

УДК 621.184.4

**Т. Г. СИНЦОВА**, инженер ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;  
**Н. Н. ТРИФОНОВ**, канд. техн. наук; зав. лаб. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;  
**В. Ф. ЕРМОЛОВ**, канд. техн. наук; зав. отд. ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия;  
**Ю. Г. СУХОРУКОВ**, канд. техн. наук; зам. ген. директора ОАО «НПО ЦКТИ»,  
Санкт-Петербург, Россия

## РАСЧЕТНОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ СМЕШИВАЮЩИХ ПНД ДЛЯ ТЭС И АЭС

ОАО «НПО ЦКТИ» разработало методику расчета системы смешивающих подогревателей низкого давления, включенных по гравитационной схеме, совместно с конденсатными электронасосами второй ступени. В статье представлены описание и результаты статических и динамических испытаний смешивающих подогревателей низкого давления энергоблока №4 Калининской АЭС. Сопоставление результатов расчета с опытными данными, полученными при испытаниях, показало их достаточно хорошее совпадение.

**Ключевые слова:** смешивающий подогреватель, сброс нагрузки, испытания, безопасность.

### Введение

Проблема эффективной и надёжной работы системы регенерации является одной из важнейших для обеспечения технических, экономических и эксплуатационных характеристик турбоустановок.

Наибольшее распространение получила регенеративная система конденсационных турбоустановок, включающая в себя 4–5 поверхностных подогревателей низкого давления (ПНД), деаэратор и 2–3 подогревателя высокого давления (ПВД), в теплофикационных турбоустановках – также сетевые подогреватели.

Одним из способов повышения эффективности работы турбоустановки является применение в системе регенерации низкого давления подогревателей смешивающего типа.

В настоящее время подогреватели смешивающего типа проектируются практически для всех крупных паровых турбин и предназначены для нагрева основного конденсата в системе регенерации турбины паром с давлением до 0,15 МПа.

### Анализ основных достижений и литературы

Смешивающие ПНД имеют целый ряд преимуществ в сравнении с поверхностными:

- практически отсутствует недогрев конденсата до температуры насыщения;
- отсутствие трубной системы удешевляет и упрощает ПНД;
- незначительная чувствительность к содержанию воздуха в греющем паре, что исключает тепловую перегрузку последующих ПНД;
- благодаря меньшей поверхности контакта металла с водой, а также деаэрации в них воды улучшается водно-химический режим энергоблоков.

При применении смешивающих ПНД требуется установка насоса после каждого по ходу воды подогревателя или их размещение на разных высотах для возможности использования самотечного перелива воды из подогревателя с меньшим давлением пара в подогреватель с большим давлением.

---

© Т.Г. Синцова, Н.Н. Трифонов, В.Ф. Ермолов, Ю.Г. Сухоруков, 2014

Оптимальной является комбинированная схема регенерации, в которой один или два первых по ходу воды ПНД смешивающие. При такой схеме обеспечивается стабильный нагрев воды практически до температуры насыщения греющего пара в первых ступенях подогрева, где обычно из-за присосов воздуха в поверхностных ПНД наблюдается недогрев воды, превышающий нормативный; надежная работа последующих ПНД без тепловой перегрузки; стабильное поддержание за смешивающим ПНД допускаемого нормами содержания кислорода в воде.

Наибольшее применение получила гравитационная схема. Это позволяет сократить количество перекачивающих насосов, однако требует применения специальных мер по обеспечению надежности работы системы регенерации.

Основным требованием при применении смешивающих ПНД является установка абсолютно надежных защитных устройств от попадания в турбину воды из подогревателя, которое возможно при затоплении и при сбросе с турбины нагрузки.

Практика показала, что затопление подогревателей водой наиболее надежно предотвращает безарматурная линия аварийного перелива с гидрозатвором, соединяющим подогреватель с конденсатором турбины [1].

В динамических режимах работы попадание воды в турбину возможно при резком снижении давления пара за счет набухания уровня воды в теплообменном аппарате в результате взрывного вскипания воды. В настоящее время на практике вынос в турбину пароводяной смеси вследствие взрывного вскипания исключается благодаря выбору достаточной высоты парового отсека, а также благодаря установке в подогревателе горизонтальной перегородки с водяными обратными клапанами [1].

Кроме того, конструкция подогревателя должна исключать возможность возникновения обратного потока пара, который был бы способен разогнать турбину выше допустимого значения. Это достигается установкой обратного парового клапана на трубопроводе отбора и выбором проходного сечения дыхательного патрубка на перегородке [2].

### **Цель исследования**

Наиболее опасными режимами является полный сброс нагрузки турбины до нуля, а также сброс до холостого хода или собственных нужд.

Во время сброса нагрузки турбины, когда резко снижается давление пара в аппарате, возможно вскипание основного конденсата во всасывающем трубопроводе и кавитационный срыв конденсатных электронасосов второй ступени (КЭН-2), откачивающих воду из смешивающего ПНД. Это недопустимо, так как с напорного коллектора КЭН-2 осуществляется подпитка исполнительных механизмов защитных устройств на паропроводах отбора и других потребителей основного конденсата.

Таким образом, для смешивающих ПНД важно уметь определять скорость изменения давления пара, влияющую на процессы, происходящие в аппарате, на всех режимах работы турбины.

### **Материалы исследования**

Скорость падения давления пара в смешивающем ПНД зависит от режима работы энергоблока и возникающем при этом соотношении расходов и энтальпии входящих и уходящих потоков. В данной работе приводится математическая модель и результаты расчета скорости падения давления пара для смешивающих ПНД.

При разработке математической модели приняты следующие допущения:

– скорость падения давления в отборе турбины не зависит от процесса,

происходящего в подогревателе;

- процесс в аппарате идет на линии насыщения при текущем давлении;
- давление во всех точках рассматриваемого объема подогревателя одинаково;
- из подогревателя в турбину истекает сухой насыщенный пар;
- параметры сухого насыщенного пара и кипящей воды целиком определяются давлением;
- скорость изменения температуры металла стен соответствует скорости изменения температуры насыщенного пара.

При указанных допущениях для смешивающего ПНД справедливы уравнения материального и энергетического балансов, при совместном решении которых получается выражение для скорости падения давления пара в аппарате

$$\frac{dP_{\Pi}}{d\tau} = \frac{\sum \left( \frac{r\rho''}{\rho' - \rho''} - (i'' - i_{\text{ВВХ}}) \right) G_{\text{В}} + \sum \left( \frac{r\rho'}{\rho' - \rho''} - (i'' - i_{\text{ПВХ}}) \right) G_{\Pi}}{V' \left( \rho' \frac{\partial i'}{\partial P_{\Pi}} + \frac{r\rho''}{\rho' - \rho''} \frac{\partial \rho'}{\partial P_{\Pi}} \right) + V'' \left( \rho'' \frac{\partial i''}{\partial P_{\Pi}} + \frac{r\rho'}{\rho' - \rho''} \frac{\partial \rho''}{\partial P_{\Pi}} \right) - V + c_m M_m \frac{\partial t''}{\partial P_{\Pi}}}, \quad (1)$$

где  $P_{\Pi}$  – давление пара в аппарате;  $r$  – удельная теплота парообразования;  $\rho'$ ,  $\rho''$  – плотность воды и пара на линии насыщения;  $i'$ ,  $i''$  – удельная энтальпия воды и пара на линии насыщения;  $i_{\text{ВВХ}}$ ,  $i_{\text{ПВХ}}$  – удельная энтальпия воды и пара на входе в подогреватель;  $G_{\text{В}}$ ,  $G_{\Pi}$  – расходы воды и пара, подводимые (отводимые) в смешивающий ПНД;  $V$ ,  $V'$ ,  $V''$  – объем подогревателя, воды и пара соответственно;  $c_m$  – удельная теплоемкость металла аппарата;  $M_m$  – масса металла, активно участвующего в процессе аккумуляции тепла;  $t''$  – температура пара на линии насыщения;  $\tau$  – время.

Как показала многолетняя практика эксплуатации смешивающих ПНД блоков 200, 300, 500, 800 и 1000 МВт режим сброса нагрузки полностью безопасен для турбины и не вызывает каких-либо осложнений, связанных с наличием этих подогревателей.

При сбросе нагрузки блока при отсутствии обратного парового клапана или его поломке пар вскипающего в подогревателе конденсата выходит в турбину, поэтому необходима его количественная оценка. В практике эксплуатации случаи поломки обратных клапанов были, но сбросы нагрузки блоков при этом к авариям не приводили.

Расход пара через трубопровод в турбину для случая отсутствия или отказа обратного парового клапана определяется по формуле [3]

$$G_{\Pi} = F\mu \sqrt{\frac{2k}{k-1} P_{\Pi} \rho'' \left[ \left( \frac{P_t}{P_{\Pi}} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_t}{P_{\Pi}} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (2)$$

где  $F$  – площадь проходного сечения паропровода;  $\mu$  – коэффициент расхода;  $k$  – показатель адиабаты;  $P_t$  – давление в отборе турбины.

Давления пара в камере отбора турбины определяется по выражению [4]

$$P_t = \frac{P_{t,0} - P_k}{\alpha_1 \tau^{\alpha_2} + 1} + P_k, \quad (3)$$

где  $P_{t,0}$  – давление в отборе турбины в статическом режиме;  $P_k$  – давление в конденсаторе;  $\alpha_1, \alpha_2$  – коэффициенты, определяемые экспериментально.

При падении давления в смешивающем ПНД должны исключаться вскипание воды в трубопроводе подвода её к насосам и кавитационный срыв насосов. Для этого допустимая скорость падения давления в трубопроводе должна быть не ниже скорости падения давления в подогревателе при аварийном сбросе нагрузки в любой момент времени

$$\frac{dP_{\Pi}}{d\tau} \leq \frac{dP_{tr}}{d\tau}, \quad (4)$$

где  $P_{tr}$  – давление в трубопроводе.

Максимально возможная скорость падения давления в подогревателе определяется по формуле (1).

Допустимая скорость падения в аппарате, при которой отсутствует парообразование в трубопроводе к насосу и кавитационный срыв насоса, определяется по формуле [5]

$$\frac{dP_{tr}}{d\tau} = \frac{\left( H - \frac{\Delta i_B}{\rho_B g \partial i_B / \partial P_{tr}} - \Delta h_t \right) \frac{W \rho_B g}{L} - \left( \frac{\lambda}{D} + \frac{\sum \xi}{L} + \frac{1}{L} \right) \frac{W^3 \rho_B}{2}}{1 + 4 \left( 1 + \frac{\delta}{D} \right) \frac{\delta}{D} \frac{\rho_m c_m}{\rho_B} \frac{\partial t_B / \partial P_{tr}}{\partial i_B / \partial P_{tr}}}, \quad (5)$$

где  $H$  – разность высот между уровнем воды в смешивающем ПНД и осью входного патрубка насоса;  $\Delta i_B$  – перегрев воды за счет ввода горячих потоков под уровень;  $\rho_B$  – плотность воды;  $g$  – ускорение свободного падения;  $i_B$  – удельная энтальпия воды;  $\Delta h_t$  – критический кавитационный запас насоса при номинальном расходе и температуре конденсата;  $W$  – скорость воды в отводящем трубопроводе;  $L$  – длина трубопровода;  $\lambda$  – коэффициент трения;  $D$  – диаметр трубопровода;  $\sum \xi$  – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления трубопровода;  $\delta$  – толщина стенки трубопровода;  $t_B$  – температура воды.

Равенство правых частей (1) и (5) для любого момента времени переходного процесса обеспечивает надежную откачку воды из подогревателя. Эти выражения связывают между собой режимные факторы, место включения подогревателя в схему, конструктивные решения по оборудованию и его компоновке.

Анализ переходного процесса при сбросе нагрузки производится путем построения графика падения давления в смешивающем ПНД и зеркального отображения графика увеличения давления сверх давления насыщения при движении воды по трубопроводу в зависимости от времени.

Возможность вскипания воды в трубопроводе или кавитационного срыва насоса определяется путём наложения графика увеличения давления воды в трубопроводе на график падения давления воды в аппарате в зависимости от времени. Если графики пересекаются, то происходит вскипание воды в трубопроводе или кавитационный срыв

насоса в момент времени, определяемый точкой пересечения графиков, спроектированной на ось ординат графика падения давления в подогревателе.

### Результаты исследования

ОАО «НПО ЦКТИ» выполнен расчетный анализ по разработанной методике системы смешивающих ПНД-1, 2, включенных по гравитационной схеме, совместно с КЭН-2.

Специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» были проведены статические и динамические испытания смешивающих ПНД-1, 2, включенных по гравитационной схеме, совместно с КЭН-2 турбоустановки К-1000-60/3000 энергоблока № 4 Калининской АЭС. Испытания проводились при участии работников Калининской АЭС в период освоения блока и его вывода на номинальную мощность. На рис. 1 представлена принципиальная схема турбоустановки.

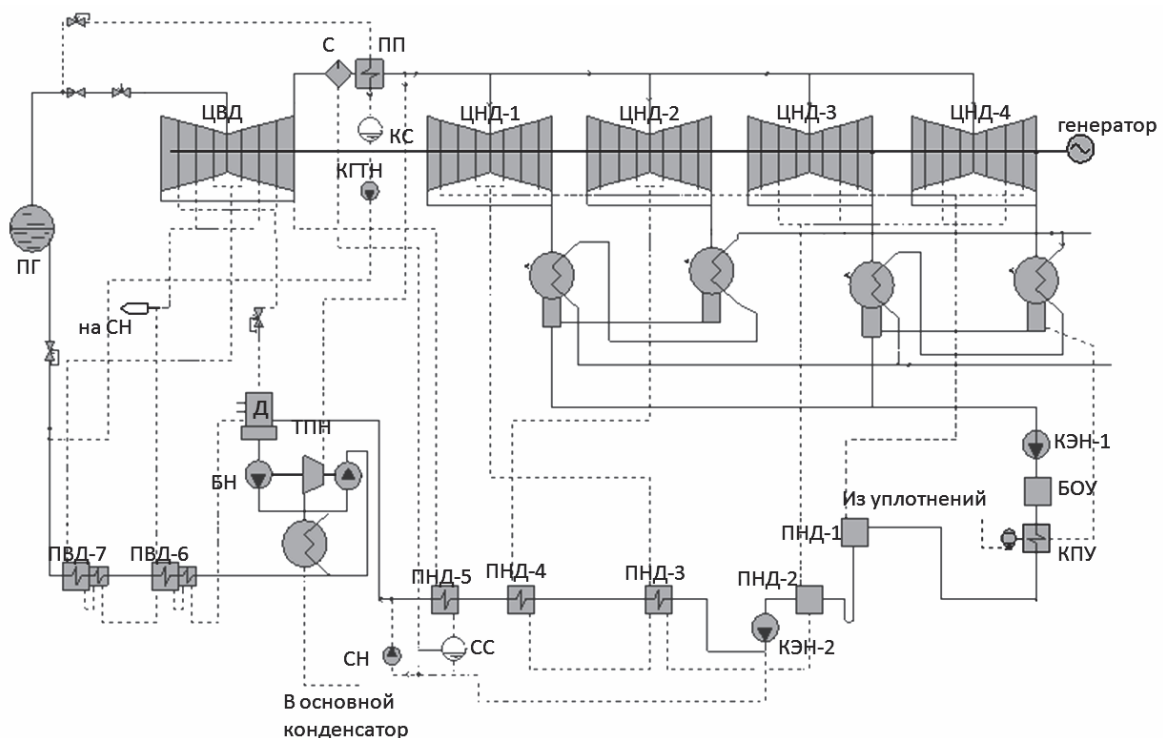


Рис. 1 – Принципиальная схема турбоустановки К-1000-60/3000 Калининской АЭС блок № 4:  
 ПГ – парогенератор; ЦВД – цилиндр высокого давления; С – сепаратор; ПП – пароперегреватель;  
 ЦНД – цилиндр низкого давления; КС – конденсатосборник; КГТН – конденсатные гидротурбонасосы;  
 ПВД – подогреватель высокого давления; ПНД – подогреватель низкого давления; Д – деаэратор;  
 БН – бустерные насосы; СН – сливные насосы; СС – сепаратосборник; КЭН – конденсатные  
 электронасосы; БОУ – блочная обессоливающая установка; КПУ – конденсатор пара уплотнений;  
 ТПН – турбопитательный насос

Целью испытаний являлось определение устойчивости отвода основного конденсата из смешивающих ПНД-1 и ПНД-2 совместно с КЭН-2 и конденсата греющего пара поверхностного ПНД-3 в ПНД-2 в условиях ряда стабильных и динамических режимов работы энергоблока и в аварийных ситуациях.

В качестве ПНД-1 (2 шт.) на блоке № 4 применены типовые аппараты, хорошо зарекомендовавшие себя в эксплуатации на Ровенской, Хмельницкой и Южно-Украинской АЭС.

ПНД-2 – новый аппарат, разработанный для условий работы на блоке № 4 Калининской АЭС, диаметром 3,6 м и длиной 13,6 м, разделенный перегородкой на отсеки нагрева и сбора конденсата, снабженный барботажным устройством для обеспечения деаэрации воды. ПНД-1, 2 включены по гравитационной схеме и снабжены безарматурными линиями аварийного отвода конденсата в конденсатор. Линия отвода из ПНД-1 во входной коллектор КЭН-2 обеспечивает отвод воды при увеличении разности давлений пара и захолаживание на всасе КЭН-2 при динамических режимах работы энергоблока.

Конденсат из конденсатора турбины откачивается КЭН-1 и подается на блочную обессоливающую установку (БОУ). К напорному коллектору КЭН-1 подключены потребители холодного конденсата. Основной поток конденсата после БОУ поступает в оба корпуса смешивающего ПНД-1, откуда самотеком сливается в смешивающий ПНД-2. В ПНД-2 поступают потоки конденсата греющего пара поверхностного ПНД-3, 4, а также паровоздушная смесь из ПНД-3 и сепаратосборника. Оба подогревателя имеют линии аварийного перелива воды через гидрозатворы в конденсатор. Кроме того, имеется переливная линия из ПНД-1 во входной коллектор КЭН-2. В смешивающем ПНД-2 установлены обратные паровые клапаны на патрубках подвода пара.

КЭН-2 забирают нагретую воду из ПНД-2 и через поверхностные ПНД-3, 4, 5 подают её в деаэратор повышенного давления. Часть воды подается из напорного коллектора КЭН-2 на собственные нужды энергоблока.

Основной задачей статических испытаний являлось определение эффективности смешивающих ПНД. Результаты испытаний показали, что в ПНД-1, 2 недогревы основного конденсата отсутствуют на всех режимах работы турбоустановки. Обеспечивается устойчивый отвод основного конденсата из ПНД-1 в ПНД-2 и к КЭН-2, а также отвод конденсата греющего пара ПНД-3 в ПНД-2.

Проведенные динамические испытания со сбросом нагрузки от 100 %  $N_{\text{ном}}$  до собственных нужд, холостого хода, 0 %  $N_{\text{ном}}$  и до 0 %  $N_{\text{ном}}$  с набором мощности до 70 %  $N_{\text{ном}}$  за 30 с показали следующее:

- давление пара в ПНД-1, 2 падает от номинального значения до давления в конденсаторе (рис. 2). В дальнейшем в виду поступления пара из парогенератора через БРУ-К в конденсатор давление пара увеличивается. При этом происходит уменьшение величины локального недогрева конденсата до температуры, соответствующей уменьшенному давлению во всасывающем трубопроводе КЭН-2;

- температура в паровом пространстве ПНД-1-1 и ПНД-1-2 снижается с 63 до 38 °С (рис. 3);

- температура основного конденсата после ПНД-2 снижается с 86 до 40 °С (рис. 3);

- температура конденсата греющего пара за ПНД-3 снижается с момента сброса нагрузки с 106 до 80 °С (рис. 3);

- при сбросе нагрузки со 100 %  $N_{\text{ном}}$  до 0 %  $N_{\text{ном}}$  произошел срыв насосов, вызванный потерей уровня в ПНД-2, вследствие неправильного подключения конденсационного бачка датчиков уровня в ПНД-1, а также пропуска воды при закрытом регулирующем клапане на напоре КЭН-2.

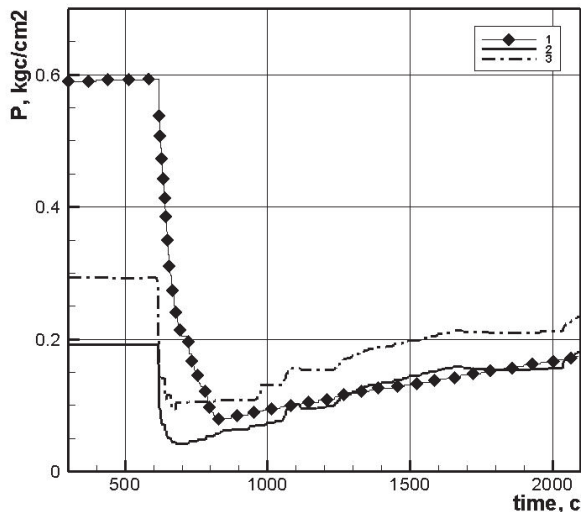


Рис. 2 – Мгновенный сброс нагрузки с 1000 МВт до нуля с поддержанием режима в течение 9 мин. Давление: 1 – пара в ПНД-2; 2 – пара в ПНД-1-1; 3 – пара в ПНД-1-2

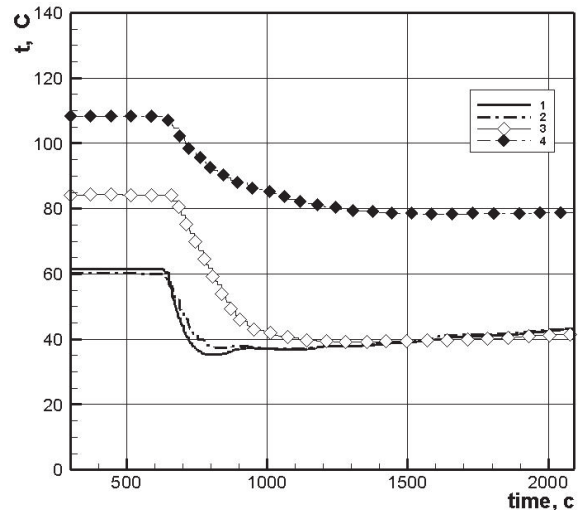


Рис. 3 – Мгновенный сброс нагрузки с 1000 МВт до нуля с поддержанием режима в течение 9 мин. температура: 1 – основного конденсата ПНД-1-1; 2 – основного конденсата ПНД-1-2; 3 – основного конденсата за ПНД-2; 4 – конденсата греющего пара за ПНД-3

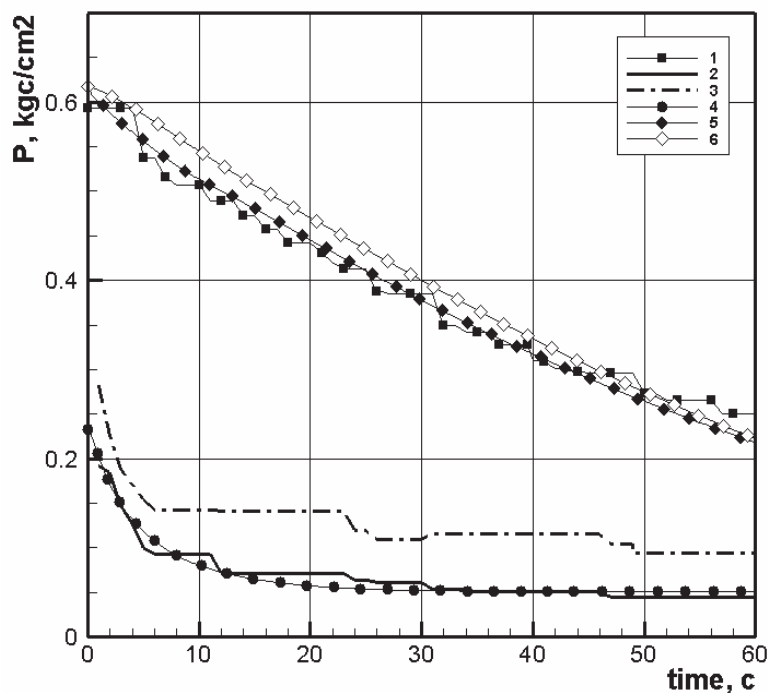


Рис. 4 – Мгновенный сброс нагрузки с 1000 МВт до нуля с поддержанием режима в течение 9 мин. Давление: 1 – опытное в ПНД-2; 2 – опытное в ПНД-1-1; 3 – опытное в ПНД-1-2; 4 – расчетное в ПНД-1; 5 – расчетное в ПНД-2, паровой отсек; 6 – расчетное в ПНД-2, водяной отсек

Имеется удовлетворительное совпадение расчетных и опытных данных для графиков падения давления в ПНД-1 и ПНД-2 (рис. 4).

Расчетом показано, что при уровне воды в ПНД-2 ниже номинального значения на 100 мм возможен кавитационный срыв КЭН-2 в режиме сброса нагрузки, и, следовательно, требуется четкое поддержание уровня в ПНД-2 при работающем блоке.

Расчетные исследования системы смешивающих ПНД-1, 2 совместно с КЭН-2 в

статических и динамических режимах позволили разработать технические решения по обеспечению устойчивой работы оборудования. Ряд рекомендаций не был реализован в проекте поскольку предложенные решения были рекомендованы после монтажа оборудования.

### **Выводы**

1) Многолетний опыт разработки, исследований и промышленной эксплуатации смешивающих ПНД подтвердили их бесспорные преимущества в сравнении с поверхностными аппаратами.

Однако необходимо достаточно полное решение проблемы обратного потока пара в турбину и опасности заброса воды в её проточную часть. Физическое отделение массы воды от парового пространства с полупропускным устройством, а также наличие аварийного перелива исключает попадание воды в турбину, замедляет поступление пара в проточную часть, снижает заброс оборотов ротора и уменьшает скорость падения давления в подогревателе. Это позволяет исключить кавитационный срыв насосов. Кроме того, рекомендуется установка обратного парового клапана, как средства снижающего обратный поток пара до безопасной величины в случае аварийной ситуации.

2) Разработана методика расчета системы смешивающих ПНД, включенных по гравитационной схеме, совместно с КЭН-2. Сопоставление результатов расчета с опытными данными, полученными при испытаниях на энергоблоке № 4 Калининской АЭС, показало их достаточно хорошее совпадение.

3) Анализ результатов испытаний показал, что в статических и динамических режимах работы энергоблока смешивающие ПНД обеспечивают проектные теплогидравлические характеристики.

4) Испытания подтвердили устойчивость отвода основного конденсата из ПНД-1 в ПНД-2 и к КЭН-2, а также отвода конденсата греющего пара ПНД-3 в ПНД-2 в статических и динамических режимах работы турбоустановки при проектном уровне воды в ПНД-2.

**Список литературы:** 1. Ермолов, В. Ф. Смешивающие подогреватели паровых турбин [Текст] / В. Ф. Ермолов, В. А. Пермяков, Г. И. Ефимочкин, В.Л. Вербицкий. – М.: Энергоиздат, 1982. – 208 с. 2. Ефимочкин, Г. И. Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок [Текст] / Г. И. Ефимочкин. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с. 3. Кириллов, П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) [Текст] / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с. 4. Сурис, П. Л. Предохранительные и обратные клапаны паротурбинных установок [Текст] / П. Л. Сурис. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с. 5. Трифонов, Н.Н. Модернизация схемно-компоновочных решений конденсатно-питательного тракта и его оборудования турбоустановок ТЭС и АЭС [Текст] / Н. Н. Трифонов, Е. В. Коваленко, И. В. Игнатъев, Ю. В. Шалкевич // Теплоэнергетика. – 2006. – № 2. – С. 31–33.

**Bibliography (transliterated):** 1. Ermolov, V. F., et al. *Smeshivajushhie podogrevateli parovyh turbin*. Moscow: Jenergoizdat, 1982. Print. 2. Efimochkin, G.I. *Bezdeajeratornye shemy paroturbinnyh ustanovok*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1989. Print. 3. Kirillov, P. L., Ju. S. Jur'ev and V. P. Bobkov. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (jadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)*. Moscow: Jenergoatomizdat, 1990. Print. 4. Suris, P. L. *Predohranitel'nye i obratnye klapany paroturbinnyh ustanovok*. Moscow: Jenergoizdat, 1982. Print. 5. Trifonov, N. N., et al. "Modernizacija shemno-komponovochnyh reshenij kondensatno-pitatel'nogo trakta i ego oborudovanija turboustanovok TJeS i AJeS." *Teplojenergetika* 2 (2006): 31–33. Print.

*Поступила (received) 17.02.2014*