

ПОДОГРЕВАТЕЛИ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ ДЛЯ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК АЭС

© 2021 г. В. М. Зорин^а, *, А. С. Шамароков^б, **, С. Б. Пустовалов^с, ***

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^бВсероссийский научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт атомного энергетического
машиностроения (ВНИИАМ), Шарикоподшипниковская ул., д. 4, Москва, 115088 Россия

^сНациональный исследовательский центр “Курчатовский институт”,
пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123182 Россия

*e-mail: ZorinVM@mpei.ru

**e-mail: rasa7@mail.ru

***e-mail: Pustovalov_SB@nrcki.ru

Поступила в редакцию 28.05.2020 г.

После доработки 13.09.2020 г.

Принята к публикации 23.09.2020 г.

В работе представлены результаты сравнения конструкций вертикальных подогревателей высокого давления схемы регенерации паротурбинных установок АЭС. Сравнение предлагаемого теплообменного аппарата, имеющего коллекторно-ширмовую трубную систему, с традиционным аналогом проводили по теплогидравлическим, конструкционным, массогабаритным и технологическим показателям. Высокие теплогидравлические характеристики предлагаемого аппарата обеспечиваются эффективным процессом конденсации благодаря высокой скорости потока конденсирующегося пара в межтрубном пространстве. Трубный пучок состоит из унифицированных ширм, расстояние между которыми может варьироваться в широком диапазоне. Использование цилиндрического трубного коллектора вместо трубной доски позволяет существенно уменьшить толщину стенки с соответствующим снижением массы аппарата, а также повысить ресурс благодаря исключению возможности накопления шлама в местах крепления труб к трубному коллектору. Удобство технического обслуживания аппаратов достигается путем организации доступа к трубам, закрепленным в верхнем и нижнем цилиндрических вертикальных трубных коллекторах, через люки-лазы, обеспечивающие возможность эргономичного глушения неисправных трубок. Сроки изготовления аппарата с соответствующим снижением трудоемкости монтажных работ сокращаются вследствие использования унифицированных трубных ширм, а также меньшей длины отверстий для закрепления труб. На основе предлагаемой конструкции разработан ряд теплообменных аппаратов, которые также могут быть реализованы на действующих и проектируемых энергоблоках АЭС. В таких аппаратах возможно объединение в одном корпусе двух последовательных, двух параллельных или двух последовательных и двух параллельных подогревателей высокого давления, что позволяет уменьшить занимаемую площадь в турбинном зале. Указанные возможности разработанных аппаратов имеют существенное значение при реконструкции (модернизации) действующих энергоблоков АЭС, когда планируется увеличение производительности ядерной паропроизводящей установки. Использование предлагаемых аппаратов открывает новые возможности для оптимизации проектно-технологических и объемно-компоновочных решений систем регенерации действующих и проектируемых паротурбинных установок с соответствующим снижением эксплуатационных затрат и капитальных вложений в сооружение или реконструкцию энергоблоков АЭС.

Ключевые слова: паротурбинная установка АЭС, система регенерации, подогреватели высокого давления, конденсация, трубная доска, коэффициент теплоотдачи, вертикальный цилиндрический коллектор

DOI: 10.1134/S0040363621040081

В составе современных энергоблоков АЭС с реакторными установками (РУ) ВВЭР эксплуатируются вертикальные подогреватели высокого

давления камерного типа (ПВД-К), основным узлом в которых является горизонтальная трубная доска с нижним расположением. В процессе ра-

боты на доске происходит отложение оксидов металла, что приводит к подшламовой коррозии в местах закрепления в ней трубок.

Особенность подогревателей камерного типа – распределение греющего (конденсирующегося) пара по всей высоте участка конденсации. При практически неподвижном или слабо движущемся потоке пара конденсация происходит на наружной поверхности вертикального пучка труб (более 90% площади теплопередающей поверхности), что является определяющим для коэффициента теплопередачи аппарата и приводит к малым значениям коэффициента теплоотдачи.

Альтернатива подогревателю камерного типа – вертикальный коллекторно-ширмовый подогреватель высокого давления (ПВД-Ш), конструкция которого разработана сотрудниками ВНИИАМ. В ПВД-Ш применен вертикальный цилиндрический коллектор, в который закрепляются концы труб, вместо горизонтальной трубной доски, что препятствует накоплению шлама в местах крепления. Конструкция трубного пучка ПВД-Ш позволяет обеспечить высокую скорость потока конденсирующегося пара благодаря его распределению по поперечному сечению трубного пучка и применению трубных ширм эвольвентного типа, что дает возможность регулировать проходное сечение в межтрубном пространстве. Кроме того, происходит равномерное распределение пара по ширмам и выравнивание скоростей.

Пар в ПВД-Ш конденсируется на вертикальных (около 30% поверхности) и горизонтальных участках труб (до 70% поверхности), при этом горизонтальные участки являются определяющими для значений коэффициента теплопередачи аппарата. Участок конденсации пара в ПВД-К и ПВД-Ш занимает 80–90% общей площади теплопередающей поверхности. Сопоставление ПВД-Ш, имеющего крестообразный трубный пучок, с ПВД-К было выполнено ранее в работе [1], результаты которой были обсуждены в различных организациях атомной отрасли, включая научно-технические советы Госкорпорации “Росатом” и АО “Концерн Росэнергоатом”, и были рекомендованы к внедрению на строящихся российских АЭС.

В настоящей работе представлена конструкция перспективного подогревателя ПВД-Ш с трубным пучком из эвольвентных ширм. Варианты подогревателей были разработаны применительно к рабочим параметрам проекта АЭС-2006 с РУ ВВЭР-1200. Схема работы ПВД-К и ПВД-Ш двухниточная с двумя ступенями подогрева в каждой. В подогревателях применены трубы диаметром 16 мм и толщиной стенки 1.4 мм из стали 08Х14МФ с высоким коэффициентом теплопро-

водности [26.0–26.1 Вт/(м² · К)]. Площадь теплообменной поверхности всех подогревателей рассчитана с запасом 10%. За основу разработки ПВД-К была взята конструкция ИК “ЗиОМАР” (габаритные размеры).

КОНСТРУКЦИЯ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Подогреватель ПВД-К (рис. 1) – аппарат вертикального исполнения с U-образным трубным пучком и горизонтальной трубной доской, в которой закреплены концы 3800 теплообменных труб в шахматном порядке с шагом 22 мм. Под трубной доской находится водяная камера с па-

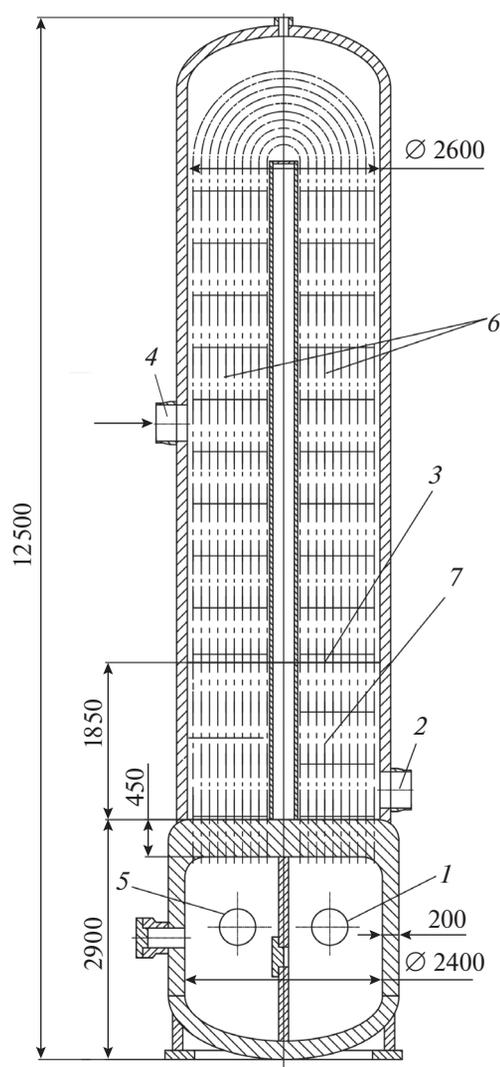


Рис. 1. Подогреватель вертикальный камерного типа в двухниточном исполнении (ПВД-К-5). 1 – вход питательной воды; 2 – выход конденсата; 3 – номинальный уровень конденсата; 4 – вход пара; 5 – выход питательной воды; 6 – участок охлаждения конденсации; 7 – участок охлаждения конденсата

трубками подвода и отвода питательной воды и вертикальной перегородкой между ними. Равномерно по высоте трубного пучка расположены горизонтальные перегородки, служащие для дистанционирования труб и отвода конденсата от теплообменной поверхности на участке конденсации. В межтрубном пространстве подогревателя последовательно сверху вниз расположены участки конденсации пара и охлаждения конденсата (над горизонтальной трубной доской). Греющий пар поступает в подогреватель через патрубок на корпусе и равномерно распределяется по всей высоте участка конденсации, которая составляет 7.1 м в ПВД-К-5 и 6.0 м в ПВД-К-6. Такое распределение приводит к низким скоростям движения конденсирующегося пара.

По оси между горячей и холодной сторонами трубной доски ПВД-К-5 расположена вертикальная перегородка, которая делит зону охлаждения конденсата над трубной доской на два участка — со стороны входа питательной воды в трубы и со стороны выхода нагретой питательной воды из труб. Охлаждение конденсата происходит в основном на первом участке и не происходит на втором вследствие низкого температурного напора между охлаждаемым конденсатом и нагретой питательной водой на выходе из труб подогревателя (примерно 2°C).

Подогреватель ПВД-Ш (рис. 2) состоит из вертикального корпуса, цилиндрического коллектора, закрепленного в нижнем днище корпуса и расположенного соосно его вертикальной оси, и трубного пучка в кольцевом пространстве между коллектором и корпусом. Трубный пучок ПВД-Ш-5 включает в себя 179 W-образных вертикальных ширм (в ПВД-Ш-6 174 ширмы), каждая из которых содержит 17 труб (рис. 3). В плане ширмы расположены в виде эвольвенты (спирали Архимеда) (рис. 4) с шагом 19 мм. Концы труб всех ширм закреплены в цилиндрическом коллекторе в шахматном порядке. По выходе из коллектора трубы смещаются на полшага в вертикальной плоскости с коридорным расположением их на горизонтальных участках всего трубного пучка. Благодаря этому обеспечиваются высокие скорости конденсирующегося пара с проявлением скоростного эффекта [2, 3].

Дистанционирование труб в ширме осуществляется посредством вертикальных и горизонтальных парных дистанционирующих волнистых планок, скрепленных проволочными скобами. Дистанционирование ширм в пучке обеспечивается путем закрепления концов горизонтальных дистанционирующих планок ширм в бандажах снаружи трубного пучка и в пазах кожуха — внутри трубного пучка. Равномерно по высоте трубного пучка

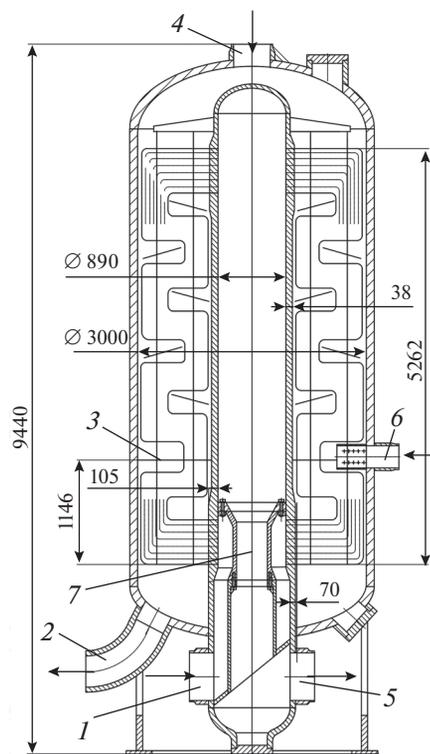


Рис. 2. Подогреватель коллекторно-ширмового типа с трубным пучком из эвольвентных ширм в двухниточном исполнении (ПВД-Ш-5). 1–5 — см. рис. 1; 6 — вход конденсата; 7 — съемная вставка

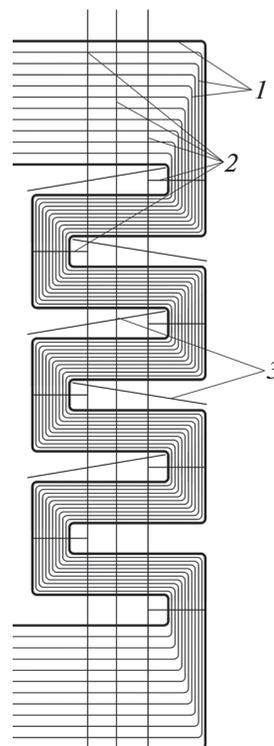


Рис. 3. Развертка ширмы подогревателя ПВД-Ш. 1 — теплообменная труба; 2 — дистанционирующая планка; 3 — желоб

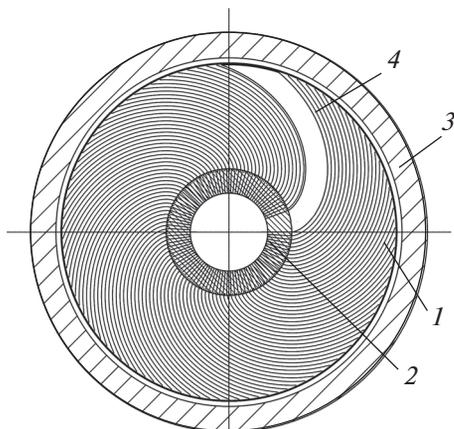


Рис. 4. Поперечное сечение подогревателя ПВД-Ш.
1 – ширмы; 2 – коллектор; 3 – корпус; 4 – вытеснитель

в U-образных коленах по профилю каждой ширмы на трубах закреплены наклонные желоба, отводящие конденсат греющего пара от теплообменной поверхности ширмы к корпусу и коллектору.

Технология сборки трубного пучка предусматривает установку вытеснителя между первой и последней установленными ширмами. Вытеснитель имеет форму ширм (эвольвенты) в поперечном сечении. Движение сред противоточное. Питательная вода нагревается при движении внутри труб снизу вверх. В межтрубном пространстве последовательно сверху вниз расположены участки конденсации пара и охлаждения конденсата.

Основные технические характеристики подогревателей представлены в табл. 1. Как следует из данных таблицы, толщина стенки цилиндрического коллектора в местах закрепления труб и стенки водяной камеры (коллектора), длина сверления отверстий для закрепления трубок, недогрев питательной воды, масса теплопередающих трубок на энергоблок, поковок для ПВД на энергоблок и комплекта ПВД на энергоблок подогревателя ПВД-Ш меньше значений таких же показателей для ПВД-К.

ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ

Теплопередающая поверхность в подогревателях высокого давления состоит из двух участков – конденсации пара и охлаждения конденсата. Площадь участка конденсации пара занимает 80–90% общей площади теплопередающей поверхности в ПВД-К и ПВД-Ш. Теплоотдача при конденсации пара на наружной поверхности труб зависит от их расположения и скорости конденсирующегося пара. В ПВД-К практически все трубы расположены вертикально (кроме U-образного

участка), в ПВД-Ш 70% поверхности труб – горизонтально, 30% – вертикально.

Теплоотдача при охлаждении конденсата на наружной поверхности труб зависит от направления (поперечное или продольное) и скорости обтекания труб. На участках охлаждения в ПВД-Ш происходит продольно-поперечное обтекание, в ПВД-К – поперечное обтекание. В ПВД-К конденсат над горячей стороной трубной доски практически не охлаждается вследствие низкого температурного напора между ним и нагретой питательной водой на выходе из подогревателя (примерно 2°C). Охлаждение происходит в трубном пучке над холодной частью трубной доски. Фактическая теплопередающая площадь поверхности в итоге определяется высотой участка охлаждения конденсата над холодной и горячей сторонами трубной доски – уровнем конденсата в аппаратах (см. рис. 1, табл. 1).

В процессе эксплуатации подогревателя эффективность теплообмена с течением времени снижается вследствие загрязнения поверхности, ее окисления, выхода из строя и глушения дефектных труб. Это обстоятельство учитывается путем введения коэффициента запаса площади поверхности, равного 10% расчетного значения, при котором должна обеспечиваться номинальная нагрузка подогревателя перед проведением очистки теплопередающей поверхности [2]. От частоты проведения очисток и промывок зависит номинальная мощность подогревателя в течение всего периода его эксплуатации [2].

В ПВД-К конденсация на наружной поверхности вертикального пучка труб происходит при практически неподвижном или слабо движущемся потоке пара. С учетом этого средний коэффициент теплоотдачи вычисляют по формуле [2]

$$\alpha_{н/п.в} = 0.925Re^{-1/3}A, \quad (1)$$

где A – комплекс теплофизических параметров пара; Re – критерий Рейнольдса пленки конденсата.

В ПВД-Ш благодаря особенностям его конструкции обеспечены высокие скорости движения потока конденсирующегося пара, поэтому средний коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности вертикального пучка труб рассчитывают по следующим выражениям [2]:

при $Re > 100$

$$\alpha_{дв.в} = \alpha_{н/п.в}(1 + 0.013wB); \quad (2)$$

при $Re < 100$

$$\alpha_{дв.в} = \alpha_{н/п.в}n_p, \quad (3)$$

Таблица 1. Геометрические, режимные и технологические параметры подогревателей высокого давления камерного и коллекторно-ширмового типов с трубным пучком из эвольвентных ширм для турбоустановки К-1200-6.8/50 (АЭС-2006)

Параметр	Подогреватель			
	ПВД-Ш-5	ПВД-Ш-6	ПВД-К-5	ПВД-К-6
Тепловая мощность, МВт	127.34	60.593	126.94	59.40
Число подогревателей в группе (нитке)	1			
Число подогревателей на блок	2			
Диаметр корпуса, мм	3000	2600		
Высота, мм:				
подогревателя	9440	9200	12 500	9650
трубного пучка	5262	5262	9140	6200
участка охлаждения конденсата	1190	720	1900	430
Толщина, мм:				
трубной доски (коллектора)	105		450	
стенок водяной камеры (коллектора)	38.75		200	
Суммарная длина сверления отверстий, м	600		3400	
Площадь теплопередающей поверхности, м ² :				
общая	2600	1915	3236	2306
участка конденсации	2086	1710	2576	2180
участка охлаждения конденсата	514	205	660	126
Недогрев питательной воды, °С	1.9*	1.7*	2.0	
Недоохлаждение конденсата, °С	7.0			
Гидравлическое сопротивление тракта питательной воды, МПа**	0.1		0.065	
Газодинамическое сопротивление по стороне пара, Па	2100	1100	200	75
Масса, т:				
теплопередающих труб	27.6	20.3	35.5	24.63
теплопередающих труб на блок	$(27.6 \times 2) + (20.3 \times 2) = 95.80$		$(35.5 \times 2) + (24.63 \times 2) = 120.26$	
поковок на блок	$9 \times 4 = 36$		$54 \times 4 = 216$	
подогревателя	73	59	134	110
подогревателей на блок	$(73 \times 2) + (59 \times 2) = 264$		$(134 \times 2) + (110 \times 2) = 488$	

* Недогрев питательной воды до температуры насыщения греющего пара в соответствии с техническим заданием равен 2°С. Запас площади теплопередающей поверхности в соответствии с руководящими материалами равен 10%. При разработке ПВД-Ш запас площади составил 10%. За счет излишка более 10% был увеличен нагрев питательной воды (уменьшен недогрев до температуры насыщения) без изменения общей площади теплопередающей поверхности аппарата.

** По техническому заданию гидравлическое сопротивление по тракту питательной воды на один подогреватель составляет 0.1 МПа.

Таблица 2. Результаты расчета теплогидравлических характеристик на участке конденсации пара

Характеристика	Подогреватель			
	ПВД-Ш-5	ПВД-Ш-6	ПВД-К-5	ПВД-К-6
Средняя скорость потока конденсирующегося пара, м/с	2.35	1.28	0.81	0.40
Критерий Re конденсатной пленки на вертикальных участках труб	106.0	76.8	96.75	74.30
Температурный напор пар – стенка на горизонтальных участках труб, К	2.94	1.72	–	–
Средний коэффициент теплоотдачи, Вт/(м ² · К):				
$\alpha_{н/п.в}$	11524	11800	10890	11900
$\alpha_{дв.в}$	14670	12270	–	–
$\alpha_{н/п.г1}$	20460	25554	–	–
$\alpha_{н/п.гп}$ при $n_p = 17$	10076	12680	–	–
$\alpha_{дв.г1}$	25110	28296	–	–
$\alpha_{дв.гп}$ при $n_p = 17$	18700	21750	–	–
$\alpha_{дв.и}$	17730	18460	–	–
$\alpha_{п.в}$	19000	20218	16136	16550
Средняя скорость питательной воды на участке конденсации пара, м/с	2.37	2.45	1.88	1.93
Коэффициент теплопередачи, Вт/(м ² · К)	5576	5775	4424	4623

где w – средняя скорость потока конденсирующегося пара; B , n_p – комплексы теплофизических параметров пара.

Средний коэффициент теплоотдачи при пленочной конденсации неподвижного или медленно движущегося пара на пучке горизонтальных труб (аналог – ПВД-К горизонтального типа на энергоблоке № 5 НВАЭС) вычисляются по формулам [3]:

для труб первого ряда

$$\alpha_{н/п.г1} = 0.725C (1/d)^{0.25}; \quad (4)$$

для пучка с числом рядов n_p

$$\alpha_{н/п.гп} = \alpha_{н/п.г1} (1/n_p)^{0.25}, \quad (5)$$

где C – комплекс теплофизических параметров пара; d – наружный диаметр труб, м; n_p – число рядов по вертикали в одной вертикальной плоскости (как в ПВД-К горизонтального типа, в том числе на энергоблоке № 5 НВАЭС) между перегородками (желобами), отводящими конденсат от теплопередающей поверхности.

Средний коэффициент теплоотдачи при конденсации движущегося пара на пучке горизонтальных труб (как в ПВД-Ш) определяется по формулам [3]:

для труб первого ряда

$$\alpha_{дв.г1} = 1.24D\alpha_{н/п.г1}; \quad (6)$$

для пучка с числом рядов n_p

$$\alpha_{дв.гп} = \alpha_{дв.г1} E (1/n_p)^{0.07}, \quad (7)$$

где D , E – комплексы теплофизических параметров пара.

Средний (интегральный) коэффициент теплоотдачи при конденсации движущегося пара на наружной поверхности пучка горизонтальных и вертикальных труб определяется по формуле

$$\alpha_{дв.и} = (\alpha_{дв.гп} F_G + \alpha_{дв.в} F_B) / (F_G + F_B), \quad (8)$$

где F_G , F_B – наружная площадь поверхности пучка горизонтальных и вертикальных труб.

В табл. 2 приведены результаты расчета тепло-гидравлических характеристик ПВД-К и ПВД-Ш на участке конденсации пара, который был выполнен в полном соответствии с руководящими материалами [2, 3]. Как следует из таблицы, значение интегрального коэффициента теплоотдачи при конденсации пара в ПВД-Ш, вычисленное по формулам (2), (6)–(8), на 63% больше, чем значение для в ПВД-К, рассчитанное по формуле (1).

Значения коэффициента теплоотдачи питательной воды при турбулентном течении внутри труб $\alpha_{т.в}$ и коэффициента теплопередачи на участке конденсации пара определялись по общепринятой методике [2]. Коэффициент теплопередачи на участке конденсации пара в ПВД-Ш выше, чем в ПВД-К, на 26% при одинаковом термическом сопротивлении теплообменных труб.

Расчет теплопередающей поверхности ПВД-Ш и ПВД-К при охлаждении конденсата был выполнен по общепринятым методикам [2].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПВД-Ш

Высокая надежность подогревателей ПВД-Ш при их эксплуатации в сравнении с ПВД-К достигается благодаря следующим их конструктивным особенностям:

- количество сварных швов закрепления труб в коллекторе меньше примерно на 22%, чем в трубной доске ПВД-К;

- вследствие того что толщина стен цилиндрического коллектора в местах закрепления труб примерно в 5 раз меньше по сравнению с плоской трубной доской в ПВД-К, термические напряжения ниже в переходных режимах, а также при пусках-остановах;

- основные узлы ПВД-Ш (коллекторы, фланцевые разъемы, змеевики теплопередающей поверхности, крепление труб в коллекторе) по конструкции, составу конструкционных материалов, технологии изготовления и ремонту идентичны соответствующим узлам парогенераторов ПГВ-440 и ПГВ-1000М, отработанным до высокой надежности за более чем 40-летний период их эксплуатации на АЭС.

Процесс изготовления подогревателей ПВД-Ш менее трудоемок (примерно на 20%), чем изготовление ПВД-К, вследствие уменьшения:

- суммарной длины сверления и развертывания отверстий в коллекторе, в которых закрепляются трубы (в сравнении с плоской трубной доской) – приблизительно в 6 раз;

- количества мест закрепления труб в коллекторе, для которых необходимы развальцовка, об-

варка, контроль прочности и плотности, – примерно на 22%;

- массы поковок и, следовательно, времени, затрачиваемого на обработку их припусков, – почти в 7 раз.

Сроки изготовления подогревателей ПВД-Ш в 1.5 раза меньше сроков изготовления подогревателей ПВД-К благодаря предварительной сборке труб в ширмы (теплообменные модули), меньшим количеству труб и затратам времени на обработку поковок, сверление отверстий и закрепление труб в трубных досках.

Толщина стенок цилиндрических коллекторов в подогревателях ПВД-Ш существенно меньше вследствие увеличенного продольного (вдоль оси коллектора) шага расположения отверстий для закрепления концов труб. При этом высота трубного пучка практически мало изменяется, но в технологическом отношении изготовление труб по эвольвенте более сложное, чем изготовление U-образных труб в ПВД-К.

Малая металлоемкость подогревателей ПВД-Ш в сравнении с ПВД-К достигается благодаря меньшим значениям следующих показателей:

- площади теплопередающей поверхности;
- площади поверхности труб, расположенных в местах закрепления в трубном коллекторе, по сравнению с трубными досками;

- массы поковок;
- толщины стенок цилиндрического коллектора в сравнении с плоской трубной доской;

- внутреннего диаметра и толщины стенки цилиндрического коллектора питательной воды в сравнении с внутренним диаметром и толщиной стенки водяной камеры питательной воды в ПВД-К.

Размещение на нижнем и верхнем днищах корпуса люков-лазов, с помощью которых возможно проводить ревизию и ремонт доступных внутрикорпусных узлов, обеспечивает более высокую ремонтпригодность подогревателей ПВД-Ш в сравнении с ПВД-К. Ревизия и отглушение текущих теплопередающих труб изнутри цилиндрического коллектора с обваркой заглушек производится сварщиком в его естественном (вертикальном) положении. Напротив, в ПВД-К для отглушки труб требуется выполнять самые сложные потолочные сварные швы в ограниченном пространстве водяной камеры.

Пуски и остановки подогревателей ПВД-Ш, а также переходные режимы протекают с большей маневренностью. Это обусловлено тем, что стенки коллектора имеют меньшую толщину, поэтому скорости прогрева и охлаждения металла более высокие по сравнению с трубной доской в

ПВД-К. Для предварительного прогрева подогревателя до температуры выше критической температуры хрупкости материала цилиндрического коллектора (трубной доски и водяной камеры) перед пуском питательных насосов и при проведении гидравлических испытаний (гарантия отсутствия условий для хрупкого разрушения) не требуется организация предпусковой схемы.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЕКТА ПО СОЗДАНИЮ ПОДОГРЕВАТЕЛЕЙ ПВД-Ш

Работы по созданию ПВД-Ш проводились с начала 80-х годов прошлого века во ВНИИАМ. Технический и рабочий проекты ПВД-Ш для АЭС с ВВЭР-1000 с трубным пучком из плоскоэвольвентных ширм в одноступенчатом исполнении при двух ступенях подогрева, т.е. два аппарата на один энергоблок, были разработаны в 1989 г. [1]. Сотрудники ВНИИАМ совместно с НПО «ЦНИИТмаш» и Атоммаш разработали и опробовали технологии изготовления натуральных W-образных плоских и эвольвентных ширм и сборки их с коллектором для различного теплообменного оборудования.

Для проверки и обоснования новых конструкторских решений, заложенных в разработанный подогреватель, на Атоммаше была изготовлена модель подогревателя и проведены экспериментальные исследования на стенде ВНИИАМ тепловой мощностью 5 МВт при давлении греющего пара от 1.4 до 2.8 МПа. Модель представляла собой вертикальный корпус диаметром 1 м и высотой 10 м. Теплопередающая поверхность была выполнена из трех вертикальных W-образных ширм высотой 7 м, изогнутых в поперечном сечении по эвольвенте. Каждая ширма состояла из 17 труб типоразмером 16.0×1.5 мм из стали 08X18H10T.

Были проведены балансовые испытания модели, определены коэффициенты теплоотдачи, теплопередачи, получены результаты вибрационных испытаний, которые показали удовлетворительную сходимость по воспринятому теплу. Напряжения, возникающие в трубах от вибрации и замеренные в самых жестких условиях работы, были значительно ниже допустимых.

В 2006–2010 гг. по заказу АО «Концерн Росэнергоатом» был разработан и согласован технический проект ПВД-Ш применительно к проекту АЭС-2006. В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» совместно с АЭП, ВНИИАМ, ЛМЗ и ЦКТИ планируется концептуальная проработка паротурбинной установки с ПВД-Ш для перспективного энергоблока АЭС с РУ ВВЭР-СКД.

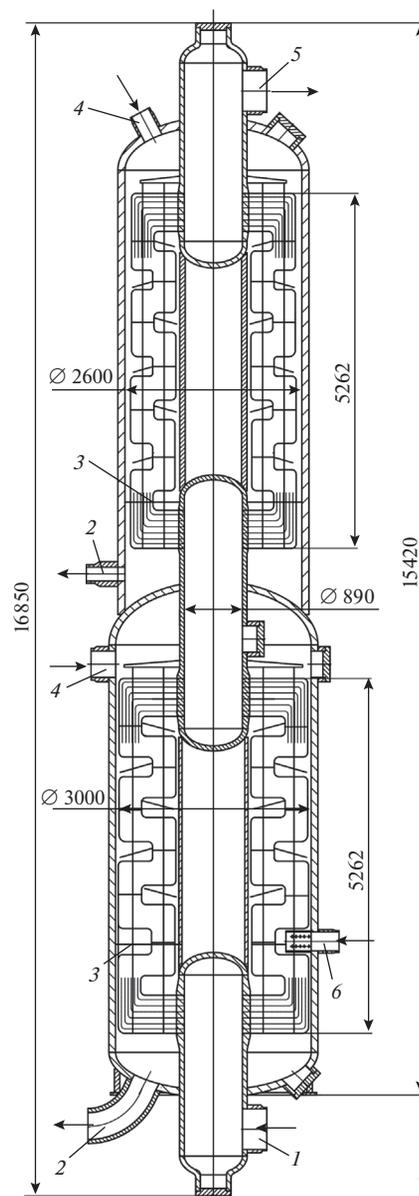


Рис. 5. Сдвоенный подогреватель коллекторно-ширмового типа с трубными пучками из эвольвентных ширм в двухступенчатом исполнении. 1–5 – см. рис. 1; 6 – вход конденсата

КОНСТРУКТИВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА ПОДОГРЕВАТЕЛЯ ПВД-Ш НА ПРИМЕРЕ АЭС-2006

В целях исследования эффективности применения подогревателей с коллекторно-ширмовой трубной системой был разработан ряд подогревателей высокого давления на параметры проекта АЭС-2006 различной мощности с трубным пучком из эвольвентных ширм (рис. 5–7).

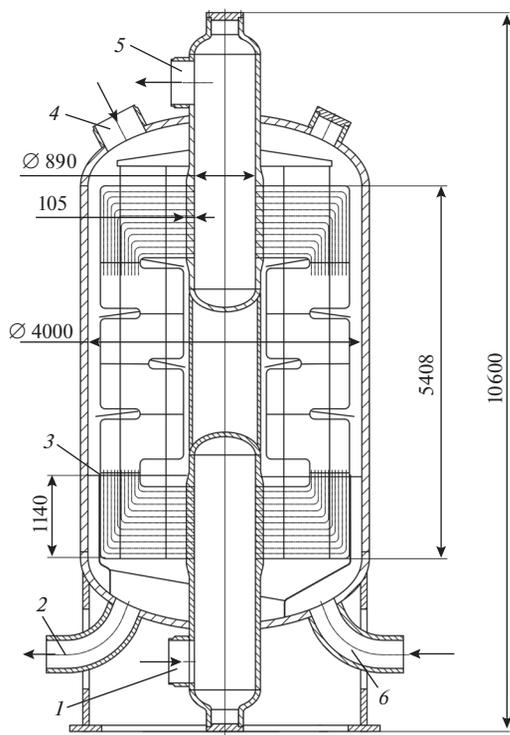


Рис. 6. Подогреватель коллекторно-ширмового типа с трубным пучком из эвольвентных ширм в однониточном исполнении (ПВД-Ш-5).
1–5 – см. рис. 1; 6 – вход конденсата

Для исключения из тепловой схемы трубопроводов питательной воды большого диаметра, соединяющих подогреватели ПВД-Ш-5 и ПВД-Ш-6 одной группы, а также сокращения площади машинного (турбинного) зала, занятой оборудованием, был разработан перспективный теплообменный аппарат в двухниточной схеме, совмещающий в одном корпусе два подогревателя высокого давления одной группы – ПВД-Ш-5 и ПВД-Ш-6 (см. рис. 5).

При течи в одном из последовательно работающих ПВД (отдельно стоящих) одной группы отключается целиком вся группа, а питательная вода направляется в обход группы по байпасу, затем она смешивается с питательной водой работающих ПВД параллельной группы и направляется в парогенератор. Совмещенный подогреватель в двухниточной схеме представляет собой единый вертикальный аппарат, корпус которого в верхней части (ПВД-Ш-6) имеет внутренний диаметр 2600 мм, а в нижней части (ПВД-Ш-5) – 3000 мм. Общая высота составляет 15420 мм. По торцам теплообменный аппарат закрыт эллиптическими днищами, в центре которых закреплены вертикальные коллекторы. Верхнее днище корпуса

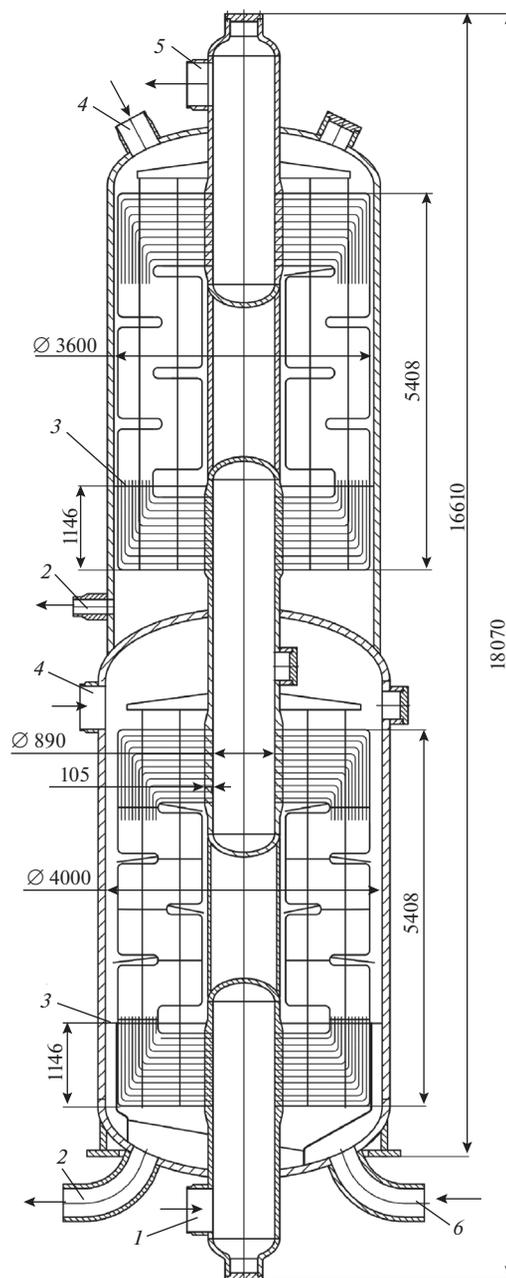


Рис. 7. Сдвоенный подогреватель коллекторно-ширмового типа с трубными пучками из эвольвентных ширм в однониточном исполнении.
1–5 – см. рис. 1; 6 – вход конденсата

ПВД-Ш-5 является одновременно нижним днищем корпуса ПВД-Ш-6, т.е. служит средним днищем для обоих подогревателей, в котором закреплены одновременно верхний коллектор ПВД-Ш-5 и нижний коллектор ПВД-Ш-6. Коллекторы соединены один с другим и образуют единый перепускной коллектор питательной воды. В кольцевом пространстве между корпусом и коллектором

Таблица 3. Технические характеристики подогревателей коллекторно-ширмового типа с трубным пучком из эвольвентных ширм для турбоустановки К-1200-6.8/50 (АЭС-2006)

Характеристика	Двухниточная схема		Однониточная схема	
	две ступени подогревателей в одном аппарате	ПВД-Ш-5	ПВД-Ш-6	две ступени подогревателей в одном аппарате
Тепловая мощность аппарата, МВт	127.34 + 60.593 = 187.933	254.68	121.186	254.68 + 121.186 = 375.866
Число подогревателей в группе (нитке)	1			
Число подогревателей на блок	2	1		
Диаметр корпуса внутренний, мм	2600/3000*	4000	3600	3600/4000*
Высота, мм:				
подогревателя	15 420	10 600	10 360	16 610
трубного пучка	5262/5262*	5408		5408/5408*
Площадь поверхности теплообмена, м ²	1915/2600*	5203	4210	4210/5203*
Недогрев питательной воды, °С	1.7/1.9*	1.9	1.7	1.7/1.9*
Недоохлаждение конденсата, °С	7.0/7.0*	7.0	1.5	1.5/7.0*
Гидравлическое сопротивление тракта питательной воды, МПа	0.1 + 0.1 = 0.2	0.1		0.1 + 0.1 = 0.2
Масса аппарата, т	122	125	100	213

* В числителе – значения для верхней части аппарата (ПВД-Ш-6), в знаменателе – для нижней части аппарата (ПВД-Ш-5).

в каждом подогревателе расположены трубные пучки, состоящие из эвольвентных ширм. Концы теплообменных труб закреплены в коллекторах. Высота подогревателя обеспечивает его монтаж под площадкой обслуживания турбоагрегата (отметка +16.00 м). Технические характеристики подогревателя, совмещающего в одном корпусе две ступени подогрева (ПВД-Ш-5 и ПВД-Ш-6) одной группы в двухниточной схеме, приведены в табл. 3. Масса перепускных трубопроводов питательной воды между подогревателями группы сокращена, кроме того, масса аппаратов уменьшена на 7.5% (или на 20 т) на блок в сравнении с массой этих же подогревателей, приведенной в табл. 1. Разработанный теплообменный аппарат позволяет снизить гидравлическое сопротивление группы подогревателей по питательной воде, а также уменьшить количество фундаментов в 2 раза.

В целях перехода с двухниточной схемы на классическую однониточную с двумя ступенями подогрева были разработаны ПВД-Ш-5 и ПВД-Ш-6 с

увеличенной в 2 раза тепловой мощностью каждого (см. рис. 6). Технические характеристики подогревателей представлены в табл. 3. Оба подогревателя выполнены по конструктивной схеме, аналогичной двухниточной схеме. Диаметры коллектора не изменены. Увеличены диаметры корпусов и количество труб в ширме. Количество труб и диаметры корпусов подогревателей приняты исходя из скоростей теплоносителей в межтрубном и трубном пространствах на уровне, принятом в подогревателях двухниточной схемы, или немного выше, поэтому коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи остаются прежними.

Переход на однониточную схему позволяет сократить площадь машинного зала, занятую оборудованием, уменьшить массу трубопроводов греющего пара, подвода и отвода конденсата, количество арматуры, контрольно-измерительных приборов, а также количество фундаментов в 2 раза. Снижается также гидравлическое сопротивление рабочих сред благодаря увеличению

диаметров их трубопроводов. Кроме этого, результаты разработки показали, что масса аппаратов уменьшается на 39 т на блок в сравнении с ПВД-Ш для двухниточной схемы. При течи в одном из ПВД односточной группы отключается целиком вся группа и питательная вода направляется в обход ее по байпасу в парогенератор.

Регламентом работы парогенератора предусмотрены режимы с поступлением питательной воды в парогенератор, минуя ПВД, по байпасу непосредственно из деаэратора при температуре выхода из питательных насосов. К тому же безаварийная эксплуатация горизонтальных ПВД на энергоблоке № 5 НВАЭС с трубным пучком из нержавеющей стали и вертикальной трубной доской (как в ПВД-Ш – трубный пучок из нержавеющей стали и вертикальный коллектор, в котором закреплены трубы) показала их надежную работу. Все вышесказанное является достаточным обоснованием для реализации данного решения.

Для дальнейшего сокращения площади машинного зала, занятой оборудованием, и количества трубопроводов обвязки подогревателей была разработана конструкция односточного подогревателя с двумя ступенями подогрева в одном корпусе (см. рис. 7). Конструктивная схема подогревателя выполнена аналогично схеме сдвоенного подогревателя для двухниточной схемы (см. рис. 5). Технические характеристики подогревателя представлены в табл. 3. Высота теплообменного аппарата (16.61 м) превышает высоту площадки обслуживания турбоагрегата (отметка +16.00 м). Для обеспечения возможности его монтажа под площадкой обслуживания турбины необходимо уменьшить высоту бетонной опоры под ПВД-Ш на 1.2 м. При течи в одном из ПВД отключается целиком аппарат, и питательная вода направляется в обход аппарата по байпасу в парогенератор.

ВЫВОДЫ

1. Сопоставление вертикальных коллекторно-ширмовых подогревателей высокого давления с вертикальными подогревателями камерного типа паротурбинных установок АЭС показало следующее:

в предлагаемых подогревателях обеспечивают высокие скорости потока конденсирующегося пара и лучшие теплогидравлические характеристики в межтрубном пространстве;

схема потока конденсирующегося пара в межтрубном пространстве, а также конструкция трубного пучка позволяют организовать эффективную

многоступенчатую систему последовательного отвода конденсата от теплопередающей поверхности;

использование цилиндрического трубного коллектора вместо трубной доски обеспечивает существенное уменьшение толщины стенки коллектора и, соответственно снижение его массы, а также повышение ресурса благодаря исключению возможности накопления шлама в местах крепления труб к трубному коллектору;

удобство технического обслуживания аппарата достигается возможностью доступа к трубам, закрепленным в верхнем и нижнем цилиндрических вертикальных трубных коллекторах, через люки-лазы, обеспечивающие возможность эргономичного глушения неисправных труб;

сокращение срока изготовления аппарата и снижение трудоемкости монтажных работ достигаются благодаря использованию унифицированных трубных ширм (теплообменных модулей), а также меньшей длины отверстий для крепления труб.

2. На основе предлагаемой конструкции разработан ряд теплообменных аппаратов, использование которых позволит существенно сократить площадь, занимаемую в машинном зале, и упростить схему соединительных трубопроводов, что невозможно в варианте с подогревателями камерного типа.

3. Применение аппаратов с коллекторно-ширмовой трубной системой обеспечивает повышение надежности турбоустановки благодаря уменьшению площади поверхностей оборудования и трубопроводов, количества и протяженности сварных швов, находящихся под давлением.

4. Преимущества предлагаемых подогревателей с коллекторно-ширмовой трубной системой позволяют рассматривать их в качестве перспективы для действующих и проектируемых паротурбинных установок АЭС и существенно повышают конкурентоспособность отечественного атомного энергомашиностроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев А.А., Шамароков А.С., Фальковский Л.Н. Подогреватели высокого давления коллекторно-ширмового типа // Теплоэнергетика. 2009. № 2. С. 51–56.
2. РД 24.035.05-89. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. М.: Минэнергомаш, 1989.
3. РТМ 108.291.23-84. Расчет и проектирование поверхностных подогревателей высокого и низкого давления. М.: Минэнергомаш, 1986.

The New Generation of High-Pressure Heaters for Steam Turbine Units of Power Units at Nuclear Power Plants

V. M. Zorin^{a,*}, A. S. Shamarokov^{b,**}, and S. B. Pustovalov^{c,***}

^a*National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia*

^b*All-Russia Research and Design Institute of Nuclear Power Machine Building (VNIAM), Moscow, 115088 Russia*

^c*National Research Center (NRC) Kurchatov Institute, Moscow, 123182 Russia*

**e-mail: ZorinVM@mpei.ru*

***e-mail: rasa7@mail.ru*

****e-mail: Pustovalov_SB@nrcki.ru*

Abstract—The designs of vertical high-pressure heaters (HPHs) for a regeneration system of steam-turbine units (STUs) at nuclear power plants are compared. The proposed heat exchanger with a header-platen tube system is compared with a conventional counterpart by thermohydraulic and design characteristics, weight and dimensions, and performance indicators. Excellent thermohydraulic performance of the proposed apparatus are brought about by the effective condensation due to a high velocity of the condensing steam flow in the shell's side. The tube bundle consists of standardized platens, the spacing between which can vary in a wide range. The introduction of a cylindrical tube header in place of the tube sheet considerably decreases the wall thickness with a corresponding reduction in the apparatus weight and also prolongs the service life due to elimination of sludge build-up at tube-to-tube header attachment points. Easy maintenance of these heaters is enabled by the access to tubes fixed in the upper and lower vertical cylindrical tube headers through manholes to ergonomically plug faulty tubes. The manufacturing time of the apparatus exchanger and the man-hours for its installation decrease due to the application of standardized tube platens and a shorter length of tube attachment holes. The proposed design has been used as the basis for developing a series of heat exchangers for installation at operating and newly designed power units of NPPs. These apparatuses can accommodate two series-connected, two parallel-connected, or two-series-connected and two parallel-connected HPHs in a single shell, thereby reducing the footprint occupied in a turbine hall. The above-mentioned features of the developed apparatuses are important in the reconstruction (or modernization) of operating NPP power units when the steam capacity of a nuclear steam generating plant is to be increased. The introduction of the proposed apparatuses opens the new way to the optimization of the design, process, and space-and-layout solutions for the regeneration systems of existing and newly designed steam turbine units with a corresponding reduction in operating costs and capital investments in the construction or reconstruction of NPP power units.

Keywords: NPP steam turbine unit, regeneration system, high-pressure heaters, condensation, tube sheet, heat-transfer coefficient, vertical cylindrical header