

УДК 621.175.845.001.57

В.Л. ШВЕЦОВ, А.Н. УСС, В.М. ЧЕРНЕНКО, В.М. СЛЕСАРЕВА

*Открытое акционерное общество «Турбоатом»  
г. Харьков, e-mail: office@turboatom.com.ua*

### **МОДЕРНИЗАЦИЯ КОНДЕНСАТОРА Т.У. К-1000-60/1500 ПУТЕМ ЗАМЕНЫ МАТЕРИАЛА ОХЛАЖДАЮЩИХ ТРУБ**

Модернізація конденсатора спрямована на заміну охолоджуючих труб з мідно-нікелевого сплаву марки МНЖ 5-1 на охолоджуючі труби з корозійностійкої сталі марки 03X17H14M3 і кінцевих трубних дощок з вуглецевої сталі марки 20 на нержавіючу сталь марки 12X18H10T, що підвищує надійність, працездатність і збільшує термін служби конденсаторів.

The condenser modernization is aimed at substitution of cooling pipes made of copper-nickel alloy of МНЖ 5-1 grade for cooling pipes made of corrosion-resistant steel of 03X17H14M3 grade and end tube sheets made of carbon steel of 20 grade for stainless steel of 12X18H10T grade enhancing reliability, serviceability and extension of lifetime of condensers.

Тепломеханическое оборудование машинного зала является одной из важнейших составляющих для обеспечения безопасности, надёжности и экономичности энергоблоков АЭС. Поэтому к этому оборудованию предъявляются высокие требования, как к характеристикам, так и к конструкции.

Модернизация конструкции бокового конденсатора турбоустановки К-1000-60/1500 разработана на основе многолетнего опыта проектирования, изготовления и поставок конденсаторов различной мощности.

Основные технологические и теплотехнические параметры конденсатора т.у. К-1000-60/1500 определены на стадии конструкторских разработок, а также модернизации его отдельных элементов в процессе эксплуатации турбоустановок такого типа.

Принципиальные концепции при модернизации бокового конденсатора, его структурных технологических и эксплуатационных решений состоят в следующем:

- надёжность работы в стационарных, переменных и переходных режимах эксплуатации;
- высокая маневренность в широком диапазоне режимов эксплуатации турбоустановки;
- обеспечение расчетного значения давления отработавшего пара турбины в процессе ее эксплуатации;
- обеспечение вакуумной и водяной плотности конденсатора и требований, связанных с деаэрацией конденсата.

Повышенные требования к водяной плотности конденсаторов мощных паровых турбин АЭС привели к применению охлаждающих труб из материалов более стойких против эрозионных и коррозионных разрушений – высоколегированных нержавеющих сталей.

Разработка и освоение конденсаторов с трубными системами из нержавеющей стали для турбин мощностью 1000 МВт выполнялись в связи с особыми требованиями к химическому составу охлаждающей воды, ее качеству по содержанию, органическим, биологическим и другим отложениям, которые влияют на коррозионную

стойкость трубных систем конденсаторов, приводят к нарушению их водяной плотности и водно-химического режима.

На основании мировой практики и опыта эксплуатации мощных энергоблоков АЭС установлено, что в конденсаторах паровых турбин этих энергоблоков трубы из медно-никелевого сплава МНЖ5-1, в зависимости от химического состава охлаждающей воды, необходимо заменить на охлаждающие трубы из коррозионно-стойкой стали.

Для охлаждающей воды с содержанием солей до 3000 мг/л рекомендована для трубных систем конденсаторов коррозионно-стойкая сталь марки 03X17H14M3.

Оба конца охлаждающих труб развальцовываются в концевых трубных досках и привариваются к ним. Это позволяет повысить вакуумную и водяную плотность конденсатора, улучшает деаэрацию конденсата и увеличивает срок службы.

Конструкцией конденсатора предусмотрены трубы сортамента  $\text{Ø}28 \times 0,7$  и  $\text{Ø}28 \times 1,25$  мм, длиной 8970 мм. Трубы сортамента  $\text{Ø}28 \times 0,7$  и  $\text{Ø}28 \times 1,25$  мм с необходимыми техническими требованиями изготавливаются холодно-деформированными, бесшовными и удовлетворяют всем требованиям к качеству труб согласно техническим условиям на поставку. Основным преимуществом этого вида труб является высокая однородность, стабильность структуры, механических и коррозионных свойств металла по сечению и длине труб, что обеспечивается способом их производства.

Важным преимуществом также является то, что при холодной деформации (прокатке или волочении) имеются технологические средства, обеспечивающие достижение шероховатости поверхности на должном уровне.

Материалы, предназначенные для изготовления деталей и узлов модернизированного бокового конденсатора соответствуют всем требованиям стандартов, техническим условиям, проектно-конструкторской и технологической документации.

Полная сборка: корпусов, патрубков переходных и камер водяных, наборка, развальцовка и приварка охлаждающих труб в концевых трубных досках, а также приварка паровых щитов осуществляется на монтаже специализированной организацией под техническим руководством ОАО «Турбоатом».

Замена материала охлаждающих труб и концевых трубных досок преследует цель - уменьшения эрозионно-коррозионных процессов и повышения герметичности конденсатора, а с другой стороны, эта мера необходима ввиду износа оборудования и выработки ресурса.

При модернизации конденсатора т.у. К-1000-60/1500 использован опыт создания боковых конденсаторов турбин большой мощности, в процессе которого решались следующие проблемы:

- разработка нового вида компоновки трубного пучка с учетом бокового направления движения потока пара;
- обеспечение повышенной и надежной деаэрации конденсата при различных режимах в связи с особенностями боковых конденсаторов, имеющих «высокий» трубный пучок;
- создание наиболее благоприятных условий по водоснабжению, обеспечивающих максимальное снижение расходов на собственные нужды, с учетом большой разницы в высотных отметках верха и низа конденсатора.

Конструкция модернизированного конденсатора т.у. К-1000-60/1500 представлена на рис. 1 и рис. 2.

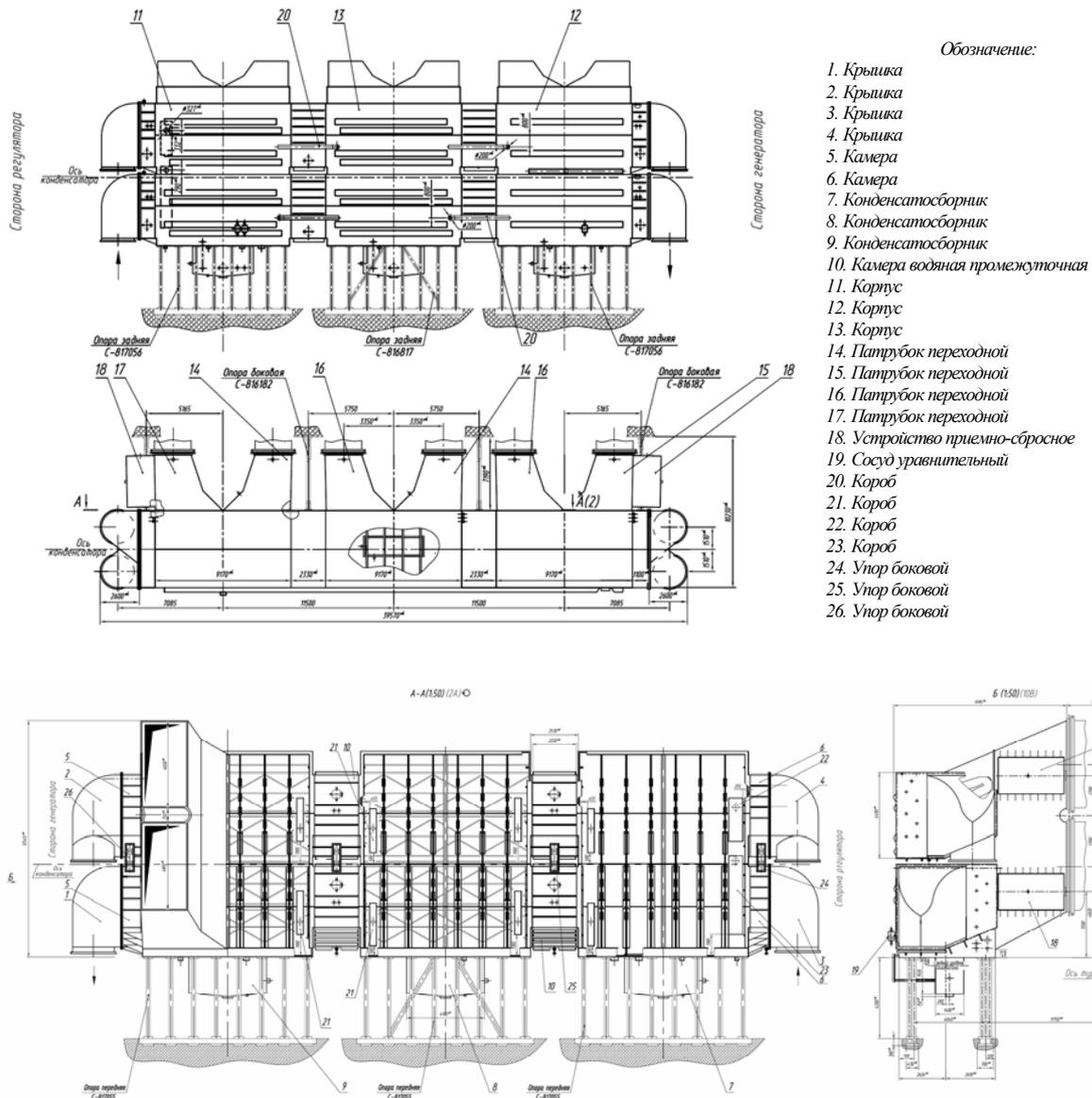


Рис. 1.

Отработавший пар из 3<sup>x</sup> ЦНД поступает в два боковых конденсатора, расположенных по обе стороны ЦНД. Конструктивно оба конденсатора являются 3<sup>x</sup> корпусными, одноходовыми, двухпоточными, последовательно включенными по охлаждающей воде.

Каждый из корпусов конденсаторов соединен с выхлопными патрубками турбины, переходными патрубками, имеющими общий выхлоп на стороне конденсатора.

Продольные размеры между выхлопами ЦНД и их размерами по высоте с учетом диффузорности переходных патрубков являются определяющими при выборе длины охлаждающих труб, а следовательно и размеров корпусов конденсатора.

Поскольку высота конденсатора однозначно определяется высотой выхлопных патрубков ЦНД, то ширина его определяется количеством охлаждающих труб, образующих расчетную поверхность охлаждения конденсатора.

Схема с боковым расположением модернизированных конденсаторов не накладывает ограничений, связанных с размещением их в проеме фундамента, что имеет место при подвальном расположении конденсаторов.

Компоновка трубного пучка выполнена в виде многократно свернутой ленты, но с учетом бокового, несколько наклонного к горизонтальной плоскости направления потока пара из ЦНД. По внешнему периметру ленты имеются достаточно глубокие и широкие проходы для пара, поэтому лента имеет сравнительно небольшую толщину.

Одним из важных факторов, гарантирующих эффективную работу любого теплообменного аппарата и, в частности, конденсатора, является непрерывное и надежное удаление неконденсирующихся газов со всех участков поверхности теплообмена.

При проектировании поверхности теплообмена, которая имеет сравнительно большую протяженность в вертикальном направлении, в каждом из корпусов конденсатора выделяются две зоны удаления воздуха, обслуживающие каждая свою половину основного трубного пучка. Эти зоны воздухоохладителей, в которых неконденсирующиеся газы движутся от внешней стенки конденсатора к центру трубных пучков, располагаются во внутренней части лент. При этом не увеличивается ширина корпусов конденсатора. Таким образом, в вертикальном направлении корпуса конденсатора разделены как бы на два «самостоятельных» конденсатора, имеющие идентичную компоновку трубного пучка.

По охлаждающей воде конденсаторы выполнены двухпоточными. Потoki располагаются друг над другом по вертикали, как бы в два яруса. Оба потока по компоновке трубного пучка и технологии изготовления одинаковы.

Разделение конденсатора в вертикальном направлении на два потока по охлаждающей воде позволяет применить насосы циркуляционной воды с меньшим напором для нижних половин конденсаторов и с большим напором для верхних половин. При этом каждый насос имеет подачу, равную половине суммарного расхода охлаждающей воды на оба конденсатора. В результате существенно снижаются затраты на собственные нужды энергоблока.

Отсос воздуха из воздухоохладителя, отделенного щитами от основного трубного пучка, осуществляется через каналы коробчатого типа, приваренные к щитам в верхней части. Далее через вырезы в стенке корпуса конденсатора воздух поступает в коллекторы, расположенные снаружи корпуса, которые одновременно являются его элементами жесткости.

Кроме создания равномерного отсоса неконденсирующихся газов по трубному пучку, для повышения эффективности поверхности охлаждения необходимо обеспечить равномерный отвод конденсата с промежуточных уровней по высоте трубного пучка, который для боковых конденсаторов имеет значительную высоту.

Применение конструктивно паровых щитов, расположенных во внутренних проходах трубного пучка, а также сливных труб, располагаемых под лентой пучка каждого парового прохода, обеспечивает отвод и слив конденсата по промежуточным доскам, чем предотвращается его переохлаждение, аэрация и уменьшается паровое сопротивление конденсатора.

Под охлаждающими трубами каждого потока в отсеках между трубными досками установлены водораспределительные дырчатые листы, на которые поступает образующийся в трубных пучках конденсат. Через отверстия диаметром 8,0 мм в водораспределительном щите конденсат сливается струями, значительно увеличивая тем самым деаэрирующую способность конденсатора.

Принятая для боковых конденсаторов система опирания обеспечивает возможные относительные температурные перемещения элементов узла «ЦНД – конденсатор».

Каждый ЦНД имеет с каждой стороны по четыре выхлопных патрубка прямоугольного сечения. При помощи четырех вставок с линзовыми компенсаторами с каждой стороны ЦНД со своим конденсатором соединен двумя переходными патрубками. Переходной патрубок на входе в конденсатор имеет прямоугольное сечение, высота которого соответствует высоте конденсатора, а ширина – половине его длины. При использовании диффузорной конструкции переходного патрубка снижается скорость входа пара в конденсатор и обеспечивается сравнительно равномерное распределение пара по входному сечению трубного пучка. Соединения переходных патрубков как с корпусами конденсатора, так и с промежуточными компенсирующими элементами ЦНД выполняются неразъемными на сварке.

При таком соединении ЦНД с корпусами конденсатора возникают боковые усилия, действующие на корпус конденсатора в сторону ЦНД и определяемые перепадом в 0,1 МПа и площадью его выхлопных патрубков. Усилия передаются на фундамент турбины гибкими боковыми опорами, устанавливаемыми по обе стороны трубного пучка между конденсатором и фундаментом турбины. Опоры выполнены из труб. Концы труб жестко крепятся с одной стороны к корпусу конденсатора у концевых трубных досок и специальным образом укрепленных водяных камер, а с другой – к закладным частям в фундаменте турбоагрегата. Нагрузка от конденсатора в рабочем состоянии воспринимается системой гибких стержней, расположенных вдоль конденсатора в два ряда под каждой промежуточной трубной доской. С наружной стороны конденсатора опора имеет один ряд стержней, с внутренней стороны (у переходного патрубка) – два ряда. Опоры жестко заделываются в элементы конструкции нижней плиты фундамента и привариваются к корпусам конденсатора.

Корпус каждого конденсатора состоит из 8<sup>ми</sup> частей (транспортабельных блоков), а каждый переходной патрубок из 2<sup>х</sup> частей, которые собираются на монтаже.

На боковых наружных вертикальных стенках крайних переходных патрубков установлены по два выносные приемно-сбросные устройства дросельно-охладительного типа, служащие для приема сбрасываемого в конденсатор после БРУ-К пара при частичных нагрузках турбины (пуск, останов, аварийный сброс нагрузки). Производительность приемно-сбросных устройств составляет около 60% расхода пара через стопорно-регулирующие блоки клапанов турбины.

К числу конструктивных мероприятий, с помощью которых может быть достигнута высокая герметичность, относятся, в первую очередь, применение охлаждающих труб и трубных досок из материалов, стойких против эрозионных и коррозионных воздействий со стороны охлаждающей воды и пара, предотвращение механических повреждений охлаждающих труб при их вибрации и повышение плотности крепления охлаждающих труб.

При выборе марки стали для охлаждающих труб исходили из многих показателей, в частности, тип водоснабжения, солесодержания воды, опыта

эксплуатации и другие. В зарубежной практике, например, при пресной воде рекомендуются марки сталей, содержащие высокое содержание хрома и никеля, в комбинации с молибденом и титаном, например, сталь TP316 или TP316L аналоги марки стали 03X17H14M3.

По рекомендации ГП НИТИ эта марка стали применяется в конструкции модернизированного конденсатора.

Тепловые и гидравлические расчеты модернизированного конденсатора т.у. К-1000-60/1500 выполнены в соответствии с «Руководящими указаниями по тепловому расчету поверхностных конденсаторов» /ВТИ/, для расчетных параметров по температуре и расходу охлаждающей воды, а также пара, с охлаждающими трубами из стали марки 03X17H14M3. При этом гидравлическое сопротивление конденсаторов при сохранении расчетного проектного расхода охлаждающей воды несколько уменьшается.

Концевые трубные доски изготавливаются из нержавеющей стали марки 12X18H10T. Оба конца охлаждающих труб развальцовываются в концевых трубных досках и привариваются к ним. Это позволяет обеспечить надежность, повышает работоспособность и предотвращает вынос частиц меди в конденсатно-питательный тракт турбоустановки, а также повышает водяную плотность и увеличивает срок службы конденсаторов.

Сравнительные расчетные характеристики конденсаторов до и после модернизации представлены в таблице 1, а эффективность модернизации представлена в таблице 2.

**Таблица 1.**

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Тип конденсатора:	
			К-45600 (до модернизации)	К-49200 (после модернизации)
1.	Расчетная поверхность охлаждения в корпусах конденсатора: - $F_1$ - $F_2$ - $F_3$	м <sup>2</sup>	12877	16400
			16366	16400
			16366	16400
2.	Длина охлаждающих труб	мм	8970	8970
3.	Сортамент охлаждающих труб	мм	Ø28×1 Ø28×2	Ø28×0,7 Ø28×1,25
4.	Количество охлаждающих труб в корпусах конденсатора: - $n_1$ - $n_2$ - $n_3$	шт.	16466	20928
			20928	20928
			20928	20928
5.	Материал охлаждающих труб		медно-никелевый сплав марки МНЖ 5-1	нержавеющая сталь марки 03X17H14M3
6.	Материал концевых трубных досок		углеродистая сталь марки Сталь 20	нержавеющая сталь марки 12X18H10T
7.	Крепление охлаждающих труб в концевых трубных досках		вальцовка	вальцовка и приварка
8.	Число ходов / потоков охлаждающей воды		1 / 2	1 / 2

**Продолжение таблицы 1**

№ п/п	Наименование	Един. измер.	Тип конденсатора:	
			К-45600 (до модернизации)	К-49200 (после модернизации)
9.	Расход конденсируемого пара	т/ч	562	562
10.	Расчетное давление пара в корпусах конденсатора: - $P_{к1}$ - $P_{к2}$ - $P_{к3}$	кгс/см <sup>2</sup>	0,03549 0,03657 0,04360	0,03075 0,03655 0,04356
11.	Среднее расчетное давление пара в конденсаторе	кгс/см <sup>2</sup>	0,0386	0,0369
12.	Расход охлаждающей воды в корпусах конденсатора: - $W_{охл1}$ - $W_{охл2}$ - $W_{охл3}$	т/ч	62914 79960 79960	79960 79960 79960
13.	Расчетная температура охлаждающей воды на входе в корпусах конденсатора: - $t_{охл1}$ - $t_{охл2}$ - $t_{охл3}$	°С	15,0 18,6 22,1	15,0 18,6 22,1
14.	Масса конденсатора, в т.ч.: - охлаждающих труб с учетом резервных	кг	1065500 420270	893800 282000

**Таблица 2.**

№ п/п	Расчетная температура охлаждающей воды на входе в первый корпус конденсатора, °С	Среднее значение давления пара существующего конденсатора, кгс/см <sup>2</sup>	Среднее значение давления пара модернизированного конденсатора, кгс/см <sup>2</sup>	Прирост электрической мощности турбоустановки при модернизированном конденсаторе, МВт
1.	$t_{охл1} = 15$ °С	0,0386	0,0369	0,10
2.	$t_{охл1} = 20$ °С	0,0497	0,0479	1,10
3.	$t_{охл1} = 25$ °С	0,0643	0,0621	1,90
4.	$t_{охл1} = 30$ °С	0,0831	0,0803	2,60
5.	$t_{охл1} = 35$ °С	0,107	0,102	3,20