

<sup>1</sup> А. Н. Усс,<sup>1</sup> С. Т. Пацюк,<sup>2</sup> А. В. Панченко,<sup>3</sup> А. В. Шавлаков,<sup>4</sup> Д. Х. Харлампиди, д-р техн. наук<sup>1</sup> ПАО «Турбоатом», г. Харьков, Украина,  
e-mail: [office@turboatom.com](mailto:office@turboatom.com))<sup>2</sup> ОП «Запорожская АЭС»<sup>3</sup> ГП НАЭК «Энергоатом»,  
г. Киев, Украина,e-mail: [energoatom@atom.gov.ua](mailto:energoatom@atom.gov.ua))<sup>4</sup> Институт проблем машиностроения  
им. А.Н. Подгорного НАН Украины,  
г. Харьков, Украина  
e-mail: [kharlampidi@ipmach.kharkov.ua](mailto:kharlampidi@ipmach.kharkov.ua)**Ключові слова:** конденсатор, охолоджуючі труби, парова турбіна, корозія.

УДК 662.769.21; 544-971; 54-19

**КОНДЕНСАТОР НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ «БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЙ» КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВКИ К-1000-60/1500-2 ЗАПОРОЖСКОЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ**

*Проведена модернізація конденсаторів турбоустановки К-1000-60 / 1500-2 ВП «Запорізька АЕС» на енергоблоці № 3, в результаті якої здійснено заміну трубних систем з охолоджуючими трубами з мідно-нікелевого сплаву і зовнішніми дошками з вуглецевої сталі на нові системи з охолоджуючими трубами і зовнішніми дошками з корозійностійкої сталі аустенітного класу. Запропонована «блочно-модульна» конструкція конденсатора нового покоління підвищує надійність, працездатність, безпеку і збільшує термін служби.*

**Введение**

Конденсационные устройства паротурбинных установок в значительной мере определяют надежную и экономичную работу энергоблоков АЭС. Особенно заметно влияние ухудшения работы конденсаторов на экономичность энергоблоков АЭС, где удельные расходы пара намного выше, чем на ТЭС. В некоторых случаях нарушения в работе конденсаторов приводят к вынужденному снижению электрической мощности энергоблока и ухудшению надежности, а также к существенной недовыработке электроэнергии.

ПАТ «Турбоатом» проведена модернизация конденсаторов турбоустановки К-1000-60/1500-2 ОП «Запорожская АЭС» на энергоблоке № 3. Предложенная «блочно-модульная» конструкция конденсатора нового поколения повышает надежность, работоспособность, безопасность и увеличивает срок службы. В созданной конструкции конденсатора использованы авторские разработки ПАО «Турбоатом» [1]. Конструкция конденсатора «блочно-модульного» исполнения, в частности, трубных систем не имеет аналогов в атомном турбостроении, является изобретением ПАО «Турбоатом» [2].

**Технологические аспекты модернизации конденсаторов АЭС**

Основной причиной, определяющей необходимость модернизации конденсаторов, является повреждение металла участков охлаждающих труб, вызванные эрозией - коррозией под воздействием турбулентного потока охлаждающей воды, насыщенной кислородом, а также с содержанием твердых частиц и других примесей, что приводит к нарушению водяной плотности трубных систем, выносу меди в цикл турбоустановки и, в конечном итоге, к потере электрической мощности турбоустановки, сокращению ресурса и ухудшению эксплуатационной надежности вспомогательного оборудования и парогенераторов, что, в конечном счете, резко ухудшает показатели работы АЭС.

Протечки образуются в местах соединений «труба-доска наружная» вследствие негерметичности труб, а также в связи с развитием водно-капельной эрозии и аммиачной коррозии со стороны прохождения пара.

На рис. 1 показаны дефекты трубных систем в период эксплуатации на конденсаторах АЭС.

Исключение из оборудования второго контура медьсодержащих материалов и достижение полного отсутствия протечек охлаждающей воды в паровое пространство конденсатора являются приоритетными и главными задачами для обеспечения надежной и безопасной работы оборудования турбоустановки и, в конечном итоге, улучшения показателей работы АЭС.

© А. Н. Усс, С. Т. Пацюк, А. В. Панченко, А. В. Шавлаков, Д. Х. Харлампиди, 2018



*Рис. 1. Дефекты трубных систем в период эксплуатации на конденсаторах АЭС*

По результатам обследования конденсаторов выявлено, что после длительной эксплуатации в конденсаторах турбин начинают проявляться дефекты, приводящие к присосам охлаждающей воды. Они начинают проявляться через определенное время, имеют тенденцию к постепенному росту и приводят к отклонениям водно-химического режима второго контура турбоустановки по концентрации «хлорид-ионов» в продувочной воде парогенераторов и концентрации «ионов натрия» в основном конденсате.

На основании анализа состояния трубных систем работающих конденсаторов и факторов, влияющих на их повреждаемость, можно сделать вывод, что наиболее вероятными причинами возникновения данного вида дефектов являются: коррозионное растрескивание металла в местах локального механического воздействия; развитие питтинго-язвенного дефекта или приложения нагрузок в местах вальцовочных соединений; механические повреждения труб. Среди основных причин также можно выделить протечки в трубах конденсатора в связи с развитием водно-капельной эрозии и аммиачной коррозии со стороны прохождения пара, развитие фосфатно-шламовой коррозии вследствие добавления фосфорных соединений в пароводяной контур, нарушение целостности полимерного антикоррозионного покрытия в местах вальцовки труб в трубной доске, развитие щелевой коррозии в зоне повреждения, усиливающейся созданием контактной электрохимической пары «медь-железо», эрозионно-коррозионные размывы на участках, не покрытых полимерным или другим видом покрытия.

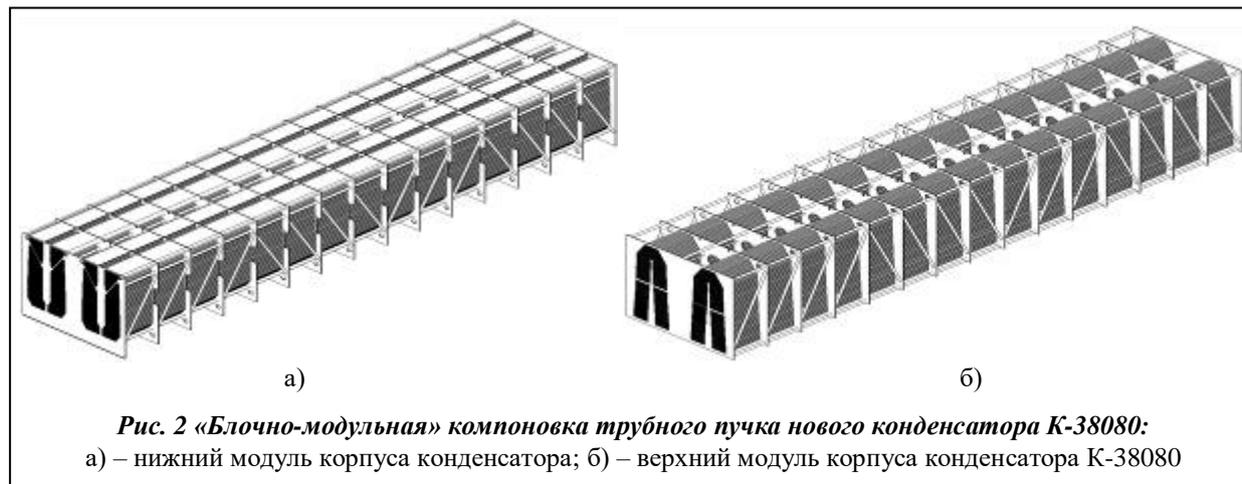
Таким образом, протечки охлаждающей воды в конденсаторах паровых турбин являются источником поступления в цикл турбоустановки коррозионно агрессивных примесей «хлорид-ионов» и «сульфат-ионов», которые вызывают коррозию металла вспомогательного оборудования турбоустановки, в частности, парогенераторов, что является весьма серьезной проблемой.

### **Цель и задачи модернизации конденсатора турбоустановки К-1000-60/1500-2**

Целью модернизации является разработка и установка конденсаторов «блочно-модульного» исполнения на существующий фундамент в машинном зале, с сохранением геометрических и компоновочных решений по машинному залу, получение эффекта от модернизации за счет углубления расчетного давления пара с последующим приростом электрической мощности турбоустановки на зажимах генератора.

Концепцию модернизации конструкции конденсатора можно сформулировать так:

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



### Конструктивные особенности конденсаторов нового поколения

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

В отличие от ранее применявшихся в конденсаторах паровых турбин ленточных компоновок трубных пучков [3], при разработке конструкции принята модульная компоновка (рис. 2), обладающая меньшими массогабаритными показателями и имеющая высокую теплотехническую эффективность. Применение такой компоновки позволяет проектировать конденсатор в блочном исполнении, что в итоге обеспечивает его более удобную транспортировку и монтаж в период капитального ремонта.

Конденсатор поверхностного типа, спроектирован двухходовым, двухпоточным по охлаждающей воде, конструктивно выполнен из корпуса, камер водяных, крышек, патрубков переходного с приемно-сбросными устройствами, конденсаторосборников, стержневых опор. Корпуса конденсатора состоят из шести модулей.

Критериями выбора количества модулей в корпусах конденсаторов являются: геометрические размеры торцевой площади трубных досок; суммарная поверхность теплообмена; количество труб; конфигурация трубного пучка с учетом кратности охлаждения; расчетные скорости в проходных сечениях в трубном пучке; места воздухоудаления и их присоединения; места сброса высокопотенциальных потоков пара; условия устойчивости; места установки на опоры стержневые фундамента. Все это в комплексе определило оптимальный выбор количества модулей в корпусах конденсаторов как для подвального, так и для бокового расположения в машинном зале.

Преимущество трубного пучка «модульного» типа заключается в существенном снижении коэффициента заполнения трубных досок до оптимальных величин ( $\eta = 0,25 - 0,26$ ), что улучшает доступ пара к охлаждающим трубам и интенсифицирует теплообменный процесс. Это позволяет в полной мере реализовать расчетные теплотехнические характеристики конденсатора на всех режимах эксплуатации.

Конструкция конденсатора с компоновкой трубного пучка «модульного» в сочетании с переходным патрубком позволяет равномерно распределить нагрузки на стержневые опоры фундамента, а также установить деаэрирующие устройства, что обеспечивает деаэрирующую способность конденсатора и снижает кислородную составляющую в конденсате. Корпус конденсатора «блочно-модульного» исполнения состоит из шести модулей, поставляемых в виде продольных «блоков-модулей» с набранными, развальцованными и приваренными охлаждающими трубами в наружных досках на предприятии-изготовителе и соединяемых между собой на монтаже с помощью сварки. Конструкция трубных систем (модулей №№ 1 – 6) предусматривает исключение термического напряжения в трубах в местах сварки в досках наружных при относительном перемещении корпуса и труб.

Модернизация конденсаторов турбоустановок АЭС мощностью 1000 МВт направлена на замену существующих трубных систем (трубы охлаждающие из медно-никелевого сплава марки

МНЖ 5-1; доски наружные из углеродистой стали марки Ст.3сп5; доски промежуточные из углеродистой стали марки Ст.3сп5) на новые системы трубные (трубы охлаждающие из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса марки TP 316L, со стойкостью к питтинговой коррозии, при коэффициенте питтинговой коррозии  $PRE = 27$  единиц; доски наружные из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса марки 316L или 08X18H10T; доски промежуточные из кремне-марганцовистой стали марки 09Г2С, остальные детали и узлы из углеродистой стали марки Сталь 20).

Трубный пучок состоит из труб сварной конструкции из коррозионно-стойкой стали аустенитного класса и образован из труб охлаждающих сортамента  $\varnothing 23 \times 0,5 \times 14060$  мм и  $\varnothing 23 \times 1,0 \times 14060$  мм соответственно.

Компоновка трубного пучка «модульного» типа разрабатывается на определенных конструктивных принципах проектирования [4, 5] выхлопов пара из цилиндра низкого давления (ЦНД) с учетом аэродинамики потока пара в выхлопной части ЦНД и имеет свои конструктивные особенности, связанные с направлением потока пара относительно трубного пучка и взаимным расположением ЦНД паровой турбины и конденсаторов:

- при минимальных потерях на входе в трубный пучок, которые определяются аэродинамическим потоком пара при выхлопе ЦНД турбины;
- при малых значениях скоростей пара на входе в трубный пучок, которые достигаются за счет разрядки труб в первых рядах пучка по ходу пара, что приводит к существенному снижению сопротивления парового потока.

Трубный пучок «модульного» типа спроектирован так, что он позволяет снизить окружную неравномерность давления за лопатками последней ступени ЦНД, создает более благоприятные условия для восстановления давления от последней ступени ЦНД к конденсатору, что дает возможность обеспечить их динамическую надежность.

Трубный пучок конденсатора опирается на промежуточные доски, которые расположены на равных расстояниях друг от друга с учетом оптимизации расстояния. В промежуточных досках в местах между отдельными зонами отверстий под охлаждающие трубы имеются вырезы для выравнивания давления в корпусе конденсатора, а также вырезы в нижних частях для перетекания конденсата в сторону конденсатосборников. Паровоздушная смесь из зоны воздухоохладителя отводится с помощью коробов, которые располагаются в каждом отсеке конденсатора, проходит через заднюю камеру водяную, где собирается в единый коллектор и отсасывается пароструйным эжектором. Подвод охлаждающей воды осуществляется в нижнюю часть передней камеры водяной каждой половины конденсатора. Слив охлаждающей воды осуществляется из верхней части передней камеры водяной каждой половины конденсатора.

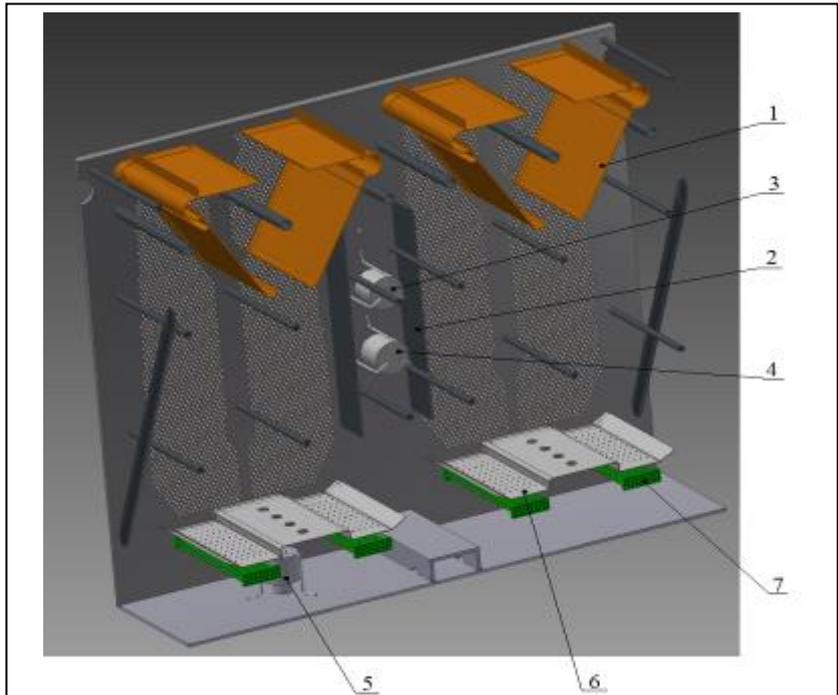
Конструкция конденсатора, выполненная с «модульной» компоновкой трубного пучка, предотвращает переохлаждение конденсата и насыщение его неконденсирующимися газами. Она герметична и исключает присосы воздуха, а также попадание охлаждающей воды в паровое пространство. Максимальная величина возможного присоса охлаждающей воды в паровое пространство конденсатора составляет не более 0,00001 % от расхода пара в конденсатор в течение всего срока службы конденсатора. При работе конденсатора и возможных присосах охлаждающей воды удельная электропроводность основного конденсата не превышает 0,2 мкСм/см.

В конструкции нижних модулей предусмотрены дополнительные элементы (деаэрационные щиты и деаэрационные устройства), позволяющие снизить кислородную составляющую в конденсате и обеспечить надежную и безопасную работу конденсатных насосов системы основного конденсата турбоустановки (рис. 3). Это является новой технической разработкой, которая ранее не применялась в существующих конструкциях конденсаторов разработки ПАО «Турбоатом», работающих на АЭС и ТЭС Украины, а также в конденсаторах зарубежных конструкций.

Преимуществом такой разработки является то, что образовавшийся конденсат внутри конденсатора, после прохождения элементов системы деаэрации в модулях (деаэрационных щитов, установленных под трубным пучком, и деаэрационных устройств, расположенных над деаэрационными щитами,) позволяет существенно снизить массовое содержание кислорода в основном конденсате (до быстродействующей обессоливающей установки) до низких значений 10 – 15 мкг/кг, которые ниже нормативных показателей (25 мкг/кг) по энергоблоку.

Конструкция корпуса (модулей №№ 1 – 6) предусматривает исключение термического напряжения в трубах в местах сварки в досках наружных при относительном перемещении корпуса и труб.

Термические напряжения в местах соединения «труба – доска наружная» учитываются в оценке прочности элементов конструкции конденсатора при расчете размахов приведенных напряжений ( $\sigma_{RV}$ ), определяемых по суммам составляющих мембранных, изгибных, температурных и компенсационных напряжений, а также при расчете амплитуды приведенных напряжений ( $\sigma_{FV}$ ), определяемых по суммам составляющих мембранных, изгибных, температурных и компенсационных напряжений с учетом концентрации напряжений. Снижение в элементах конструкции



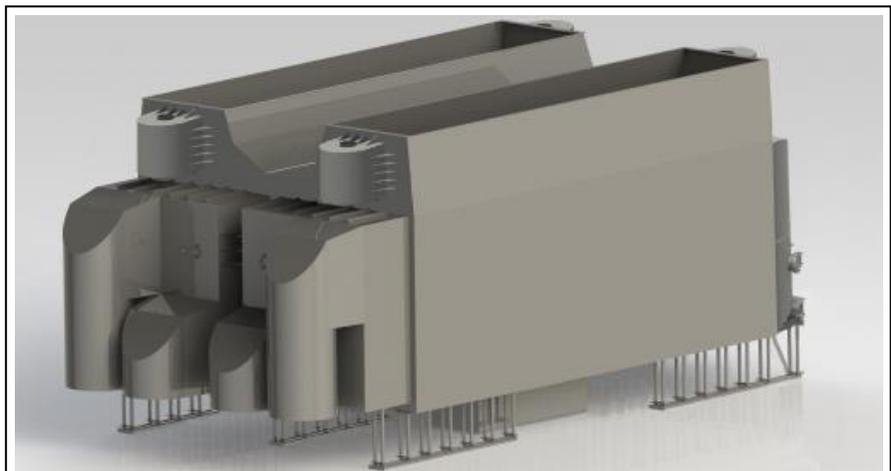
**Рис. 3 Элементы конструкции модуля:**

- 1 – щит (паровой); 2 – лист (защитный);
- 3, 4 – патрубки (для приема сбросов высокопотенциальных дренажей);
- 5 – патрубков (для приема сбросов низкопотенциальных дренажей);
- 6 – щит (деаэрационный); 7 – деаэрационное устройство

конденсатора температурных и компенсационных напряжений до уровня требований [6] достигается оптимальным соотношением характеристик жесткости сопрягаемых элементов конструкции с установкой оси охлаждающих труб по типу «лук». Размах приведенных ( $\sigma_{RV}$ ) напряжений и амплитуда приведенных напряжений ( $\sigma_{FV}$ ) в элементах конструкции удовлетворяют требованиям [6] при оценке статической прочности и циклической прочности соответственно.

Новая конструкция трубных систем конденсатора «блочно-модульного» исполнения разработана исходя из реальных конструктивных особенностей фундамента с установкой новых трубных систем на существующие системы гибких стержней (опоры стержневого типа), которые определялись исходя из условий прочности и устойчивости конструкции конденсатора и распределения нагрузок на нижнюю часть фундамента (рис. 4).

Обеспечение вибрационной прочности труб охлаждающих (сортамент труб  $\text{Ø}23 \times 0,5 \times 14060$  мм и  $\text{Ø}23 \times 1,0 \times 14060$  мм) и устойчивости всей конструкции конденсатора привело к технической необходимости изменения



**Рис. 4. Трехмерная модель конденсатора «блочно-модульного» исполнения К-38080 на стержневых опорах**

количества досок в каждом модуле корпуса с 10 (толщиной 20 мм) до 16 (толщиной 16 мм). Это позволило выбрать и рассчитать оптимальное расстояние между досками промежуточными, обеспечивающее вибрационную прочность труб охлаждающих с учетом устойчивости всей конструкции во время режимов нормальной эксплуатации. При установке труб по типу «лук» оптимизированы расстояния между промежуточными досками – 781,5 – 781,0 мм. Внутренние поверхности камер передних и задних имеют антикоррозионное покрытие для исключения коррозионных повреждений. В трубных пучках модулей конденсатора выполнены зоны отвода несконденсировавшейся паровоздушной смеси.

Для равномерного распределения нагрузок, действующих на существующие стержневые опоры при увеличенном количестве промежуточных досок, на днищах модулей, со стороны парового пространства, между промежуточными досками устанавливаются «опорные элементы жесткости», представляющие собой балки необходимой жесткости. Они служат для выравнивания возможных деформаций и, как следствие, опорных реакций в местах установки конденсатора на опоры. Это позволяет установить новые трубные системы конденсатора на существующие стержневые опоры фундамента без изменения их конструкции и компоновочных решений.

Характеристики конденсатора до и после модернизации представлены в табл. 1, эффективность модернизации – в табл. 2.

**Таблица 1. Конструктивные характеристики конденсатора до и после модернизации**

| Наименование   | Конденсатор:             |                                |
|--|--------------------------|--------------------------------|
|  | до модернизации          | после модернизации             |
| <b>Конструктивные характеристики:</b>                |                          |                                |
| Тип  | Поверхностный, К-33160   | Поверхностный, К-38080         |
| Поверхность охлаждения, м <sup>2</sup>               | 33160                    | 38080                          |
| Тип трубы,   | цельная                  | сварная                        |
| Сортамент труб, мм                                   | Ø28x1x8970<br>Ø28x2x8970 | Ø23x0,5x14060<br>Ø23x1,0x14060 |
| Количество труб                                      | 26940                    | 37644                          |
| Крепление труб в досках наружных                     | вальцовка                | вальцовка и сварка             |
| Число ходов / потоков                                | 2 / 2                    | 2 / 2                          |
| <b>Расчетные характеристики на один конденсатор:</b> |                          |                                |
| Расход пара в конденсатор, т/ч                       | 1114,22                  | 1114,22                        |
| Давление пара в конденсаторе, кПа                    | 3,825                    | 3,570                          |
| Расход воды охлаждающей в конденсатор, т/ч           | 56600                    | 56000                          |
| Расчетная температура охлаждающей воды, °С           | 15                       | 15                             |
| Скорость воды в трубах, м/с                          | 2,1                      | 2,0                            |
| <b>Материалы:</b>                                    |                          |                                |
| Труба охлаждающая                                    | сплав марки МНЖ 5-1      | сталь марки ТР 316L            |
| Доска наружная                                       | сталь марки Сталь 20     | сталь марки 08X18Н10Т          |
| Доска промежуточная                                  | сталь марки Ст.3 сп5     | сталь марки 09Г2С              |
| <b>Массовые характеристики:</b>                      |                          |                                |
| Конденсатор (без опор), кг                           | 621000                   | 523000                         |

**Таблица 2. Режимные характеристики конденсатора до и после модернизации**

| Расчетная температура охлаждающей воды на входе в первый корпус конденсатора, °С | Среднее значение давления пара существующего конденсатора, кПа | Среднее значение давления пара модернизированного конденсатора, кПа | Прирост электрической мощности турбоустановки на зажимах генератора после модернизации конденсатора, МВт |
|--|--|---|--|
| 15   | 3,825  | 3,570   | 0,90   |
| 20   | 4,923  | 4,668   | 2,10   |
| 25   | 6,414  | 6,100   | 3,10   |

|    |        |        |      |
|----|--------|--------|------|
| 30 | 8,345  | 7,963  | 4,10 |
| 35 | 10,846 | 10,356 | 5,20 |

### Заключення

Таким образом, новая конструкция конденсатора обеспечивает:

- установку корпусов на существующие опоры фундамента без изменения конструкции фундамента и его расчета;
- плотность крепления труб охлаждающих в досках наружных за счет вальцовки и сварки по технологии предприятия-изготовителя;
- углубление расчетного давления пара в конденсаторе (вакуума) с соответствующим приростом электрической мощности турбоустановки на зажимах генератора;
- установку на входных, выходных и промежуточных камерах люков, обеспечивающих доступ к охлаждающим трубам для определения возможных дефектов труб и контроля плотности соединения труб охлаждающих с досками наружными;
- покрытие внутренних поверхностей камер водяных, крышек и соединений анкерных антикоррозионным материалом;
- отвод несконденсировавшейся паровоздушной смеси из трубного пучка;
- полную конденсацию пара, поступающего из цилиндров низкого давления турбины;
- работоспособность при форсировании тепловой мощности реакторной установки до 3210 МВт (107 %).

Надежная и экономичная работа конденсатора достигается за счет:

- применения материалов для трубных систем стойких против эрозионных и коррозионных воздействий со стороны охлаждающей воды;
- обеспечения надежности и плотности крепления охлаждающих труб в досках наружных (вальцовка и сварка труб охлаждающих в досках наружных);
- предотвращения стояночной коррозии (установка труб по типу «лук»);
- правильного выбора расстояния между наружными и промежуточными досками с целью уменьшения вибрации и применения эффективной компоновки трубного пучка, а также обеспечивающего оптимальные скорости течения пара;
- применения модульной компоновки трубного пучка;
- организации приёма паро-водяных потоков в конденсатор с целью ликвидации размывов труб охлаждающих;
- поставки модулей-блоков с трубами охлаждающими полной заводской готовности, с обеспечением необходимого контроля и качества.

### Литература:

1. Швецов В. Л., Усс А. Н., Гаврилова В. В. Модернизация конденсаторов турбоустановок К-1000-60/1500-2М Ростовской и Балаковской АЭС путем замены материала трубных систем и создания «Блочно-модульной» конструкции. *Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2012. № 8. С. 26–35.
2. Заявка в «Укрпатент», г. Киев, Мин-во образования и науки Украины, № 1-40-34/191 от 09.11.2012 г.
3. Кирсанов И. Н. Конденсационные установки. М: Энергия, 1965. 376 с.
4. Берман Л. Д., Зернова Э. П. Руководящие указания по тепловому расчету поверхностных конденсаторов мощных турбин тепловых и атомных электростанций. М.: Всесоюз. теплотехн. ин-т, 1982. 106 с.
5. Косяк Ю. Ф. Паротурбинные установки атомных электростанций. М.: Энергия, 1978. 312 с.
6. Правила и нормы в атомной энергетике ПН АЭ Г-7-002-86. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.

Поступила в редакцию 24.01.18