

УДК 621.039

КРУГЛИКОВ П.А., ШЛЕМЕНЗОН К.Т., ШАБУН Я.Б.

ОАО “НПО ЦКТИ”, г. Санкт-Петербург, Россия

РАЗРАБОТКА НОВОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ МОЩНЫХ ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС

Наведено аналіз теплових схем, які використовують насоси з гідротурбінним приводом, що дає змогу одержати ряд термодинамічних, режимних та конструктивних переваг у порівнянні з іншими. Використання у схемах АЕС насосів з гідроприводом дає змогу надійно здійснювати транспорт високотемпературної рідини при мінімальних капітальних витратах та максимальній економічності.

Приведен анализ тепловых схем, использующих насосы с гидротурбинным приводом, позволяющих получать целый ряд термодинамических, режимных и конструктивных преимуществ по сравнению с иными решениями. Использование в схемах АЭС насосов с гидрприводом позволяет надежно осуществлять транспорт высокотемпературной жидкости при минимальных капитальных затратах и максимальной экономичности.

Analysis showed that the use of the pumps with the hydraulic turbine drive allowing to obtain the set of thermal dynamic, regime and design advantages compared with another solutions is the most promising one. The use of the pumps with the hydraulic turbine drive in the NPP schemes allows to realize the reliable transportation of the high pressure liquid at minimal capital investment and maximal efficiency.

α – суммарные отчисления от капиталовложений, включая норму дисконта;

ΔK – стоимость поставки и монтажа оборудования;

$\Delta \mathcal{E}$ – годовой доход от включения насоса в схему;

$\tau_{\text{ок}}$ – срок окупаемости;

КГП – конденсат греющего пара;

КГТН – конденсатный гидротурбинный насос;

ОД – охладитель дренажа;

ПВД – подогреватель высокого давления;

П – подогреватель;

ПП – промежуточный перегреватель.

При эксплуатации турбоустановок АЭС одной из проблем является транспорт жидкости, находящейся в условиях, близких к вскипанию. Решение этой задачи требует таких схемных решений, которые позволили бы максимально использовать теплоту высокотемпературных потоков, обеспечивая при этом “уход” от линии насыщения. Выполненный анализ тепловых схем показал, что перспективным является использование насосов с гидротурбинным приводом, позволяющее получать целый ряд термодинамических, режимных и конструктивных преимуществ по сравнению с иными решениями.

Внедрение на ряде энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000 указанных агрегатов для откачки конденсата греющего пара в системе промежуточной сепарации и перегрева пара в напорную линию питательных насосов турбоустановок является новой технологической операцией позволяющей повысить экономичность энергоблока с турбоустановкой К-1000-60/3000 на 0,7 %, т.е. повысить мощность блока на ~7 МВт. Разработана схема включения гид-

ротурбонасоса, показанная на рис.1. Конструктивные особенности агрегата позволили реализовать преимущества его использования по сравнению с насосным агрегатом с электроприводом.

Выполнено сопоставление различных схем использования конденсата греющего пара пароперегревателя и проанализирована t - Q диаграмма использования высокотемпературного потока – конденсата греющего пара пароперегревателя (рис.2).

Несомненными преимуществами обладает вариант закачки КГП в тракт питательной воды после ПВД с использованием насоса с гидротурбинным приводом, реализованный на турбоустановках К-1000/60-3000 (ОАО ЛМЗ). Подача КГП в тракт питательной воды обеспечивает заданное значение температуры питательной воды на входе в парогенератор при минимальном давлении отборного пара на последний ПВД с минимальными термодинамическими потерями от теплообмена при конечной разности температур. Снижение давления отбора пара на последний ПВД в варианте с насосной за-

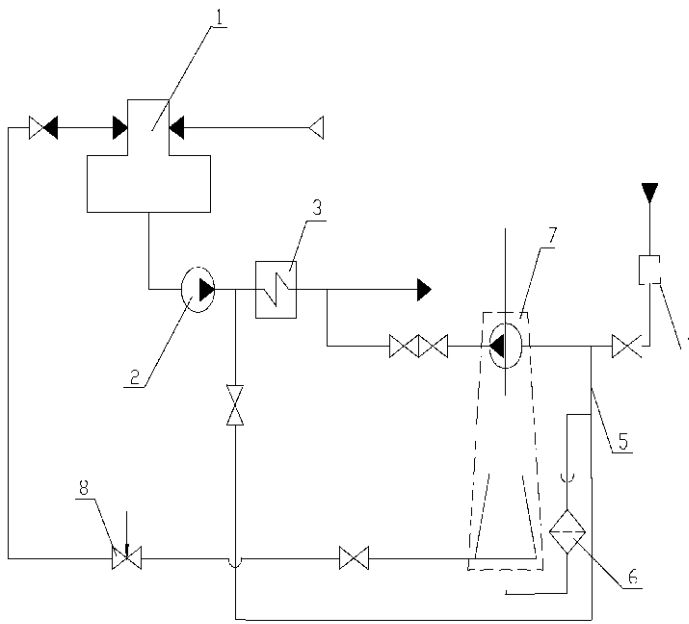


Рис. 1. Схема включения насоса КГТН:
 1 – деаэратор; 2 – питательный насос; 3 – ПВД;
 4 – конденсатосборник СПП; 5 – линия
 захлаживания; 6 – блок фильтров; 7 – турбонасос
 типа КГТН; 8 – регулирующий клапан.

качкой позволяет получить дополнительную выработку электроэнергии в турбогенераторе. Головной насос типа КГТН 850-400 находится в постоянной эксплуатации на Ровенской АЭС с 1987 г. За период работы отказов непосредственно турбонасоса не наблюдалось. Турбонасосы эксплуатировались в автоматическом режиме, обеспечивая поддержание заданного уровня в конденсатосборнике.

Максимальную эффективность насосная закачка дает в турбоустановках с одноступенча-

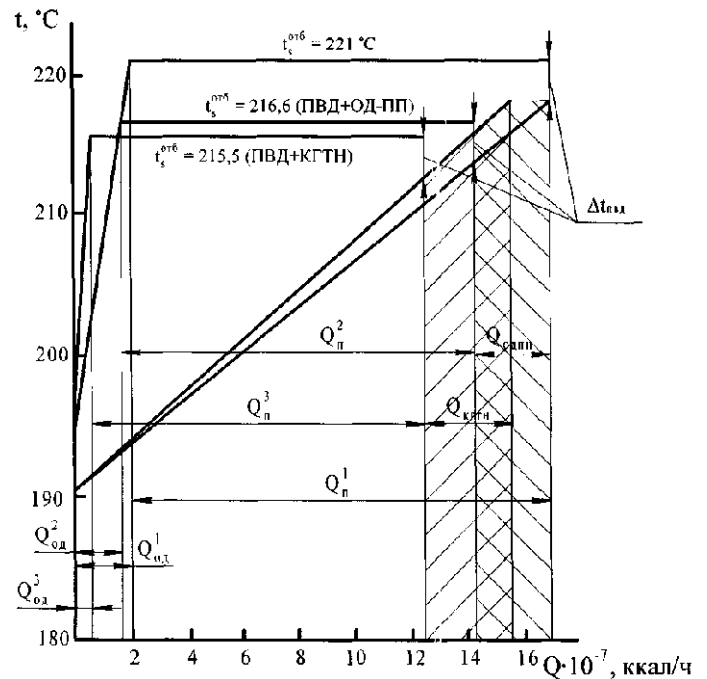


Рис.2. t-Q диаграмма использования теплоты КГП.
 Q_n – тепловая нагрузка подогревателя; Q_{od} – то же, охладителя дренажа; $Q_{od\ pp}$ – то же, охладителя дренажа промперегревателя; $Q_{кгтн}$ – количество теплоты, отдаваемой в цикл гидронасосом. Верхние индексы 1, 2, 3 означают: 1 – вариант без ОД ПП и КГТН; 2 – с ОД ПП; 3 – с КГТН.

тым промперегревом, однако определенные преимущества могут быть получены и в схемах с двухступенчатым промперегревом. Выигрыш в мощности для таких схем по сравнению с вариантом сброса КГП в ПВД-7 составляет ~1,8 МВт.

Табл. 1.

Наименование	Турбоустановка		
	ТК-450/500-60	К-750-65/3000	К-1000-60/3000
Обозначение	КГТН 400-400	КГТН 650-400	КГТН 850-400
Подача насоса, м ³ /ч	400	650	850
Напор насоса, м	385	440	400
Температура на входе в насос, °С	280	271	280
Давление на входе в насос, МПа	6,4	6,2	6,4
Расход воды на турбину (не более), м ³ /ч	335	570	700
Напор турбины (не более), м	720	730	730
Скорость вращения ротора на номинальном режиме, об/мин	4950	5500	5200

Табл. 2.

Рабочая среда	конденсат
Максимальные параметры среды до клапана:	
давление p , МПа	2,2
температура T , $^{\circ}C$	120
перепад давления Δp , МПа	1,5
расход G , т/ч	4300
Коэффициент пропускной способности k_v , $m^3/ч$	2250
Номинальный крутящий момент ЭИМ $M_{кр}$, Нм	1000
Минимальный регулируемый расход G , т/ч	200
Проход условный входного/выходного патрубка D_u , мм	500/700

В табл. 1 приведены характеристики реализованных или спроектированных применительно к турбоустановкам с различными типами реакторов турбонасосов типа КГТН.

Оценивая повышение мощности турбоустановки при введении насосной закачки и стоимость комплектной поставки гидротурбонасосов с учетом монтажа, можно рассчитать срок окупаемости и чистый дисконтированный доход, получаемый АЭС от внедрения рекомендуемого технического решения, по нижеприведенным формулам:

$$\tau_{ок} = - \frac{\ln\left(1 - \frac{\alpha \cdot \Delta K}{\Delta \mathcal{E}}\right)}{\ln(1 + \alpha)}, \quad (1)$$

$$D = \sum_{i=1}^{i=10} \Delta \mathcal{E} (1 + a)^i - \Delta K. \quad (2)$$

Для турбоустановок мощностью 1000 МВт с одноступенчатым промперегревом срок окупаемости не превышает 7 месяцев, а чистый дисконтированный доход за 10 лет достигает ~2 млн долл. США. Для турбин с двухступенчатым промперегревом срок окупаемости внедрения насосной закачки не превышает 2 лет, а чистый дисконтированный доход за 10 лет составит не менее 360 тыс. долл. США.

Таким образом, использование в схемах АЭС насосов с гидроприводом позволяет надежно осуществлять транспорт высокотемпературной жидкости при минимальных капитальных затратах и максимальной экономичности.

К числу комплектующего оборудования, разработанного и поставляемого НПО ЦКТИ на строящиеся в России и экспортируемые за рубеж энергоблоки, относится и типоразмерный ряд ре-

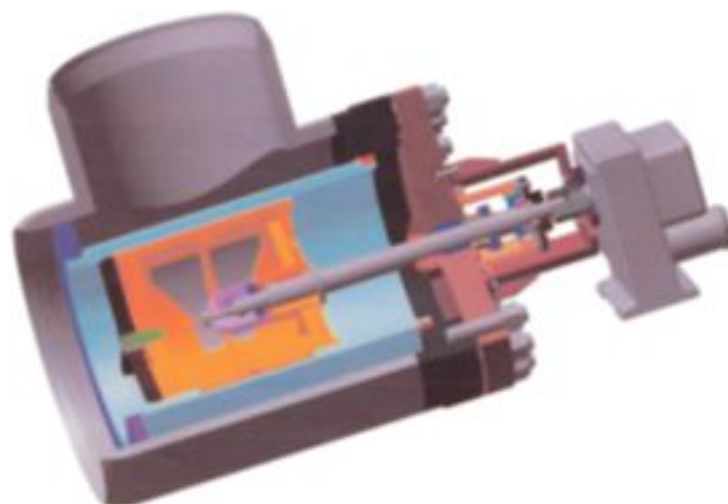


Рис. 3. Внутреннее устройство клапана Ду 500/700.

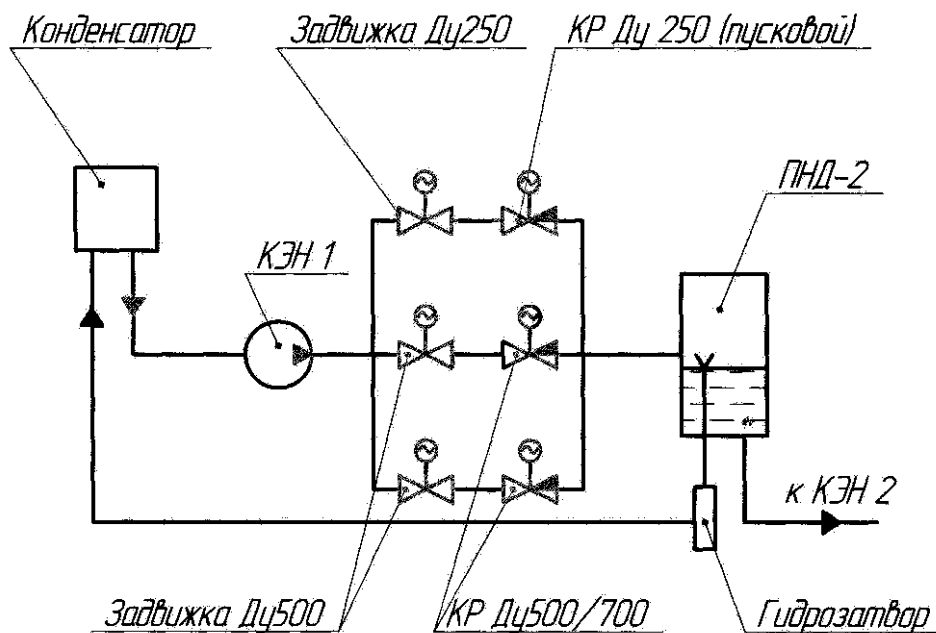


Рис.4. Фрагмент схемы конденсатного тракта блока 1000 МВт АЭС «Куданкулам».

гулирующих клапанов поворотного типа для регулирования уровня в смешивающих подогревателях и деаэраторе.

Необходимость создания таких клапанов была вызвана широким внедрением в начале 80-х годов прошлого века в схемах регенерации низкого давления мощных энергоблоков ТЭС и АЭС смешивающих подогревателей. Выпускавшиеся на тот период отечественной промышленностью регулирующие клапаны не отвечали целому ряду технических требований, предъявляемых мощными энергоблоками, в первую очередь атомными.

В 1983 г. первые опытные образцы созданных регулирующих клапанов были испытаны в НПО ЦКТИ на специально созданном стенде. С 1986 г. регулирующие клапаны поворотного типа Ду 700 запущены в производство и устанавливаются на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 (Ровенская, Хмельницкая и Южно-Украинская), где успешно эксплуатируются (рис.3). Указанные клапаны осуществляют регулирование уровня в теплообменном оборудовании “до себя” либо “за собой”. Основные технические характеристики клапана Ду500/700 представлены в табл. 2.

В настоящее время осуществлена поставка усовершенствованных регулирующих клапанов Ду 500/700 для энергоблоков мощностью 1000 МВт Калининской АЭС (ст. № 3), Тяньваньской АЭС

(КНР), осуществляется изготовление их для АЭС “Куданкулам” (Индия). Схема включения клапанов в конденсатный тракт представлена на рис.4.

Основные преимущества поставляемых клапанов поворотного типа по сравнению с конструкцией двухседельных клапанов Ду 500 следующие:

- расходная характеристика клапана близка к линейной в диапазоне от 4 до 100 % номинального расхода, при этом диапазон регулирования увеличен почти в 2 раза;
- пропускная способность в 1,5 раза выше;
- устойчивое регулирование уровней в конденсаторе, смешивающих ПНД и деаэраторе во всем диапазоне стационарных и переменных режимов работы энергоблока;
- нерегулируемые протечки не превышают 3 % номинальной производительности;
- конструкция сохраняет устойчивость при быстром нагреве – охлаждении (до 55 °С/мин), не подвергаясь опасности коробления;
- отработанность конструкции и технологии изготовления обеспечивает простоту и долговечность эксплуатации, высокую надежность работы (стабильность технических характеристик обеспечивается при сроке эксплуатации не менее 10 лет);

Выводы

1. Конструкция регулирующих клапанов НПО ЦКТИ защищена несколькими авторскими свидетельствами, а работы по внедрению на энергоблоках 800 МВт отмечены медалями ВДНХ и премией по машиностроению Совмина за 1990 г.

2. Указанные разработки насоса с гидротурбинным приводом и регулирующим клапаном смешивающих теплообменников в настоящее время получают дальнейшее развитие.

3. На основе апробированных, а также новых технологических и конструкторских решений по усовершенствованию и улучшению эксплуа-

тационных показателей оборудования, ведется проектирование указанных агрегатов для нового перспективного энергоблока с реактором ВВЭР-1500. Новый энергоблок, создаваемый на базе реакторов ВВЭР, должен сочетать в себе оптимальные характеристики, обеспечивающие его конкурентоспособность на базе повышенной безопасности и экономичности. Определенную роль в повышении его технико-экономических показателей будет играть применение технологического оборудования разработки НПО ЦКТИ.

Получено 03.10.2005 г.