решения об удалении ступеней из насосов должны быть предварительно составлены и проанализированы соответствующие графики режимов параллельной работы ПЭН и график последовательности проведения работ по удалению ступеней.

В приложении I показан рекомендуемый ВНИИАЭН способ удаления ступеней из проточной части питательных насосов с установкой на валу насоса вместо удаляемого рабочего колеса соответствующей втулки, а вместо направляющего аппарата - гильзы. Эти детали могут быть изготовлены согласно указанным чертежам самими электростанциями или заказаны на Сумском насосном заводе ПО "Насосэнергомаш". При необходимости удаления одной ступени заменяется комплектом "гильза-втулка" предпоследняя ступень. Если должны быть удалены две ступени, то второй удаляется четвертая от конца ступень; такая последовательность, по мнению ВНИИАЭН, не приводит к значительному изменению жесткости ротора и ухудшению вибрационной характеристики насоса. Удалять более двух ступеней ВНИИАЭН не рекомендует. При удалении одного или нескольких рабочих колес ротор рекомендуется балансировать.

7. ПОДРЕЗКА РАБОЧИХ КОЛЕС ДЛЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО СНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ, РАЗВИВАЕМОГО ПЭН

Не всегда значение доли давления, подлежащей сокращению, соответствует перепаду, развиваемому целой ступенью ПЭН (I,6-I,7 МПа ≈ I6-I7 кгс/см^2); оставлять же избыточное давление порядка I,0-I,2 МПа (I0-I2 кгс/см^2) нецелесообразно. В этом случае может быть использован известный способ снижения давления за счет уменьшения наружного диаметра рабочих колес (рис.7). Подрезка колес, по данным исследований ВНИИАЭН, влияет на КПД и гидродинамические свойства ступени, причем в большей степени именно для насосов с многолопаточными направляющими аппаратами (для насосов со спиральным отводом это влияние несущественно), поэтому подрезку колес рекомендуется производить в размере 0,97-0,98 начального диаметра, что отвечает снижению давления для рассматриваемых десятиступенчатых насосов на I,0-I,2 МПа (I0-I2 кгс/см^2).

Основным уравнением, определяющим связь между внешним диаметром колеса (D_2) и развиваемым им давлением (H), является:

$$\frac{H^H}{H} = \left(\frac{D_2^H}{D_2}\right)^2 , \qquad (I)$$

т.е.

$$D_2^H = D_2\sqrt{\frac{H^H}{H}} , \qquad (2)$$

где D_2 – исходный диаметр рабочего колеса по выходным кромкам рабочих лопаток, мм;

H – индекс, обозначающий измененные показатели насоса.

В связи с ограниченным диапазоном подрезки рабочих колес при необходимости снижения давления подрезку внешних кромок лопаток следует производить на всех ступенях насоса. Тогда новый диаметр по выходным кромкам рабочих лопастей D_2^H при необходимом значении снижения давления на ΔP_H и давлении на напорной стороне насосов P_H может быть рассчитан по следующей формуле:

$$D_2^H = D_2\sqrt{1-\frac{\Delta P_H}{P_H - P_{BC}}} , \qquad (3)$$

где P_{BC} – давление на стороне всасывания насоса, МПа (кгс/см^2).

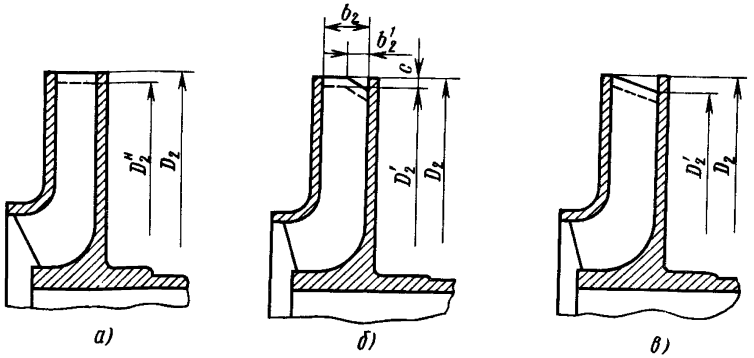

Рис. 7. Подрезка рабочего колеса:
а - подрезка по выходным кромкам лопаток; *б, в* - косая подрезка

Например, для снижения давления насоса ПЭ-580-185-2 (см.рис.3) на I МПа (I0 кгс/см^2) при P_H = I8,95 МПа (I89,5 кгс/см^2), подаче 560 т/ч необходимое уменьшение диаметра составит:

$$\frac{D_2^H}{D_2} = \sqrt{I - \frac{I,0}{I8,95 - 0,9}} = 0,972.$$

При D_2 = 402 мм D_2^H = 390,7 мм.

Для сохранения плавности проточной части и, соответственно, КПД целесообразно производить подрезку по требуемому диаметру только по выходным кромкам лопаток, сохранив (не обтачивая) боковые стенки рабочего колеса (см.рис. 7, *а*). Поскольку ширина колес и выходные углы лопаток при подрезке остаются практически неизменными, подача насоса при этом уменьшается пропорционально изменению отношения D_2^H/D_2 , т.е. практически всего на 2-3%. В приведенном выше примере подача после подрезки колеса составит G_H^H = 560 · 0,972 = 544 т/ч.

Таким образом, при построении на основании исходной напорной характеристики насоса характеристики для насоса с подрезанными колесами рассчитанные по новому диаметру значения давления P_H на выходе из насоса должны откладываться при значениях подач, уменьшенных пропорционально отношению D_2^H/D_2 .

В некоторых насосах применена косая подрезка лопастей рабочих колес (см.рис.7, *б,в*); такая подрезка в большей степени пре-

дохраняет от неблагоприятной для эксплуатации западающей формы напорной характеристики. При уменьшении внешнего диаметра рабочих колес с целью снижения давления насоса, рабочие лопасти которых имеют косую подрезку выходных кромок, подрезка должна быть сохранена. В случае косой подрезки по форме рис. 7,*б*, новый внешний диаметр D_2' с достаточной для практических целей точностью определяется по формуле (3) с сохранением прочих размеров (b_2', c) неизменными; при подрезке по форме рис. 7,*в*, для пересчета по формуле (3) используется средний диаметр $\frac{D_2 + D_2'}{2}$ с сохранением прежнего угла наклона косой кромки.

При принятии решения по дополнительному снижению давления насоса подрезкой рабочих колес следует иметь в виду, что при возможном изменении с течением времени состава основного оборудования ТЭС или расширении электростанции может измениться характеристика пароводяного тракта или рабочий диапазон нагрузки ТЭС по расходу питательной воды; восстановление же давления насоса с подрезанными рабочими колесами в условиях электростанции практически невозможно. Поэтому к снижению давления насоса подрезкой колес надо подходить с особой осторожностью.

8. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА РАЗНОТИПНЫХ ПЭН С ОТЛИЧАЮЩИМИСЯ НАПОРНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Нередко при поэтапном расширении ТЭС на ней оказываются установленными ПЭН различного типа с отличающимися напорными характеристиками. Из сопоставления характеристик десятиступенчатых насосов ПЭ-580-185-2 и ПЭ-500-180-4 (см.рис.3) следует, что параллельная работа двух таких насосов возможна в диапазоне подачи насоса ПЭ-580, имеющего более высоконапорную характеристику, от 560 до 400 т/ч. При подаче 400 т/ч (точка *а* на рис.3) давление на стороне нагнетания насоса ПЭ-580 достигает 21 МПа (210 кгс/см^2) и включенный параллельно насос ПЭ-500 переходит в режим рециркуляции, так как при давлении в напорном коллекторе 21 МПа (210 кгс/см^2) закрывается обратный клапан на напорной стороне этого насоса (точка *б*). Однако при относительно большом количестве параллельно работающих насосов ПЭ-580 и ПЭ-500 и в режимах с давлением в напорном коллекторе значительно ниже предель-

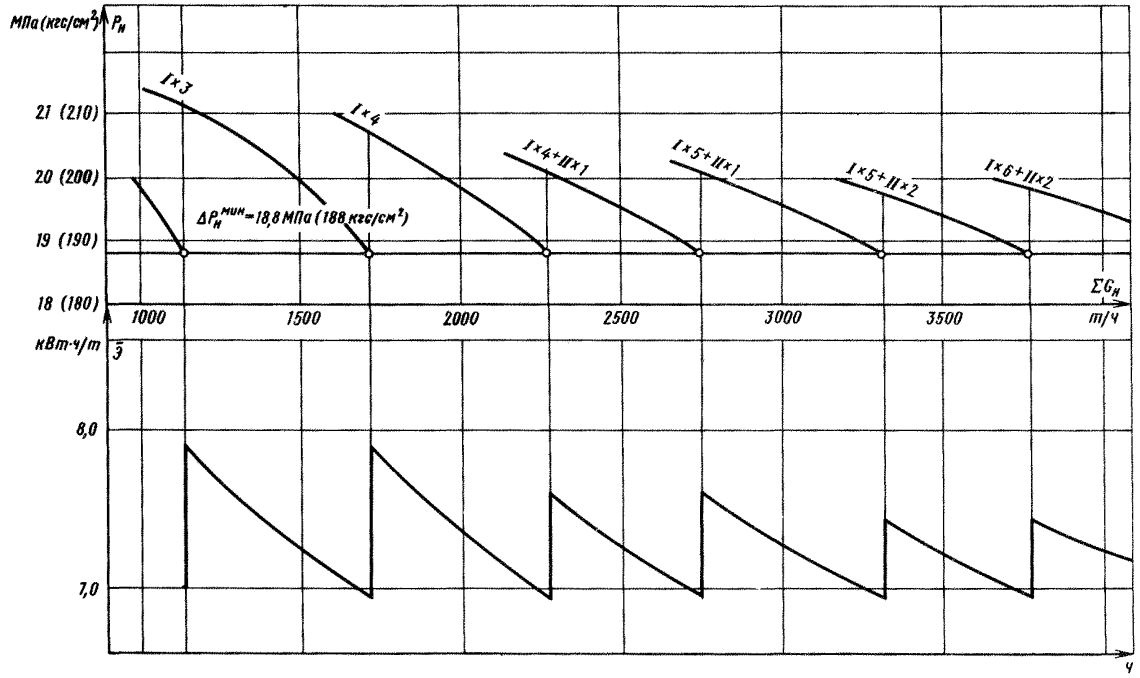

Рис.8. График режимов работы насосов ПЭ-580-185-2 (I) параллельно с насосами ПЭ-500-180-4 (II)

ного - 21 МПа (210 кгс/см^2) - параллельная работа этих разнотипных насосов не вызовет осложнений, что в общем подтверждается и существующей практикой эксплуатации.

Например, в режиме работы четырех насосов ПЭ-580 и одного насоса ПЭ-500 (кривая 3 на рис.8) при давлении в напорном коллекторе около 19,5 МПа (195 кгс/см^2) подача насоса ПЭ-580 составит 524 т/ч (см.рис.3), а насоса ПЭ-500 - 408 т/ч, т.е. режимы насосов оказываются практически в рабочих зонах эксплуатации. При давлении в напорном коллекторе 18,8 МПа (188 кгс/см^2) подача насоса ПЭ-580 составит около 580 т/ч, а насоса ПЭ-500 - 470 т/ч. Из этого примера следует, что путем построения графика режимов параллельной работы ПЭН различных типов можно установить тот диапазон нагрузки ТЭС по расходу питательной воды, в котором возможна эффективная параллельная работа разнотипных насосов.

В верхней части графика рис.8 определены значения избыточных перепадов давлений на РПК, особенно значительных в зоне подключения в параллельную работу очередного насоса. На рабочем графике представлена также потеря экономичности эксплуатации насосов, связанная с неоптимальными режимами работы насосов, т.е. при значительных избыточных перепадах давлений на РПК.

В нижней части графика показаны характеризующие экономичность эксплуатации ПЭН значения удельных расходов электроэнергии на 1 т перекачиваемой воды. При малом количестве работающих ПЭН значения удельных расходов электроэнергии находятся в пределах от 6,96 до 7,90 кВт · ч/т, а при относительно большом числе насосов (7-8) удельный расход электроэнергии снижается и не превышает при переходе на следующий насос 7,44 кВт · ч/т. При этом, как показали расчеты, изменение последовательности подключения насосов ПЭ-580 и ПЭ-500 несущественно (не более чем на 0,1 кВт·ч/т) влияет на удельный расход электроэнергии; тем не менее при сравнительно равномерном расположении насосов того и другого типа по длине фронта котельной целесообразно прежде вводить в работу насосы большей производительности, т.е. насосы ПЭ-580, а уже затем включать насосы ПЭ-500.

Проведенные расчеты показали также, что применение близких по номинальной подаче ПЭН при различных комбинациях их включения в параллельную работу не дает сколь-либо ощутимого выигрыша в снижении срабатываемого на РПК избыточного перепада давлений.

9. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЙ НА РПК ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАСОСА С МЕНЬШЕЙ НОМИНАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ

Основными для рассматриваемых ТЭС являются питательные насосы ПЭ-500 и ПЭ-580; прототипом насоса с частичной подачей является выпускаемый заводом "Южгидромаш" питательный насос секционного типа ПЭ-250-180-3, допускающий, по разрешению завода-изготовителя, максимальную подачу до 290 т/ч; характеристика этого насоса представлена на рис. 4. На рис.9 приведен в качестве примера график режимов работы десятиступенчатых питательных насосов ПЭ-500 в комбинации с насосом половинной подачи ПЭ-250-180-3. График построен с целью выявления возможного снижения перепада давлений на РПК в интервалах между оптимальными режимами, а также для оценки выигрыша в экономичности эксплуатации ПЭН. Построение производилось указанным в разд. 3 способом.

Наиболее эффективным с точки зрения уменьшения избыточных перепадов давлений на РПК является график, по которому насос ПЭ-250-180-3 включается при общем росте нагрузки ТЭС каждый раз, когда при параллельно работающих насосах ПЭ-500 давление в напорном коллекторе снижается до значения $P_н^{мин}$ [в данном примере до 18,8 МПа (188 кгс/см^2)].

Ломаная кривая 1-1'-2-2'-3-3'... давления в напорном коллекторе при параллельной работе только насосов ПЭ-500 (см.рис.9) показывает, что в переходных режимах от одного насоса ПЭ-500 на следующий избыточный перепад давлений на РПК (сверх заложенного в значение $P_н^{мин}$ запаса для работы при режиме с открывшимися ПК) достигает в зависимости от количества находящихся в работе насосов от 1,4 до 0,9 МПа (от 14 до 9 кгс/см^2). При включении же на соответствующих промежуточных интервалах по расходу питательной воды насоса ПЭ-250-180-3 линия давления в напорном коллекторе проходит ниже (штрихпунктир) и избыточный перепад давлений на РПК составляет уже от 1,0 до 0,5 МПа (от 10 до 5 кгс/см^2). Рассмотренное мероприятие, позволяющее несколько уменьшить перепады давлений на РПК, требует установки одного (двух) насосов ПЭ-250, что связано для действующих электростанций со значительными трудностями компоновочного характера.

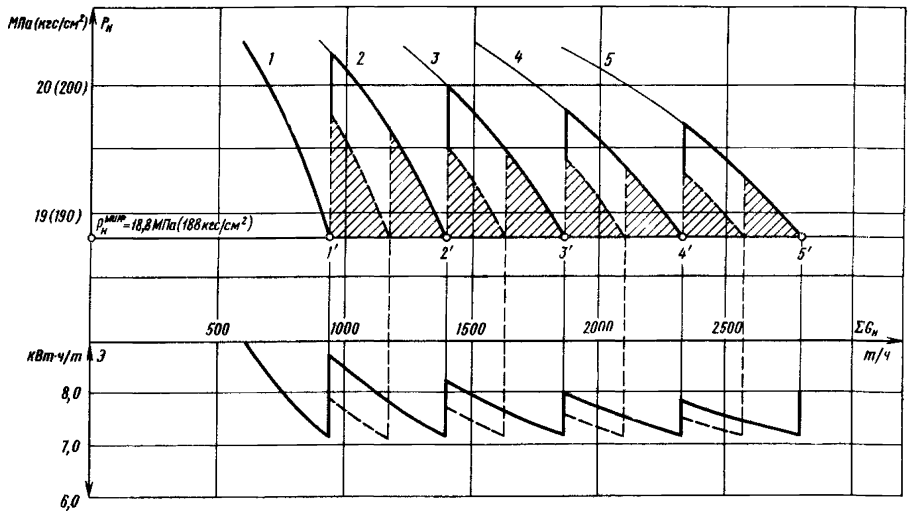

Рис.9. График режимов работы насосов ПЭ-500 с десятью ступенями (———) при использовании в параллельной работе насоса ПЭ-250-180-3 (- - -):

I-5 - режимы работы с количеством включенных насосов 2-6 соответственно

Из рис. 9 также видно, что использование насоса ПЭ-250 позволяет в определенных интервалах по расходу питательной воды на ТЭС получить экономию электроэнергии на питательные насосы от 0,7 кВт • ч/т при трех работающих насосах ПЭ-500 ($\Sigma G_н$ = 940 + 1170 т/ч) до 0,3 кВт • ч/т при шести работающих насосах ПЭ-500 ($\Sigma G_н$ = 2330 + 2570 т/ч). Установка дополнительного насоса ПЭ-250 особенно эффективна при небольшом количестве установленных на электростанции ПЭН. Сложность реализации этого мероприятия связана с трудностью размещения дополнительного насоса.

IO. УМЕНЬШЕНИЕ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЙ НА РПК ПРИ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ГРУППЫ ПЭН С ОПТИМАЛЬНЫМ ЧИСЛОМ СТУПЕНЕЙ И НАСОСА С ОДНОЙ УДАЛЕННОЙ СТУПЕНЬЮ

Для уменьшения перепада давлений на РПК может быть использован один из питательных насосов с уменьшенным на одну числом ступеней по сравнению с остальной группой ПЭН. Такое мероприятие реализуется подключением в определенных интервалах нагрузки ТЭС по питательной воде параллельно к работающим ПЭН насоса, имеющего сниженную в соответствии со снятой одной ступенью напорную характеристику. Это означает, что при принятом значении минимально допустимого давления в напорном коллекторе [например, $P_н^{мин}$ = I8,8 МПа (I88 кгс/см^2)] подача этого насоса будет меньше подач насосов с полным числом ступеней.

Для примера составления такого режимного графика с целью оценки эффективности этого мероприятия приняты насосы ПЭ-580 с десятью ступенями, максимальная подача которых при давлении $P_н^{мин}$ = I8,8 МПа (I88 кгс/см^2) составляет 570 т/ч (несколько больше максимальной 560 т/ч), а подача девятиступенчатого насоса ПЭ-580 составляет 426 т/ч (характеристики этих насосов см. на рис.3).

На рис.IO представлен рассчитанный по этим данным график режимов работы ПЭН. Сплошная ломаная линия показывает весьма значительные избыточные перепады давлений на РПК, связанные с крутизной напорных характеристик насосов ПЭ-580, постепенно уменьшающиеся по мере увеличения количества параллельно работающих

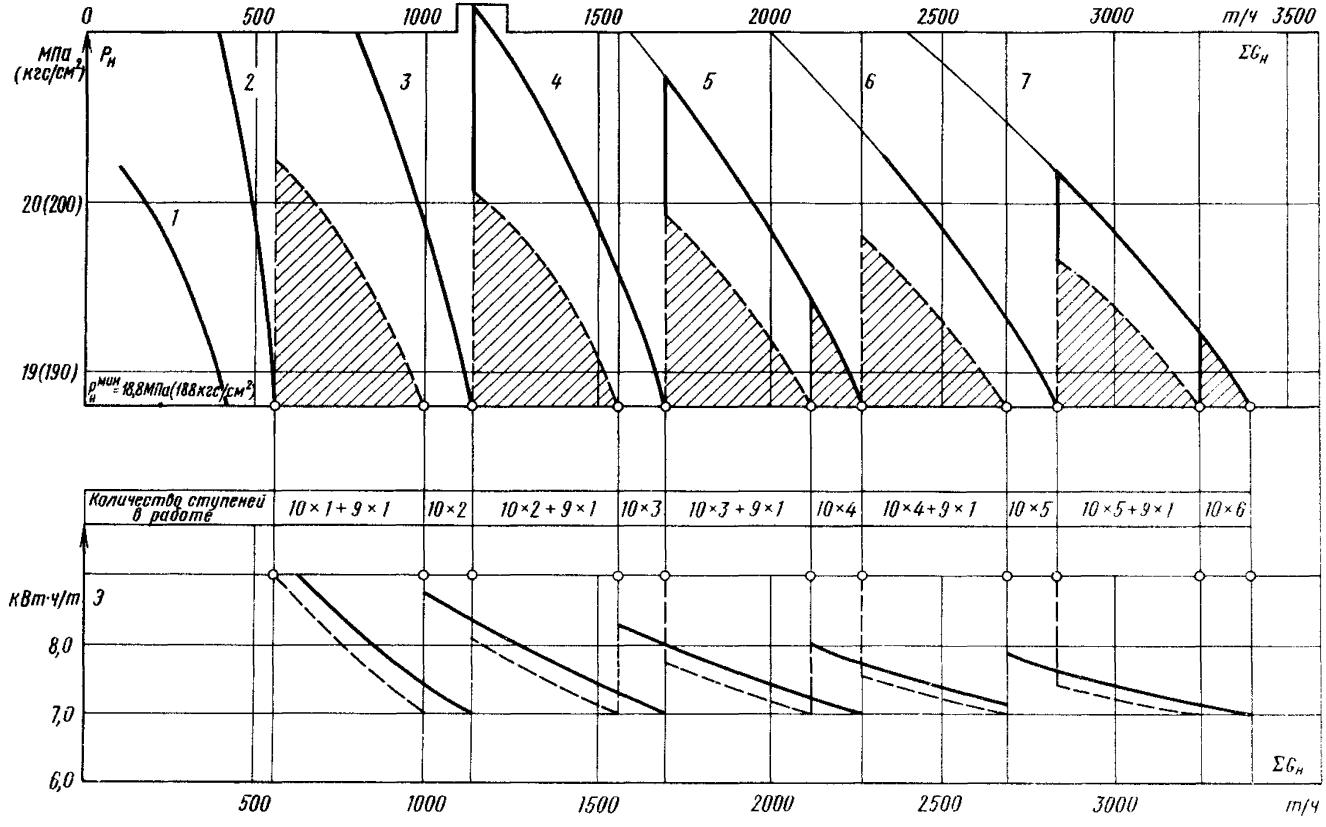

Рис.IO. График режимов работы насосов ПЭ-580 с десятью ступенями (———) при использовании в параллельной работе насоса ПЭ-580 с девятью ступенями (– – – –).
Число ступеней в работе:

I – 9; 2 – IO; 3 – IOx2; 4 – IOx3; 5 – IOx4; 6 – IOx5; 7 – IOx6

насосов (от 2,3 МПа (23 кгс/см^2) - при включении третьего насоса до I,6 МПа (I6 кгс/см^2) - при включении шестого насоса). Подключение в параллельную работу девятиступенчатого насоса ПЭ-580 (штрихпунктирная кривая) уменьшает избыточные перепады давлений на РПК в диапазоне между оптимальными точками режимов эксплуатации ПЭН. Если при давлении, например, в напорном коллекторе $p_н^{мин}$ = I8,8 МПа (I88 кгс/см^2), при увеличении нагрузки электростанции вместо третьего десятиступенчатого насоса ПЭ-580 подключить девятиступенчатый насос, перепад на РПК будет на I,I МПа (II кгс/см^2) меньше; при работе пяти десятиступенчатых насосов ПЭ-580 подключение в качестве следующего девятиступенчатого насоса снизит перепад давлений на РПК уже только примерно на 0,6 МПа (6 кгс/см^2).

Как видно из графика, при использовании девятиступенчатого насоса избыточные перепады на РПК даже при относительно большом количестве параллельно работающих насосов все же остаются еще значительными (заштрихованные площади над прямой $p_н^{мин}$) и достигают при расходе питательной воды, например 3000 т/ч значения 0,6 МПа (6 кгс/см^2); в какой-то степени это объясняется крутизной напорной характеристики насосов ПЭ-580, хотя в целом высокие избыточные перепады давлений на РПК являются неизбежной спецификой эксплуатации ПЭН с постоянной частотой вращения.

Выигрыш в экономичности оказывается не столь значителен. Так, при работе трех десятиступенчатых насосов использование девятиступенчатого насоса позволяет уменьшить расход электроэнергии на перекачку I т питательной воды на 0,25 кВт·ч/т, при работе пяти десятиступенчатых насосов уже только около 0,I5 кВт·ч/т (см.рис.I0).

Из рис.I0 также следует, что интервалы по расходу питательной воды, когда в работе находятся только насосы ПЭ-580 с десятью ступенями, весьма малы (около I40 т/ч), что при резких колебаниях нагрузки на ТЭС приведет к необходимости частых переходов с одного насоса на другой и усложнит эксплуатацию группы ПЭН.

При относительно стабильной нагрузке данное мероприятие может оказаться целесообразным.

II. СУММАРНАЯ ПОДАЧА ПЭН ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РЕКОНСТРУКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ ПЕРЕПАДОВ ДАВЛЕНИЙ НА РПК

Требования к суммарной подаче ПЭН для электростанций с поперечными связями сформулированы в п. 7.2.I "Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов" (М.: "Недра", I97I) и в нормах технологического проектирования тепловых электрических станций. Требования по резервированию подачи насосов при номинальной паропроизводительности всех установленных на ТЭС котлов, приведенные в этих документах, не привязаны к экстремальному режиму работы с открытыми ПК (см.разд.4) и поэтому вправе рассматриваться здесь для условий работы с номинальным давлением пара в барабане котла. Выполнение требований разд.4 по настройке оптимальных режимов насосов на работу с давлением $p_н^{мин}$, обеспечивающим питание котла при срабатывании ПК, предусматривает запас в открытии РПК и тем самым обеспечивает выполнение требований п. 7.2.I указанных Правил. Однако следует проводить проверку работы насосов при давлении в напорном коллекторе, отвечающем номинальному давлению в барабане котла, путем построения суммарной характеристики всех насосов (реконструированных для снижения перепада давлений на РПК и нереконструированных).

I2. ПРИМЕНЕНИЕ ВЫДАННЫХ РЕКОМЕНДАЦИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПОПЕРЕЧНЫМИ СВЯЗЯМИ НА ДАВЛЕНИЕ 9 МПа (90 кгс/см^2)

Все сказанное выше для ПЭН электростанций на давление I3 МПа (I30 кгс/см^2) может быть использовано и для разработки мероприятий для электростанций на давление 9 МПа (90 кгс/см^2). Однако в связи с тем, что насос половинной подачи ПЭ-I50-I45 заводом "Южгидромаш" в настоящее время уже не выпускается, для уменьшения перепадов давлений на РПК в промежуточных между оптимальными режимах может применяться только комбинация параллельной работы насосов с насосом со снятой дополнительно одной ступенью (см.разд.I0). На рис.II приведены основные характеристики насоса ПЭ-270-I50-3,а в приложении 2 - рекомендуемый заводом

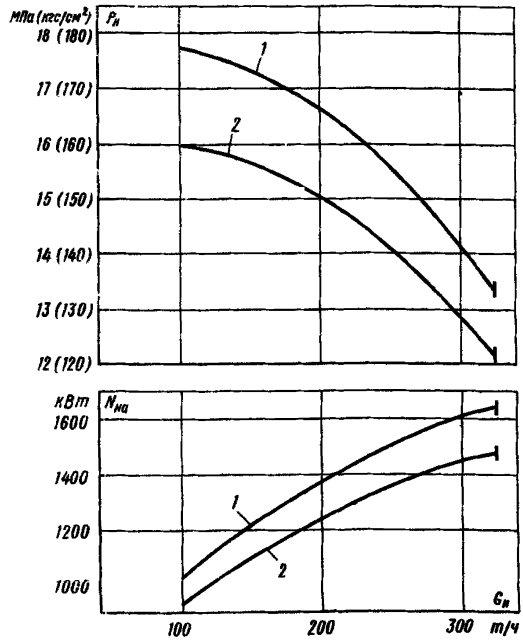

Рис. II. Основные характеристики ПЭ-270-150-3:
I - десять ступеней; 2 - девять ступеней
Условия: $P_{вс}$ = 0,8 МПа (8 кгс/см^2);
$t_{вс}$ = 158,1°С; $\gamma'_{ср}$ = 906 кг/м^3; n = 2985 об/мин

"Южгидромаш" способ реконструкции насоса со снятием одной или двух ступеней. При построении графиков параллельной работы ПЭ-270-150-3 следует иметь в виду, что завод согласовал возможность эксплуатации насоса в диапазоне подач до 326 т/ч.

I3. ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ ПРОВЕРКА СООТВЕТСТВИЯ ФАКТИЧЕСКИХ НАПОРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИПОВЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ПЭН

При отсутствии на электростанции фактических характеристик ПЭН график режимов работы рекомендуется строить на основании "Типовых энергетических характеристик питательных электронасосов" (М.: СПО Союзтехэнерго, 1981). Однако, если имеются сомнения в соответствии фактических характеристик насосов типовым, может быть произведена эксплуатационная проверка напорных характеристик при параллельной работе нескольких насосов на ТЭС.

Наиболее просто такая проверка проводится, когда в работе находятся однотипные насосы. При установившемся режиме оборудования ТЭС по проверенным эксплуатационным расходомерам определяется суммарная подача работающих питательных насосов ΣG_H, а проверенными манометрами измеряется давление в выходном патрубке каждого насоса P_H; затем подсчитывается среднеарифметическое значение давления P_H^{cp}. По графику режимов работы, построенному на основании типовых энергетических характеристик, определяется давление в напорном коллекторе P_H^T, соответствующее измеренному расходу воды ΣG_H (точка I на рис.I2). Если фактическое измеренное давление P_H^{cp} оказывается ниже P_H^T (точка I'), это означает, что средняя напорная характеристика проходит ниже типовой напорной характеристики. При проверке может оказаться также, что измеренное среднее давление P_H^{cp} будет больше P_H^{cp}; такая ситуация возможна, если в работе находится большее количество насосов (точки 2' и 2 на рис.I2). В этом случае проверку надлежит провести при другом суммарном расходе питательной воды ΣG_H, т.е. при одинаковом количестве работающих насосов. Положение новой средней точки давления P_H^{cp} на типовой характеристике определяется подачей $\Sigma G_H/n$, где n - количество работающих насосов при проведении проверки. Для получения действи-

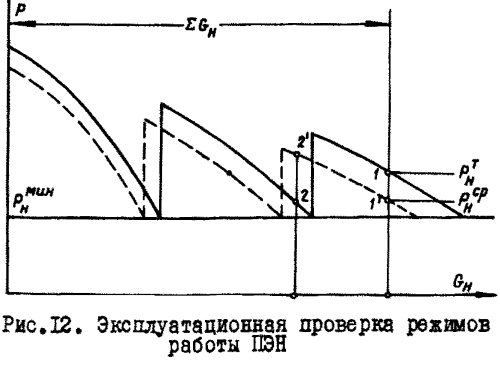

Рис.I2. Эксплуатационная проверка режимов работы ПЭН

тельной средней напорной характеристики питательных насосов ТЭС допустимо провести ее эквидистантно типовой на расстоянии $\Delta P_н = P_н^т - P_н^{ср}$; с помощью этой характеристики может быть уточнен график режимов эксплуатации ПЭН, если в результате проверки выявилась существенная разница в напоре [более 0,2-0,3 МПа (2-3 кгс/см^2)] .

По данным проверки можно получить и индивидуальные напорные характеристики ПЭН. Для этого при проведении проверки следует фиксировать также подачу $G_н$ каждого из работающих насосов по индикаторному расходомеру, подающему сигнал на открытие клапана на линии рециркуляции насоса, или силу тока электродвигателей насосов J . Распределив измеренный суммарный расход питательной воды $\Sigma G_н$ пропорционально полученному значению $G_н$ или J , можно с достаточной степенью достоверности определить подачу каждого из участвовавших в проверке ПЭН. Это позволит получить фактическую характеристику для каждого насоса индивидуально, поскольку известны для каждого насоса в одной точке давление в выходном патрубке и подача; напорная характеристика проводится для всего диапазона подач эквидистантно типовой напорной характеристике для данного типа насоса.

При параллельной работе разнотипных насосов проведение эксплуатационной проверки напорных характеристик также возможно, если использовать принцип распределения суммарной подачи насосов пропорционально подачам, измеренным расходомерными индикаторными

устройствами. Использовать для этой цели значения силы тока электродвигателей не рекомендуется из-за различных значений КПД электродвигателей.

При проведении проверки запись всех названных выше параметров следует делать по возможности одновременно в течение, например, получаса с интервалом в 5 мин и для каждой величины принять для расчета среднее значение.

I4. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО РЕАЛИЗАЦИИ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Разработка и проведение мероприятий по снижению перепадов давлений на РПК могут быть разделены на следующие основные этапы:

- определение минимально допустимого давления в напорном коллекторе ПЭН, при котором надежно обеспечивается питание котла при срабатывании ПК. Определять минимальное давление следует персоналу цехов наладки электростанций исходя из фактических характеристик оборудования, сопротивления тракта и других особенностей данной конкретной ТЭС. Предварительно необходимо организовать и произвести измерения давлений по отдельным участкам пароводяного тракта, оценить стабильность гидравлических сопротивлений или определить зависимость их от нагрузки и суммарного расхода питательной воды в диапазоне наиболее характерных для ТЭС режимов и принять на основании полученных данных некоторые средние значения, которые и должны лечь в основу расчета минимального давления в напорной магистрали и режимных графиков. Расчет минимального давления в напорном коллекторе ПЭН следует вести согласно разд. 4 для котла с наибольшим гидравлическим сопротивлением; такой выбор минимально допустимого давления обеспечит при срабатывании ПК надежное питание также и всех остальных котлов ТЭС;

- построение графиков параллельной работы установленных на электростанции ПЭН для определения избыточного давления в оптимальных точках работы насосов. График режимов параллельной работы насосов целесообразно строить в интервале нагрузок по расходу питательной воды, охватывающем все типичные для данной ТЭС режимы. В отсутствие на электростанции экспериментальных факти-

ческих характеристик ПЭН при построении режимных графиков можно использовать данные "Типовых энергетических характеристик питательных электронасосов ПЭ-720-185-2, ПЭ-580-200/185-2, ПЭ-500-180-4, ПЭ-380-200/185-2 и ПЭ-270-150-3" (М.: СПО Союзтехэнерго, 1981) и рис. 3;

- при выявлении на основании анализа построенных графиков значительного избыточного перепада давлений на РПК решение вопроса об удалении целой ступени (см.разд.6) или подрезке рабочих колес (см.разд.7); возможен случай проведения и того и другого мероприятия;

- в промежуточных режимах (в интервалах между оптимальными точками) построение графиков режимов работы ПЭН с применением насоса меньшей подачи (см.разд.9) или насоса с одной дополнительно снятой ступенью (см.разд.10). На основе анализа этих графиков и рассмотрения возможности установки дополнительного насоса принятие решения о выборе для реализации одного из рассмотренных дополнительных мероприятий;

- в соответствии с принятыми решениями разработка планаграфика последовательности проведения реконструктивных работ с использованием секционирования по схеме отдельных групп ПЭН, с учетом сроков проведения капитальных ремонтов котлов, турбоагрегатов и ПЭН.

ЧЕРТЕЖИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПИТАТЕЛЬНЫХ НАСОСОВ ПЭ-720, ПЭ-580, ПЭ-500, ПЭ-380 С УДАЛЕНИЕМ ИЗ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОДНОЙ ИЛИ ДВУХ СТУПЕНЕЙ

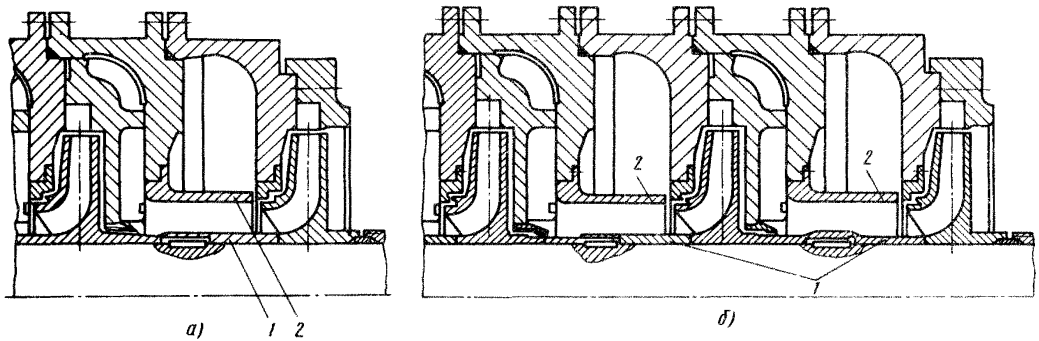

Рис. III.I. Порядок удаления ступеней в насосах ПЭ-720, ПЭ-580, ПЭ-500, ПЭ-380 (копия с чертежа ВНИИАЭН № I7.II7.000.000Б):

а – одной ступени; *б* – двух ступеней

I – втулка (см.рис.2П); 2 – гильза (рис.3П)

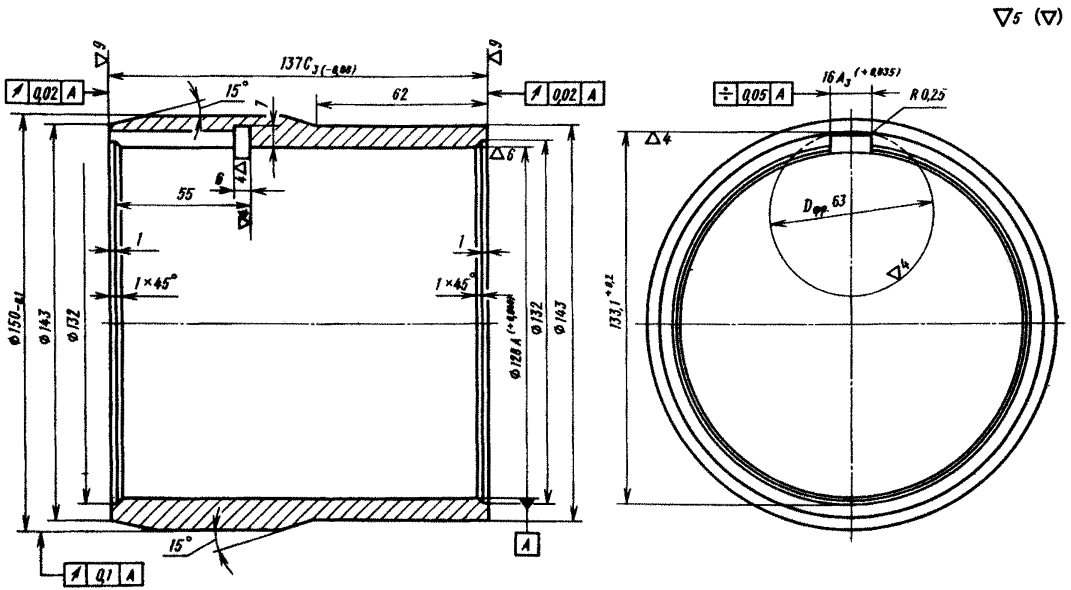

Рис.III.2. Втулка (копия с чертежа ВНИИАЭН № 806-I5.I50-0I)

П р и м е ч а н и е. Неуказанные предельные отклонения размеров: охватывающих - по A_7, охватываемых - по B_7, прочих $\pm \frac{I}{2}$ допуска 8 кл.

Материал: сталь 2Х13 ГОСТ 5949-6I. Масса 4 кг.

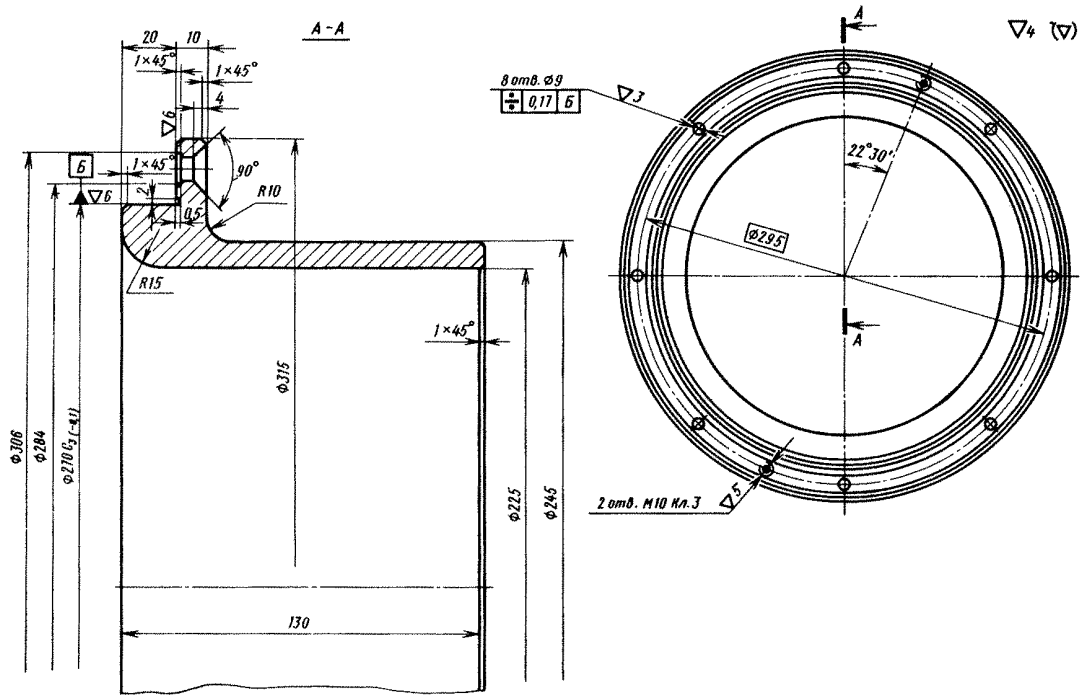

Рис.III.3. Гильза (копия с чертежа ВНИИАЭН № Н.I7.59.I04.I3)

Примечания: I. Отливка по модели черт. 806.I5.I06.I0. – 2. Неуказанные предельные отклонения размеров: охватывающих – по A_7, охватываемых – по B_7, прочих $\pm\frac{I}{2}$ допуска 8кл.

Материал: сталь 25Л-I ГОСТ 977-65. Масса I3,I кг.

ЧЕРТЕЖИ РЕКОНСТРУКЦИИ ПИТАТЕЛЬНОГО НАСОСА ПЭ-270-150 С УДАЛЕНИЕМ ИЗ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ОДНОЙ ИЛИ ДВУХ СТУПЕНЕЙ

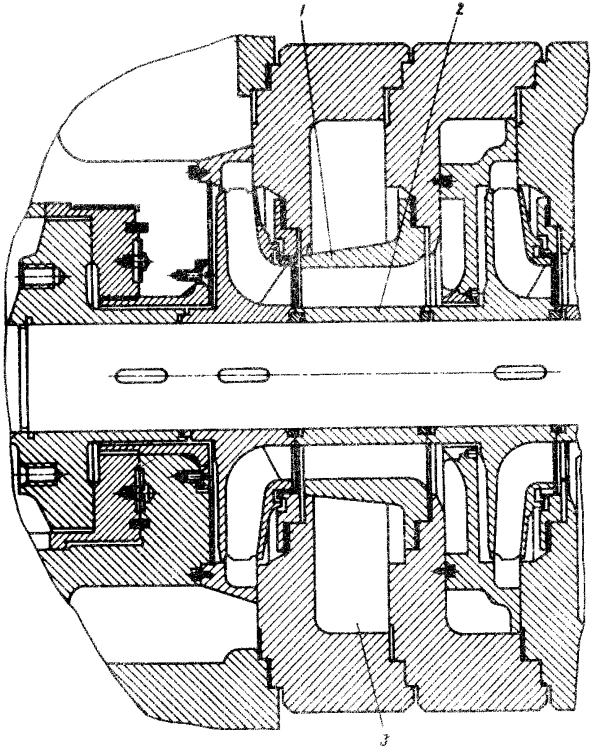

Рис.П2.I. Удаление из проточной части насоса ПЭ-270-150 одной ступени (копия с чертежа завода "Южгидромаш" № А2I-3264-МСБ):

I - направляющая втулка (рис.П2.2); 2 - дистанционная втулка (рис.П2.3); 3 - 9-я ступень

Примечание. Данный вариант исполнения насоса с девятью рабочими ступенями предусматривает установку одной дистанционной втулки 2 на вал насоса взамен I-го снятого рабочего колеса 9-й ступени и установку направляющей втулки I на место уплотнительного кольца в секции 8-й ступени насоса. При этом обязательна динамическая перебалансировка ротора насоса.

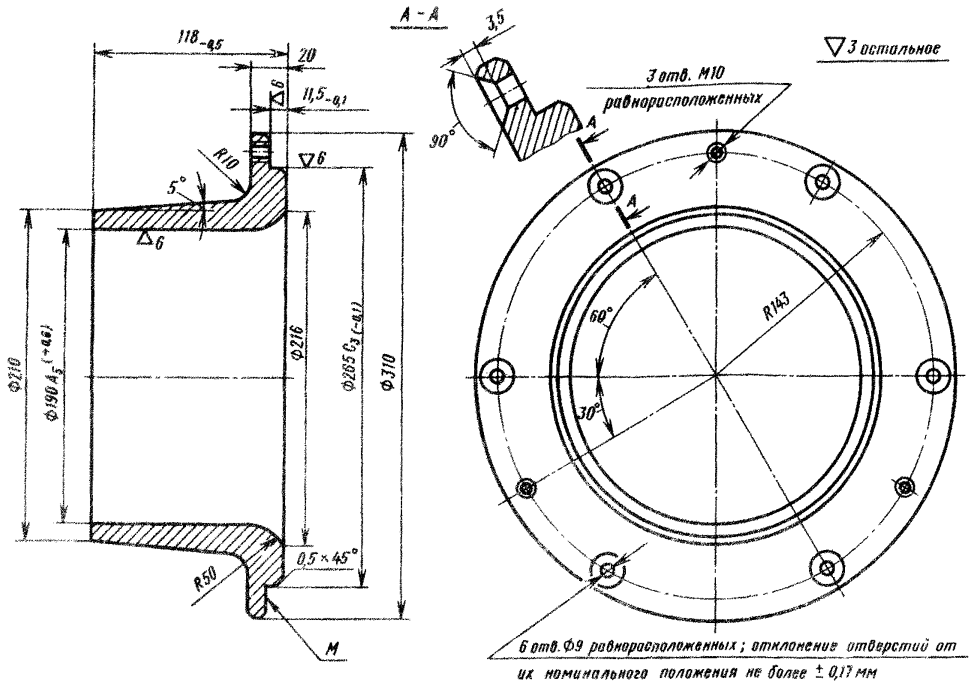

Рис.П2.2. Направляющая втулка насоса ПЭ-270-150 (копия с чертежа завода "Южгидромаш" № А2I-3263)

Примечания: I. Раковины, трещины и другие пороки литья не допускаются.-2. Биение торца М относительно поверхности диаметром 265 мм не более 0,I мм.-3. Размеры без допусков выполнять по 7-му классу точности ОСТ I0I0.-4. Острые кромки притупить фаской 0,5 х 45°. 5. Материал: сталь 2Х13Л ГОСТ 2I76-59.

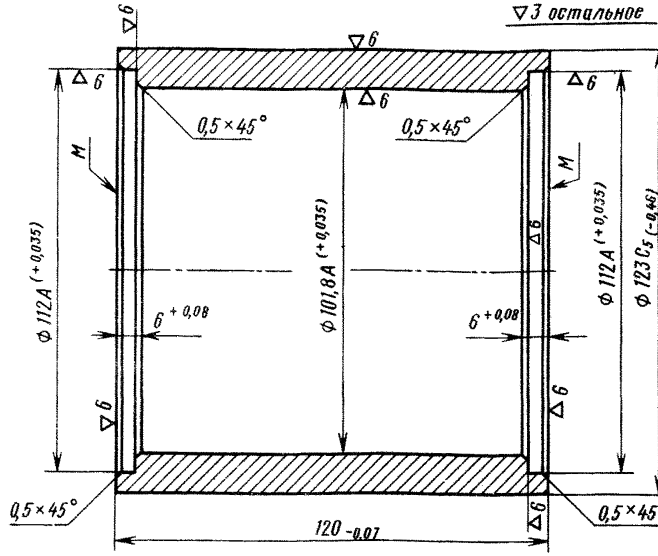

Рис.П2.3. Дистанционная втулка насоса ПЭ-270-150 (копия с чертежа завода "Пигидромаш" № А2I-2975)

Материал: сталь 2Х13 ГОСТ 5949-6I.

Примечания: I. Биение поверхностей диаметром II2 мм относительно поверхности диаметром I0I,8 мм не более 0,04 мм.
2. Неперпендикулярность торцов М относительно оси отверстия диаметром I0I,8 мм не более 0,0I мм.

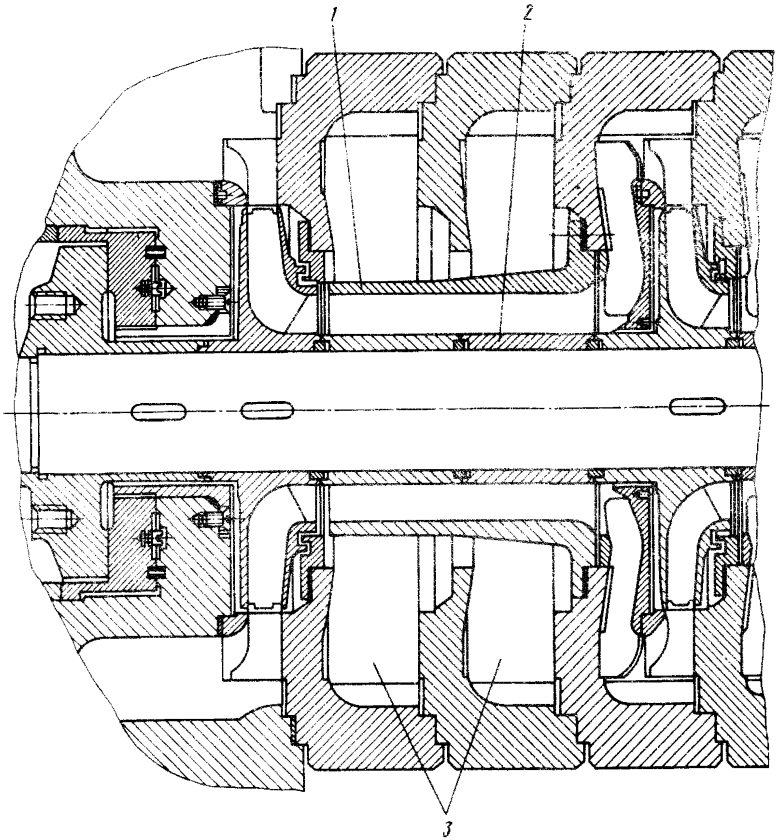

Рис.П2.4. Удаление из проточной части насоса ПЭ-270-150 двух ступеней (копия с чертежа завода "Ижгидромаш" № А21-2973):

I - направляющая втулка (рис.П2.5); 2 - дистанционная втулка (рис.П2.3); 3 - 8-я и 9-я ступени

Примечание. Данный вариант исполнения насоса ПЭ-270-150 с восемью рабочими ступенями предусматривает установку двух дистанционных втулок 2 на вал насоса взамен двух снятых рабочих колес 8-й и 9-й ступеней и установку направляющей втулки I на место уплотнительного кольца в секции 7-й ступени насоса. При этом обязательна динамическая перебалансировка ротора насоса.

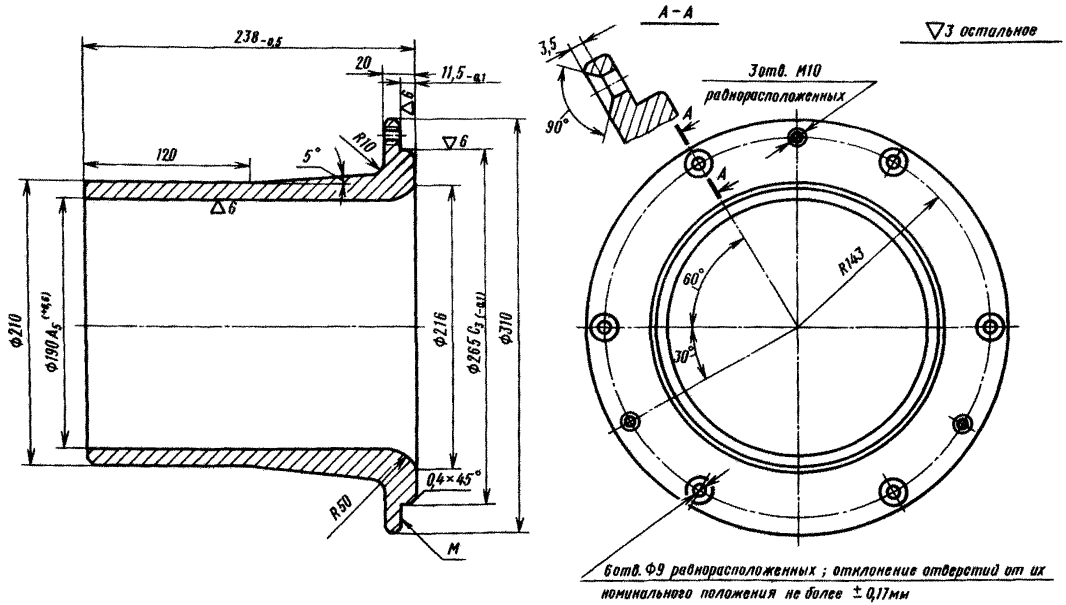

Рис. П2.5. Направляющая втулка насоса ПЭ-270-150 (копия с чертежа завода "Южгидромаш" № А2I-2974)

Материал: сталь 2Х13Л ГОСТ 2I76-57.

Примечания: I. Раковины, трещины и другие пороки литья не допускаются. 2. Биение торца М относительно поверхности диаметром 265 мм не более 0,I мм. 3. Свободные размеры выполнять по 5-му классу точности ОСТ I0I0. 4. Острые кромки притупить фаской 0,5х45°.

gost.e-ecolog.ru