

УДК 621.187.124

Г. В. ГРИГОРЬЕВ, с.н.с. ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;
П. В. ЕГОРОВ, канд. техн. наук; зав. отд. ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;
М. В. ЧУПРАКОВ, ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;
А. С. ГИММЕЛЬБЕРГ, ОАО «НПО ЦКТИ», Санкт-Петербург, Россия;
Ю. Г. СУХОРУКОВ, канд. техн. наук; зам. ген. дир. ОАО «НПО ЦКТИ»;
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург, Россия

РАЗРАБОТКА ТЕРМИЧЕСКИХ ДЕАЭРАТОРОВ ПОВЫШЕННОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТУРБОУСТАНОВОК ЭНЕРГОБЛОКОВ АЭС МОЩНОСТЬЮ 1200 МВт

С учетом опыта создания и внедрения деаэраторов для Тяньваньской АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии, разработаны новые деаэраторы производительностью 6400 т/ч для энергоблоков № 1, 2 мощностью 1200 МВт Нововоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2 проекта АЭС-2006. Результаты разработки и освоения указанных деаэраторов используются при проектировании новых деаэраторов для энергоблоков № 1, 2 мощностью 1200 МВт Белорусской АЭС, а также перспективных энергоблоков АЭС и ТЭС в России и за рубежом.

Ключевые слова: новый термический деаэратор повышенного давления, низконапорное водораспределительное устройство, ОАО «НПО ЦКТИ», проект АЭС-2006, деаэратор питательной воды.

Введение

В последнее время появились новые требования, предъявляемые к деаэраторам питательной воды для турбоустановок мощных энергоблоков АЭС: увеличение единичной производительности, повышение рабочего и расчетного давления, работа деаэратора на скользящем давлении, снижение остаточной концентрации кислорода в питательной воде и др. В связи с этим весьма актуальной является задача создания новых, надежных и эффективных термических деаэраторов большой производительности, в полной мере удовлетворяющих условиям работы мощных современных турбоустановок.

Анализ основных достижений и литературы

В 2000–2004 гг. специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» были разработаны новые термические деаэраторы единичной производительностью 6000 т/ч для применения в схеме энергоблоков с реактором ВВЭР-1000 Тяньваньской АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии [1]. Деаэраторы имеют в своем составе одну горизонтальную деаэрационную колонку, установленную на деаэрационном баке геометрическим объемом ~ 400 м³. Общий вид этих деаэраторов представлен на рис. 1.

В качестве деаэрирующих элементов в деаэраторах используются: низконапорные водораспределительные устройства (форсунки струйного типа) и перфорированные тарелки – в колонке, «затопленное» барботажное устройство – в баке.

Два деаэратора ДП-6000/250-А такой конструкции были изготовлены и поставлены для энергоблоков № 1, 2 Тяньваньской АЭС в Китае и уже более пяти лет успешно эксплуатируются, обеспечивая надежную и устойчивую работу в проектном диапазоне изменения производительности, необходимые нагрев и качество деаэрированной воды.

© Г.В. Григорьев, П.В. Егоров, М.В. Чупраков, А.С. Гиммельберг, Ю.Г. Сухоруков, 2014

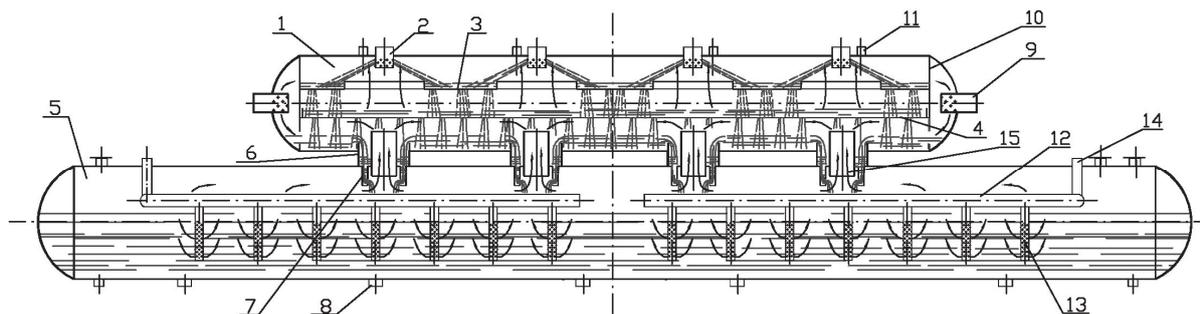


Рис. 1 – Принципиальная схема деаэратора ДП-6000/250-А:

1 – деаэрационная колонка; 2 – низконапорные водораспределительные устройства; 3 – тарелка верхняя перфорированная; 4 – тарелка нижняя перфорированная; 5 – бак деаэрационный; 6 – патрубки соединительные; 7 – трубы сливные; 8 – штуцера расходные; 9 – штуцера греющего пара; 10 – фальшдныще; 11 – штуцера выпара; 12 – коллектор раздающий; 13 – трубы вертикальные перфорированные; 14 – подвод пара на барботаж; 15 – трубы паровые

Два деаэратора модификации ДП-6000/250-А-1, отличающихся главным образом величинами рабочего давления и изменения давления при работе на скользких параметрах, были изготовлены и поставлены на энергоблоки № 1, 2 АЭС «Куданкулам» в Индии.

В настоящее время на АЭС «Куданкулам» проводятся пуско-наладочные работы по программе освоения энергоблока № 1. В декабре 2013 г. энергоблок № 1 успешно выведен на 50 % мощности. Деаэратор работает надежно, обеспечивает необходимые нагрев и качество питательной воды. Пуск энергоблока № 2 намечен на 2014 г.

Основные проектные технические характеристики указанных деаэраторов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные проектные технические характеристики деаэраторов для энергоблоков № 1, 2 Тяньваньской АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии

Характеристика	Деаэратор энергоблоков № 1, 2 Тяньваньской АЭС ДП-6000/250-А	Деаэратор энергоблоков № 1, 2 АЭС «Куданкулам» ДП-6000/250-А-1
Производительность деаэратора (номинальная), т/ч	6000	6000
Давление рабочее абсолютное, МПа	0,824	1,07
Диапазон изменения давления при работе на скользких параметрах, МПа	0,824–0,49	1,07–0,69
Нагрев воды в деаэраторе при номинальной производительности, °С	10–40	10–40
Диапазон изменения производительности деаэратора, % номинальной	100–20	100–30
Исполнение деаэрационных колонок	горизонтальное	горизонтальное
Количество колонок на бак, шт.	1	1
Общая масса деаэрационной колонки (колонок), кг	65500	71500
Объем деаэрационного бака, м ³	400	400
Масса деаэрационного бака, кг	148000	149050
Полная высота деаэратора, мм	7700	7700
Общая масса деаэратора, кг	213500	220550
Содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде на выходе из деаэратора, мкг/кг, не более	10	10

Цели исследования, постановка задачи

На основе опыта создания и внедрения деаэраторов с одной горизонтальной колонкой, наметились пути дальнейшего совершенствования конструкции с целью сокращения массогабаритных характеристик, повышения технологичности при изготовлении и монтаже, увеличения производительности и др.

Для перспективных энергоблоков с реакторной установкой ВВЭР-1200 проекта АЭС-2006 Нововоронежской АЭС-2 (НВАЭС-2) и Ленинградской АЭС-2 (ЛАЭС-2) необходимо было разработать новые деаэраторы питательной воды производительностью 6400 т/ч, удовлетворяющие условиям работы мощных современных турбоустановок.

Материалы исследования

На начальном этапе разработки деаэраторов для энергоблоков проекта АЭС-2006 было рассмотрено два конструктивных варианта:

– деаэратор с одной деаэрационной колонкой горизонтального типа производительностью ~ 6400 т/ч;

– деаэратор с четырьмя малогабаритными деаэрационными колонками вертикального типа, производительностью 1600 т/ч каждая.

В обоих вариантах предполагалось, что:

– деаэрационные колонки будут устанавливаться на деаэрационном баке геометрическим объемом ~ 400 м³;

– будет применяться двухступенчатая (струйно-барботажная) схема обработки воды;

– в качестве деаэрирующих элементов в деаэрационных колонках будут использоваться низконапорные водораспределительные устройства (форсунки струйного типа) и струйные тарелки;

– в деаэрационном баке будет предусмотрено «затопленное» барботажное устройство;

– принятая схема обработки воды должна обеспечить практически одинаковые тепловую эффективность и повышенные требования к качеству деаэрированной воды.

Результаты исследования

По результатам сравнения обоих указанных выше вариантов, по согласованию с Генпроектировщиками энергоблоков НВАЭС-2 и ЛАЭС-2 (ОАО «Атомэнергопроект» и ОАО «СПб АЭП»), для дальнейшей проработки был принят вариант конструкции деаэратора с четырьмя малогабаритными деаэрационными колонками вертикального типа. К преимуществам этого варианта конструкции деаэратора следует отнести:

– уменьшение вертикального габарита и массы;

– упрощение конструктивного исполнения;

– повышение технологичности при изготовлении деаэратора на предприятии-изготовителе и монтаже;

– упрощение компоновки присоединяемых к баку трубопроводов.

На рисунке 2 представлена принципиальная схема нового деаэратора ДП-6400(4×1600)/250-А, разработанного в 2010 г. Деаэратор состоит из четырех малогабаритных вертикальных деаэрационных колонок, установленных на деаэрационном баке геометрической ёмкостью 400 м³.

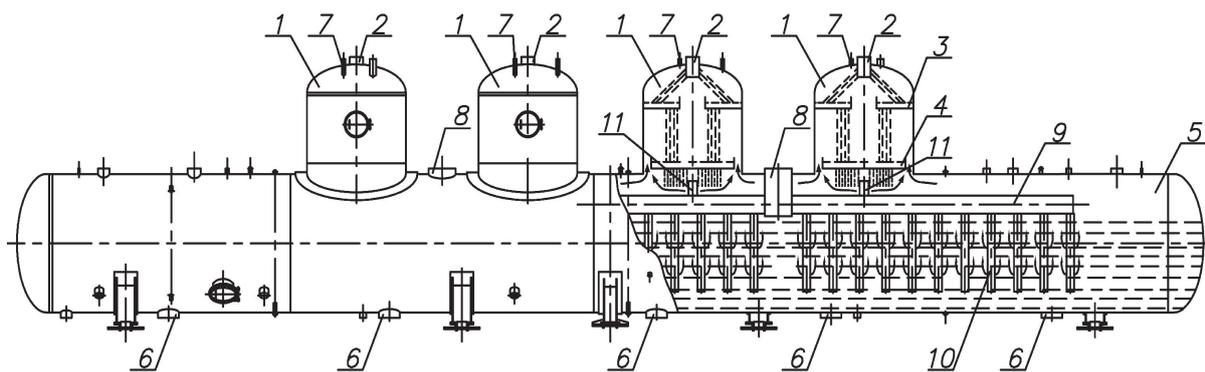


Рис. 2 – Принципиальная схема нового деаэратора ДП-6400(4x1600)/250-А для отечественных энергоблоков мощностью 1200 МВт:

- 1 – деаэрационная колонка; 2 – низконапорные водораспределительные устройства;
 3 – тарелка верхняя перфорированная; 4 – тарелка нижняя перфорированная;
 5 – бак деаэрационный; 6 – штуцеры расходные; 7 – штуцеры выпара; 8 – штуцеры подвода пара на парораспределительное устройство; 9 – раздающие коллекторы; 10 – трубы барботажные вертикальные перфорированные; 11 – штуцеры перфорированные

Деаэратор работает следующим образом. Основной конденсат подается в деаэрационные колонки 1, через низконапорные водораспределительные устройства 2, представляющие собой струйные форсунки. Вода, вытекая из отверстий форсунки, дробится на струи и капли и сливается на верхнюю перфорированную тарелку 3. Через отверстия верхней тарелки вода струями стекает на нижнюю перфорированную тарелку 4. Затем вода сливается в деаэрационный бак 5.

Из бака деаэрированная вода, после выдержки и обработки паром в «затопленном» барботажном устройстве, отводится через расходные штуцеры 6.

Весь греющий пар подается в раздающие коллекторы 9 через штуцеры 8 и распределяется на две части. Одна часть пара через патрубки 11 поступает в паровое пространство бака, где смешивается с паром, образующимся при поступлении в бак вскипающих потоков (конденсат греющего пара подогревателя высокого давления (ПВД), конденсат греющего пара сепаратора-пароперегревателя (СПП) и др.) и направляется в деаэрационные колонки под нижние тарелки 4.

Оставшаяся часть пара для обеспечения надежной деаэрации во всех режимах работы блока направляется в «затопленное» барботажное устройство, расположенное в водяном объеме бака деаэратора и состоящее из вертикальных перфорированных труб 10.

Пар, выходя из отверстий барботажных труб, проходит через слой воды в баке, обрабатывая её. Затем этот пар смешивается с другими потоками пара в паровом объеме деаэрационного бака и направляется в деаэрационные колонки.

Применение в деаэрационной колонке эффективных струйных форсунок и перфорированных тарелок, а в баке «затопленного» барботажного устройства позволяет надежно гарантировать необходимые нагрев и качество деаэрированной воды.

Конструкция парораспределительного устройства позволяет подавать греющий пар одновременно в водяной объем деаэрационного бака (на барботаж) и в паровой объем под деаэрационные колонки, в отличие от применявшихся ранее двух отдельных подводов пара в деаэратор (в колонку и в бак на барботаж). Таким образом, греющий пар подается в деаэратор из одного источника через общие штуцера, что

упрощает схему компоновки присоединяемых к баку трубопроводов. Такое техническое решение защищено патентом РФ [2].

Разработанные две модификации деаэратора ДП-6400(4×1600)/250-А для НВАЭС-2 и ДП-6400(4×1600)/250-1-А для ЛАЭС-2 различаются между собой величиной изменения давления при работе на скользящих параметрах, а также расположением и функциональным назначением некоторых штуцеров.

Выполненные специалистами ОАО «НПО ЦКТИ» расчёты подтвердили, что разработанные деаэраторы соответствуют проектным данным и сохраняют гидродинамическую устойчивость во всех заданных расчётных режимах работы турбоустановки К-1200-6.8/50.

Два новых деаэратора ДП-6400(4×1600)/250-А изготовлены и находятся в завершающей стадии монтажа на энергоблоках № 1 НВАЭС-2 и ЛАЭС-2. В настоящее время изготавливаются еще два деаэратора для энергоблоков № 2 указанных АЭС.

Основные проектные технические характеристики деаэраторов для энергоблоков Тяньваньской АЭС в Китае, АЭС «Куданкулам» в Индии и деаэраторов энергоблоков НВАЭС-2 и ЛАЭС-2 приведены в таблице 2.

Таблица 2

Основные проектные технические характеристики деаэраторов для энергоблоков № 1, 2 АЭС «Тяньвань» в Китае, № 1, 2 АЭС «Куданкулам» в Индии и деаэраторов энергоблоков НВАЭС-2 и ЛАЭС-2

Характеристика	Деаэратор энергоблоков № 1, 2 Тяньваньской АЭС ДП-6000/250-А	Деаэратор энергоблоков № 1, 2 АЭС «Куданкулам» ДП-6000/250-1-А	Деаэратор энергоблоков № 1, 2 НВАЭС-2 ДП-6400(4×1600)/250-А	Деаэратор энергоблока № 1 ЛАЭС-2 ДП-6400(4×1600)/250-1-А
Производительность деаэратора (номинальная), т/ч	6000	6000	6400	6400
Давление рабочее абсолютное, МПа	0,824	1,07	0,87	0,87
Диапазон изменения давления при работе на скользящих параметрах, МПа	0,824–0,49	1,07–0,69	0,871–0,42	0,871–0,69
Нагрев воды в деаэраторе при номинальной производительности, °С	10–40	10–40	10–50	10–50
Диапазон изменности производительности деаэратора, % номинальной	100–20	100–30	100–20	100–20
Исполнение деаэрационных колонок	горизонтальное	горизонтальное	вертикальное	вертикальное
Количество колонок на баке, шт.	1	1	4	4
Масса деаэрационной колонки в составе деаэратора, кг	65500	71500	39215	39215

Окончание таблицы 2

Объем деаэрационного бака, м ³	400	400	400	400
Масса деаэрационного бака, кг	148000	149050	155000	155000
Полная высота деаэратора, мм	7700	7700	7500	7500
Общая масса деаэратора, кг	213500	220550	194215	194215
Содержание растворенного O ₂ в деаэрированной воде на выходе из деаэратора, мкг/кг, не более	10	10	5	5

Как видно из таблицы 2, преимущества применения нового деаэратора с четырьмя малогабаритными вертикальными деаэрационными колонками по сравнению с деаэратором с одной горизонтальной деаэрационной колонкой заключаются в следующем:

- почти в два раза снизилась суммарная масса деаэрационных колонок;
- общая масса деаэратора снижена более чем на 26000 кг. При этом существенная часть экономии металла приходится на нержавеющую сталь;
- производительность деаэратора увеличена с 6000 т/ч до 6400 т/ч;
- проектное содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде снижено с 10 до 5 мкг/кг;
- увеличен допустимый нагрев воды в деаэраторе при номинальной производительности с 40 °С до 50 °С;
- упрощена компоновка присоединяемых трубопроводов за счет большей доступности к верхней образующей деаэрационного бака;
- несколько снижен вертикальный габарит деаэратора;
- достигается повышение технологичности при контрольной сборке деаэратора на предприятии-изготовителе, а также при сборке и монтаже на площадке АЭС.

Выводы

1) С учетом опыта создания и внедрения деаэраторов с одной горизонтальной колонкой для Тяньваньской АЭС в Китае и АЭС «Куданкулам» в Индии, разработаны новые деаэраторы производительностью 6400 т/ч с четырьмя вертикальными малогабаритными колонками для энергоблоков № 1, 2 мощностью 1200 МВт НВАЭС-2 и ЛАЭС-2.

2) Применение вертикальных малогабаритных деаэрационных колонок по сравнению с горизонтальной колонкой позволило значительно снизить общую массу деаэратора – более чем на 26000 кг. При этом существенная часть экономии металла приходится на нержавеющую сталь. Производительность деаэратора была увеличена с 6000 т/ч до 6400 т/ч, проектное содержание растворенного кислорода в деаэрированной воде снижено с 10 до 5 мкг/кг. Конструкция новых деаэраторов позволяет повысить технологичность при их изготовлении и сборке на площадке АЭС и упростить компоновку присоединяемых к баку трубопроводов.

Два новых деаэратора типа ДП-6400(4×1600)/250-А изготовлены и находятся в завершающей стадии монтажа на энергоблоках № 1 НВАЭС-2 и ЛАЭС-2. В настоящее время изготавливаются ещё два деаэратора для энергоблоков № 2 указанных АЭС.

3) В разработанных деаэраторах применена двухступенчатая схема обработки воды паром: в колонках используются низконапорные струйные форсунки и перфорированные тарелки, в баке – «затопленное» барботажное устройство.

4) Результаты разработки и освоения указанных деаэраторов используются при проектировании новых деаэраторов для энергоблоков № 1, 2 мощностью 1200 МВт Белорусской АЭС, а также перспективных энергоблоков АЭС и ТЭС в России и за рубежом.

Список литературы: 1. Григорьев, Г. В. Укрупненные термические деаэраторы с горизонтальной колонкой для мощных энергоблоков АЭС [Текст] / Г. В. Григорьев, А. С. Гиммельберг, П. В. Егоров, Н. Е. Шилова, В. Г. Михайлов, А. Н. Баева // Теплоэнергетика. – 2008. – № 2 – С. 62. 2. Пат. 2274803 Российская Федерация, МПК F22D1/50. Термический деаэратор / А. С. Гиммельберг, В. Г. Михайлов, Г. В. Григорьев, П. В. Егоров, Н. Е. Шилова; Заявитель и патентообладатель ОАО «НПО ЦКТИ». – № 2005111337; заявл. 18.04.2005; опубл. 20.04.2006, Бюл. № 11.

Bibliography (transliterated): 1. Grigor'ev, G.V., et al. "Ukrupnennyye termicheskie deajeratory s gorizontal'noj kolonkoj dlja moshhnyh jenergoblokov AJeS." *Teplojenergetika*. No. 2. 2008. 62. Print. 2. Gimmel'berg, A. S., et al. "Termicheskij deajerator." RU Patent 2274803 (MPK F22D1/50). 20 April 2006.

Поступила (received) 11.02.2014