

Раздел шестой
**ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОУСТАНОВКИ ДЛЯ
 ПРОИЗВОДСТВА ТЕПЛОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ**
6.4. ПРИМЕНЕНИЕ ВОЗДУШНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

6.4.1. Анализ применения воздушных конденсаторов в энергетике

Клевцов А.В., Пронин В.А.; МЭИ(ТУ)

Анализ конструкций и особенностей эксплуатации воздушных конденсаторов

В энергетике ВК в течение продолжительного времени использовались только для паровых турбин малой мощности — от 1 до 15 МВт. Впервые для более мощной турбины (160 МВт) ВК был применен на ТЭС Утриллас, сооруженной в 1970 г. в маловодном районе Испании. Конденсатор был изготовлен фирмой GEA (Германия). В процессе его проектирования, сооружения и эксплуатации были разработаны и апробированы технические решения, позволившие в дальнейшем применять ВК для турбин еще большей мощности и при более суровых

климатических условиях. Это подтвердил длительный опыт эксплуатации (с 1978 г.) ВК той же фирмы, которой была оснащена турбина мощностью 365 МВт на ТЭС Уайодек в штате Вайоминг (США).

В настоящее время ВК работают в Южной Африке на шести турбинах мощностью 665 МВт на ТЭС Матимба и шести турбинах мощностью до 657 МВт на ТЭС Майуба. Фирма «Бальке-Дюрр» (ФРГ) поставили ВК для турбин мощностью 150 МВт на ТЭС Тусс в Иране.

Некоторые данные о ВК приведены в [1] и представлены в табл. 6.28.

Таблица 6.28. Технические характеристики воздушных конденсаторов

Наименование	ТЭС		
	Утриллас	Уайодек	Матимба
Мощность турбины, МВт	160	365	665
Расчетные условия:			
Расход отработавшего пара, т/ч	349,2	858	1588
Противодавление*, кПа	11,7	20,3	22
Температура наружного воздуха, °С	15	18,9	23
Конденсатор:			
число модулей	40	69	48
диаметр вентиляторов, м	5,6	6,4	9,15
частота вращения вентиляторов, об/мин	220/115	180/190	—
мощность, потребляемая электродвигателем, кВт	60/20	75/18	—
доля мощности, потребляемая вентиляторами**, %	1,5	1,6	1,7
площадь основания конденсатора, м ²	2900	5480	—

* При скорости ветра до 5 м/с.

** При работе всех вентиляторов с полной частотой вращения.

Ранние конструкции ВК имели модули с вертикальными или расположенными под некоторым углом к вертикали пучками ребристых труб. Отработавший пар подается в трубы из расположенного сверху коллектора, а неконденсирующиеся газы (в основном воздух) и конденсат удаляются из нижнего коллектора (рис. 6.15). Течение пара и конденсата в трубах — спутное, нисходящее. Тяга воздуха, поперечно омывающего трубы снаружи, искусственная (преимущественно расположенные снизу нагнетательные вентиляторы) или естественная (вытяжные башни).

Поскольку в результате нагрева воздуха температурный напор пар—воздух понижается в направлении его движения в пучке, соответственно увеличивается протяженность участка трубы, в пределах которого происходит активная конденсация пара: этот участок оказывается наименьшим со стороны входа в пучок холодного воздуха и наибольшим со стороны выхода подогретого воздуха. Ниже участка активной конденсации трубы оказываются заполненными паровоздушной смесью с малой концентрацией пара, и температура стекающего здесь конденсата понижается, приближаясь к температуре охлаждающего воздуха. При отрицательных наружных температурах здесь возможно образование льда, приводящее к разрушению труб.

Некоторое выравнивание тепловой нагрузки труб, расположенных по пути движения воздуха, может быть

достигнуто путем изменения степени их оребрения — установкой со стороны входа воздуха труб с наибольшим, а

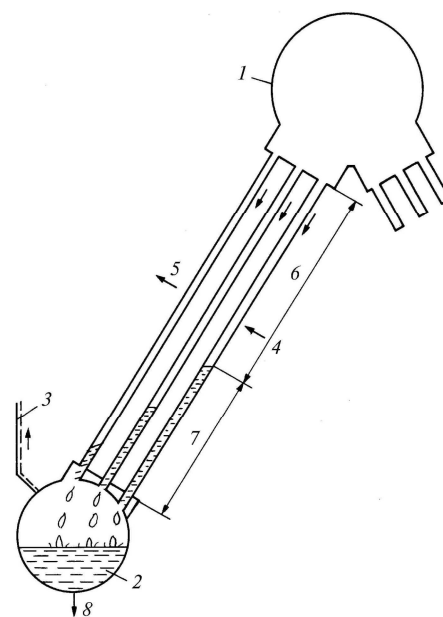


Рис. 6.15. Модуль одноступенчатого воздушного конденсатора
 1 — парораспределительный коллектор; 2 — коллектор отвода конденсата; 3 — к эжектору; 4 — холодный воздух; 5 — подогретый воздух; 6 — зона конденсации; 7 — зона охлаждения паровоздушной смеси и конденсата; 8 — в конденсатосборник

со стороны выхода воздуха с наименьшим шагом между ребрами. Кроме того, для предотвращения замерзания конденсата в холодное время, применяется конструкция с двумя ступенями конденсации.

Двухступенчатый воздушный конденсатор GEA (рис. 6.16) имеет Л-образные модули двух типов, последовательно включенные по паровой стороне.

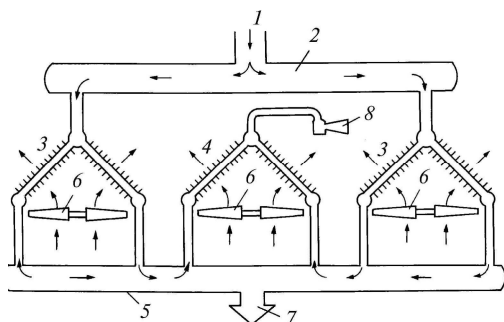


Рис. 6.16. Конструкция двухступенчатого воздушного конденсатора GEA:

1 — отработавший пар; 2 — парораспределительный коллектор; 3 — модули первой ступени конденсации; 4 — модуль второй ступени конденсации; 5 — коллектор перепуска пара и отвода конденсата; 6 — нагнетательный вентилятор; 7 — в конденсатосборник; 8 — эжектор

Модули первой ступени рассчитываются на конденсацию примерно 85 % поступающего в трубы пара. При спутном движении в них пара и конденсата температура последнего остается при всех режимах положительной. Оставшийся несконденсировавшимся пар перепускается по расположенному снизу коллектору в противоточные модули второй ступени. Здесь пар, поступая в трубы снизу, навстречу стекающему в нижний коллектор конденсату, подогревает его. Конденсат стекает из нижнего коллектора в конденсатосборник, а неконденсирующиеся газы отсасываются из верхней части этого модуля эжектором.

При примененной во всех более крупных ВК искусственной вентиляции регулирование их работы осуществляется в зависимости от нагрузки конденсатора и температуры наружного воздуха, а также показаний датчиков температуры конденсата за отдельными модулями путем изменения числа включенных вентиляторов и частоты их вращения (приводные электродвигатели обычно выполняются двухскоростными).

На рис. 6.17 представлена другая конструкция двухступенчатого конденсатора, изготавливаемого фирмой «С-Е Люммас» (США), а по лицензии — также фирмой «Мицубиси» (Япония). Она отличается тем, что Л-образные модули имеют горизонтальные U-образные ребристые трубы и в каждом модуле имеются пучки как первой, так и второй ступени конденсации. Отработавший пар из турбины подводится по расположенному снизу горизонтальному паропроводу, от которого отходят направленные вверх под некоторым углом к вертикали распределительные стояки. Из стояков пар поступает в трубы первой ступени конденсации и из последних вместе с конденсатом — в опускные трубы, присоединенные к горизонтальной сливной конденсатной линии. Пар из опускных труб первой ступени поступает в трубы второй ступени, имеющие свои опускные трубы, присоединенные к той же сливной конденсатной линии. Последняя имеет со стороны ее открытого конца подпорную петлю, благодаря чему в нижней части каждой опускной трубы поддерживается столб воды. Это

исключает возможность разделения фаз в сливной трубе и образование в ней парового объема, через который пар мог бы при неоднородном падении давления в рабочих трубах поступать в них снизу со стороны выходного сечения. Опускные трубы второй ступени конденсации имеют сверху перемычки, через которые неконденсирующиеся газы отсасываются эжектором. Такие конденсаторы применены пока только на относительно небольших электростанциях. Они достаточно хорошо показали себя в районах с холодным климатом (по фирменным данным при температурах до $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$) при переменных режимах работы.

В крупных воздушных конденсаторах GEA применяются трубы из углеродистой стали с надетыми на них стальными ребрами, имеющими конические воротники. Труба с ребрами после соответствующей ее предварительной обработки погружается в расплавленный легированный сплав цинка, образующий гомогенное покрытие толщиной 60 мкм. Это покрытие, обеспечивающее хорошее соединение ребер с трубами, обладает достаточной теплопроводностью и защищает оребренные трубы от коррозии со стороны охлаждающего воздуха. В эксплуатации находятся такие трубы, прослужившие без повреждений 25—30 лет и более.

Сечение труб — эллиптическое или овальное с соотношением осей 4:1 и более, располагаются они в пучке в шахматном порядке. Благодаря вытянутой форме сечения такие трубы в случае замерзания в них при экстремальных условиях конденсата деформируются (расширяются в направлении малой оси сечения) без заметного утонения и разрушения стенки, вследствие чего не возникает необходимости в немедленном прекращении эксплуатации конденсатора (или модуля, если он имеет задвижку на входе в него пара из распределительного коллектора).

Большой интерес представляет опыт эксплуатации одного из крупнейших в мире ВК, установленного на электрической станции Уайодек (США). Станция расположена в безводной, но богатой углем области. Воздушный конденсатор стал доминирующим элементом в конструкции всего блока, имеющего мощность 330 МВт. Размеры ВК, большое число вентиляторов, а также край-

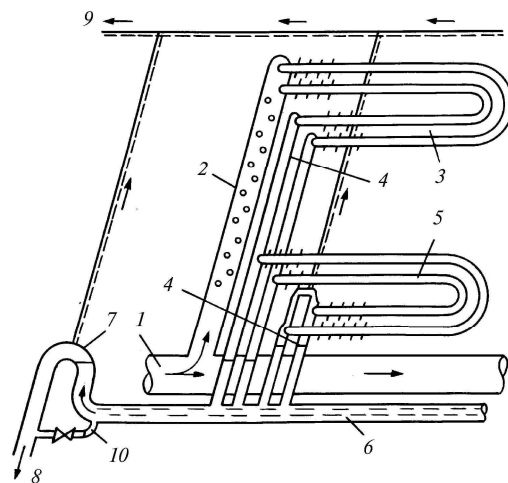


Рис. 6.17. Модуль двухступенчатого конденсатора фирмы «С-Е Люммас»:

1 — отработавший пар; 2 — парораспределительный коллектор; 3 — трубы первой ступени конденсации; 4 — опускные трубы; 5 — трубы второй ступени конденсации; 6 — конденсатопровод; 7 — подпорная петля; 8 — трубопровод в конденсатосборник; 9 — трубопровод к эжектору; 10 — байпас для опорожнения

не сложные условия эксплуатации в летнее и зимнее время требовали особого подхода на всех стадиях проектирования, разработки, изготовления, строительства, испытаний и эксплуатации. Особое внимание было уделено эксплуатационным испытаниям. Информация, собранная за период эксплуатации продемонстрировала позитивные технические и экономические особенности ВК, а также их экологическую безопасность. Конденсатор состоит из 22 стандартных конденсатных групп. Каждая группа содержит в себе три модуля. Модуль представляет А-образную структуру, имеющую шесть охлаждающих элементов. Вентилятор направляет поток охлаждающего воздуха по направлению оси в режиме принудительной тяги. Каждый охлаждающий элемент содержит несколько рядов труб со стальными гальванизованными ребрами. Кроме того, данный ВК включал в себя модули с более длинными ребристыми трубами с большим поперечным сечением. Эти модули являются частью конденсационной системы и предназначены для сокращения числа вентиляторов и упрощения эксплуатации ВК в зимнее время. Такие модули получили название К-модули или конденсатные модули. Приблизительно 75 % пара конденсируется в К-модуле. В центре группы расположен так называемый Д-модуль или дефлегматор. В Д-модуле предотвращается переохлаждение конденсата противоточным движением паровоздушной смеси и конденсата. Что касается неконденсирующихся газов, то они отводятся из системы эжекторами. Модуль, состоящий из двух К-модулей и одного Д-модуля, называется К-Д-группой. Такого типа модули используются в США с 1969 г. Эти модули, как показали результаты эксплуатации, более надежны и эффективны в сравнении с модулями других конструктивных оформлений ВК. Так как поток охлаждающего воздуха является единственным изменяемым параметром, при помощи которого можно достигнуть требуемого вакуума, в конденсационной установке предусмотрено 18 комбинаций скоростей вентиляторов, обеспечивающих достаточно широкий диапазон регулирования. Для каждой температуры окружающей среды определен свой режим включения вентилятора, что обеспечивает наибольшую эффективность.

Более сложные проблемы при эксплуатации ВК возникали при низких температурах окружающей среды. При отрицательных температурах охлаждающего воздуха в некоторых трубках имело место замерзание конденсата. Однако эллиптическая форма трубок, по мнению разработчиков, не привела к разгерметизации. Несмотря на это деформированные трубки были заменены. Подготовка конденсатора к пуску занимает не более 30 мин.

Вытянутая в направлении движения воздуха эллиптическая форма сечения труб приводит к уменьшению падения давления воздуха в трубном пучке и способствует более эффективной очистке наружной поверхности труб путем ее обдувки. В тех случаях, когда в результате смешения атмосферных осадков с содержащимися в воздухе твердыми примесями на поверхности труб образуется прочно прилипший слой загрязнений, для его удаления применяется струя воды высокого давления (до 25 МПа). Это обстоятельство является одним из существенных доводов в пользу применения более прочных стальных ребер, а не алюминиевых, применяющихся в ряде случаев. Прочность прямоугольных ребер увеличивают также расположенные у их внешней кромки дистанционные элементы.

Следует отметить, что представленные в работе данные испытаний и эксплуатации вызывают определенное недоверие вследствие недостаточности измерений и даже точности измеренных параметров.

В заключении авторы работы делают вывод, что воздушное охлаждение не только на электростанциях, но и на промышленных предприятиях США зарекомендовало себя как экономически выгодное, особенно в районах с дефицитом воды, а также экологически безопасное. Применение ВК быстро распространяется в США при увеличивающихся потребностях по вводу новых мощностей, а также растущих ценах на получение и транспортировку воды.

В табл. 6.29 приведены данные по эксплуатации конденсатора ТЭС Уайодек.

Таблица 6.29. Данные по эксплуатации конденсатора ТЭС Уайодек

Показатель	Год					
	1978	1979	1980	1981	1982	
Число часов работы	3750*	7324	8087	7809	7883	
Коэффициент готовности, %	76	84	92,1	89,1	90,0	
Температура наружного воздуха, °С						
	минимальная	-44,5	-29,5	-24,5	-27	-31
	максимальная	38,5	38,0	41,2	40	41

* С июня месяца.

Поскольку площадь основания ВК больше, чем площадь машинного зала, они располагаются на специальной стальной опорной конструкции или над перекрытием машинного зала (на электростанции Утриллас и некоторых менее мощных ТЭС) или перед его фронтом. Между платформой конденсатора и перекрытием машинного зала или уровнем земли оставляется достаточное расстояние для доступа атмосферного воздуха к вентиляторам.

Выбор системы сухого охлаждения и размеров ее основных элементов сильно зависит от ряда местных условий. В качестве примера в табл. 6.30 приведены результаты расчетов фирмы GEA для блока мощностью 500 МВт с параметрами пара перед турбиной 17 МПа, 538/538 °С применительно к климатическим условиям ФРГ (район г. Эссена). Рассмотрены четыре варианта: применение воздушного конденсатора (ВК) и оборотной системы водоснабжения с сухой охлаждающей башней (СОБ) при искусственной тяге (вентиляторах) в обоих случаях и те же две системы при естественной тяге (железобетонных вытяжных башнях). Для всех вариантов приняты следующие расчетные условия: расход отработавшего пара 1006 т/ч, его параметры: давление 11,7 кПа и температура 49 °С, температура наружного воздуха 9 °С. Предусмотрены стальные трубы и ребра, подвергшиеся горячему цинкованию.

Расчетные характеристики четырех систем приведены на рис. 6.18. Характеристики турбин (зависимость экономичности от противодавления) зависят от удельной нагрузки площади выхода последних ступеней (рис. 6.19).

Обычные турбины с удельной нагрузкой площади выхода 20 МВт/м² при ВК непригодны, так как допускают работу без понижения их нагрузки по сравнению с номинальной лишь в диапазоне противодавлений 3...14 Па.

Таблица 6.30. Техничко-экономические характеристики сухих систем охлаждения блока мощностью 500 МВт (17 МПа, 538/538 °С)

Наименование	Тяга			
	Искусственная		Естественная	
	Система			
	ВК	СОБ	ВК	СОБ
	Номер варианта			
	I	II	III	IV
Расчетные условия:				
противодавление, кПа	11,7	11,7	11,7	11,7
температура наружного воздуха, °С	9	9	9	9
Охлаждающая вода (промежуточный контур):				
расход, т/ч	—	33200	—	34600
начальная температура, С		28,7		29,3
конечная температура, °С		46,0		46,0
Диаметр водовода, м	—	2x2,3	—	2x1,4
Диаметр вакуумного трубопровода, м	2x6,3	—	—	2x6,0
Поверхность теплообмена (с паровой стороны), м ²	62900	64400	79830	89130
Размеры установки, м:				
высота	27	30	155	155
диаметр основания	—	100	130	121
длина	85	—	—	—
ширина	72	—	—	—
Капитальные затраты, млн марок ФРГ	31,15	32,4	45,6	47,0
Максимальная мощность блока при $t_n = 27$ °С, МВт	456,8	417,9	440,0	410,2
Режим А:				
выработка нетто, ГВт·ч/год	3573,2	3734,3	3706,7	3682,3
средний удельный расход теплоты, кДж/(кВт·ч)	8985	9043	8637	8675
себестоимость электроэнергети, пф. ФРГ/(кВт·ч)	5,327	5,504	5,234	5,370
Режим Б:				
выработка нетто, ГВт·ч/год	1973,5	1960,2	1997,9	1990,6
средний удельный расход теплоты, кДж/(кВт·ч)	9043	9136	8683	8713
себестоимость электроэнергети, пф. ФРГ/(кВт·ч)	6,520	6,727	6,257	6,672

В расчетах принята турбина, модифицированная путем применения в последних ступенях механически усиленных лопаток меньшей длины и увеличения при этом удельной нагрузки площади выхода до 30 МВт/м², что позволяет расширить диапазон допустимых противодавлений. Он составляет при принятой нагрузке площади выхода от 5 до 25,5 кПа.

Экономические показатели определены для двух режимов работы блока: базового с годовым использованием мощности 7512 ч (режим А) и полупикового с использованием мощности 4000 ч (режим Б). При режимах А и Б приняты соответственно: стоимость органического топлива 4,78 и 3,58 марок ФРГ/кДж, проценты на капитал 15 и 20 %, стоимость замыкающей электроэнергии 3 и 5 пф. ФРГ/(кВт·ч) и стоимости замыкающей мощности

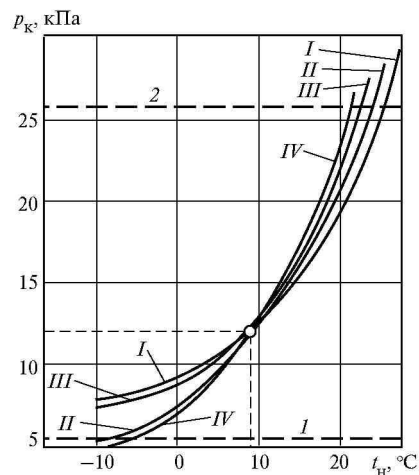


Рис. 6.18. Характеристики конденсационно-охладительных установок энергоблока 500 МВт: 1, 2 — минимальное и максимальное противодавление турбины; I, II, III, IV — номера вариантов по табл. 6.30

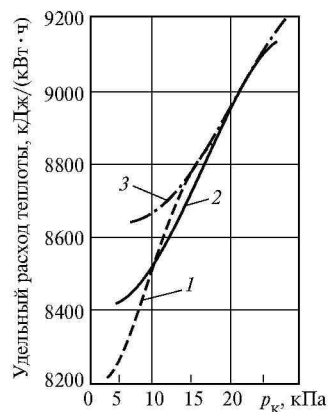


Рис. 6.19. Зависимость удельного расхода теплоты от противодавления p_k при разных удельных нагрузках площади выхода последних ступеней турбины: 1 — нагрузка 20 МВт/м²; 2 — то же 30 МВт/м²; 3 — то же 40 кВт/м²

800 и 600 марок ФРГ/кВт. Как видно из табл. 6.30, при принятых условиях получено, что применение ВК во всех случаях экономичнее применения оборотной системы с сухой охлаждающей башней. Капитальные затраты на конденсационно-охладительную установку при ВК и искусственной тяге на 4 %, а при естественной тяге — на 3 % ниже, чем при сухой охлаждающей башне, а себестоимость электроэнергии ниже на 3,3 и 2,6 %. Следует, однако, иметь в виду, что отличающиеся от принятых местные условия и оптимизация расчетных параметров для каждого из сопоставляемых вариантов могут изменить соотношения между показателями различных систем охлаждения.

При проектировании ВК для ТЭС Утриллас было принято, что работа блока без ограничения его располагаемой мощности должна обеспечиваться при температурах наружного воздуха t_n до +30 °С, а по испытаниям это было достигнуто при t_n до +34 °С и давлении отработавшего пара 29 кПа, т.е. в этом случае блок может работать с номинальной мощностью практически во всем диапазоне наружных температур. В отличие от этого оптимизационные расчеты для блока ТЭС Уайодек привели к решению, при котором увеличение t_n сверх его расчетного значения приводит при работе всех вентилято-

ров с номинальной частотой вращения к понижению располагаемой мощности блока.

То же относится, согласно проектным данным, и к блокам ТЭС Матимба и Майуба (рис. 6.20). Дополнительное понижение располагаемой мощности может вызываться влиянием на работу ВК ветра при скорости его 5...6 м/с и более и при неблагоприятном его направлении (по опытам на модели ВК электростанции Уайодек оно может достигать при чистой поверхности конденсатора 5...12 %).

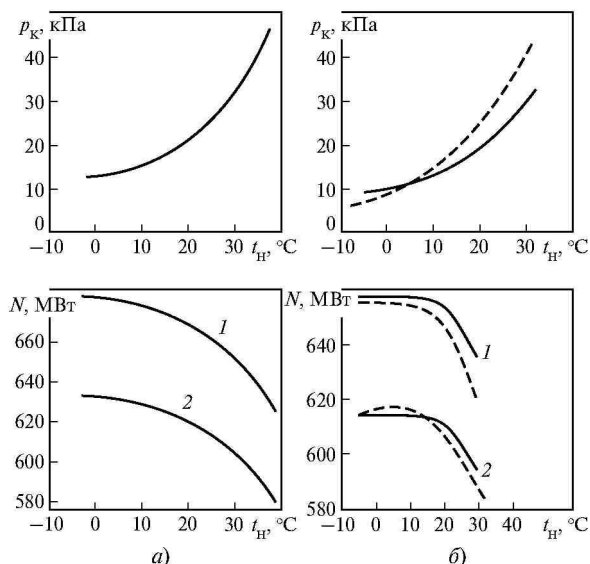


Рис. 6.20. Противодействие и располагаемая мощность N турбины (энергоблока) с воздушным конденсатором в зависимости от температуры наружного воздуха $t_{н.в.}$: a — энергоблок ТЭС Матимба; b — энергоблок ТЭС Майуба; 1 — мощность турбины брутто; 2 — мощность энергоблок нетто. Пунктирные кривые — мощности при оборотной системе с сухой охладительной башней

При необходимости (по условиям работы энергосистемы) компенсации недовыработки электроэнергии в жаркое время, при отсутствии резервной мощности и невозможности ее получения от другой энергосистемы могут быть применены следующие способы уменьшения давления отработавшего пара:

1) понижение температуры поступающего в конденсатор воздуха путем впрыска в забираемый атмосферный воздух осветленной и умягченной воды, испаряющейся перед поступлением воздуха в вентилятор (или в трубный пучок);

2) использование для конденсации части (например, 20 %) отработавшего пара специально сооруженного для этого вспомогательного контура водоснабжения с охлаждаемым водой поверхностным конденсатором и обычной вентиляторной градирней испарительного типа.

Оба эти способа требуют дополнительных затрат и подачи воды для покрытия ее потери на испарение.

В подавляющем большинстве опубликованных работ приводятся общие схемы ВК без характеристик переменных режимов работы и других сведений об особенностях их функционирования. В основном в открытой публикации представлены сведения, имеющие рекламный характер. Так, в [2] указывается, что в США ТЭС с ВК располагаются в маловодных районах в непосредственной близости к источникам топлива и в северных районах.

Практически во всех ВК конденсаторно-дефлегматорного типа остро стоит проблема обеспечения надежной и

эффективной работы дефлегматорной части модуля при отрицательных температурах охлаждающего воздуха.

Еще одним недостатком таких установок с воздушным охлаждением является то, что охлаждаемый пар перед подачей на теплообменную поверхность должен в заданном отношении распределяться между дефлегматорно действующим теплообменным элементом, установленным со стороны подачи пара, и дефлегматорным элементом, работающим на стороне подачи воздуха теплообменного элемента, эксплуатируемого в режиме конденсации, что создает большие трудности при распределении потоков, так как конденсационная установка должна эксплуатироваться с переменной нагрузкой. В [3] решение этой задачи предлагается путем подогрева охлаждающего воздуха для дефлегматорных элементов. Благодаря этому эффективность работы дефлегматорно соединенных теплообменных поверхностей по отношению к конденсационно работающим поверхностям сохраняется так, что не происходит ни увеличения теплопередачи, ни изменения соотношения между дефлегматорной и конденсационной поверхностями. По мнению авторов, это исключает увеличение поверхности теплообмена конденсационной установки и устраняет опасность замерзания дефлегматорных теплообменных элементов даже при эксплуатации в условиях экстремально низких температур охлаждающего воздуха и при эксплуатации установки с частичной нагрузкой. Схема этой установки представлена на рис. 6.21.

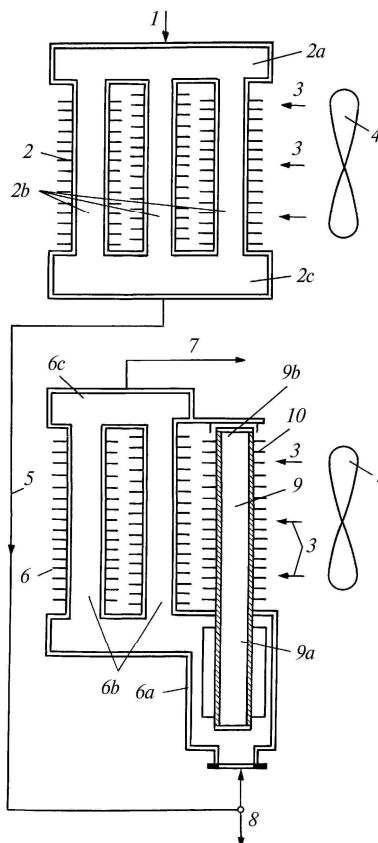


Рис. 6.21. Схема установки конденсаторно-дефлегматорного типа [3]

Пар 1, поступающий в распределительную камеру 2а теплообменного элемента 2, распределяется на множество частичных потоков, которые расположены в трубках. Так как распределительная камера 2а теплообменного элемента 2 расположена выше сборной камеры 2с, частичный поток пара течет в ребристых трубках 2b в том же направлении, что и конденсат, образующийся вслед-

ствии охлаждения. Речь идет о конденсаторно работающем элементе — теплообменном элементе 2.

Теплообменный элемент 2 работает на избыточном паре. Конденсированный пар по линии 5 распределительной камеры *ба*, расположенной внизу теплообменного элемента 2, подается в теплообменный элемент 6.

Теплообменный элемент 6 снабжен двумя рядами ребристых трубок *бб* направленного потока 3, в которые охлаждающий воздух нагнетается с помощью вентилятора 4, причем эти ребристые трубки связаны между собой сборной камерой *бс*.

Поскольку частичные потоки пара, направляемые через ребристые трубки *бб* в этом теплообменном элементе, направляются в противотоке к конденсату, то речь идет о дефлегматорно соединенном элементе 6.

Из сборной камеры *бс* теплообменного элемента 6 накапливающиеся газы, а именно воздух и инертные газы, выводятся по всасывающей линии 7.

Конденсат из обоих теплообменных элементов 2 и 6 выводится из системы по линии удаления конденсата 8.

Перед первым рядом ребристых трубок *бб* на стороне охлаждающего воздуха имеется ряд тепловых трубок 9, которые закрыты и заполнены теплоносителем. В качестве теплоносителя можно использовать аммиак. Теплоноситель, находящийся в тепловых трубках 9, испаряется в нижней части тепловых трубок паром, поступающим в распределительную камеру *ба*. Эта часть тепловых трубок 9 называется испарительной частью 9а. Так как верхняя часть тепловых трубок 9 расположена в потоке холодного охлаждающего воздуха, теплоноситель конденсируется в верхней части тепловых трубок 9, которую называют конденсаторной частью 9б. Из пара, поступающего в распределительную камеру *ба*, отбирается такая часть его теплосодержания, которая необходима для испарения теплоносителя в испарительных частях 9а тепловых трубок 9. Это количество теплоносителя, поступающего в тепловые трубки 9 через стенку трубок и поперечные ребра 10 конденсаторных частей 9б, передается охлаждающему воздуху. Таким образом, охлаждающий воздух, передаваемый на первый ряд ребристых трубок *бб*, подогревается так, что температура стенки первого ряда трубок даже при экстремально низких температурах охлаждающего воздуха не может упасть ниже температуры замерзания. Это было бы особенно опасно для этих ребристых трубок *бб*, потому что на верхнем конце дефлегматорно действующих ребристых трубок *бб* очень легко может образоваться слой инея (замерзание), если температура стенки падает ниже температуры замерзания. Условия для образования инея благоприятны потому, что в верхней части ребристых трубок *бб* прекращается процесс конденсации из-за высокого содержания инертных газов, так что присутствие остаточного пара может привести к обледенению стенки трубки.

В [4] описаны главные аспекты, которые должны быть рассмотрены при определении аэродинамических характеристик ВК. Особое внимание уделяется влиянию неравномерности профиля скоростей воздушного потока в ребристых теплообменниках, что вызывает определенные проблемы в эксплуатации, которые часто составляют наибольшие трудности. Отмечается, что для увеличения эффективности ВК при их разработке необходимо учитывать еще такие факторы, как конструкция вентилятора, влияние на тепловые и аэродинамические характеристики естественной конвекции, направление и величи-

на природных потоков воздушных масс.

Особое внимание в [4] уделяется точности измерения воздушных потоков. Авторы отмечают, что имеется очень много факторов, исследование которых позволит существенно улучшить тепловые и аэродинамические характеристики ВК. В основном эти факторы относятся к пониманию поведения воздушных потоков на входе в ВК, в рядах ребристых труб, а также на выходе из ВК.

Следует отметить, что до настоящего времени в литературе имеется очень ограниченная и рассеянная информация о режимах работы пучков труб с различным углом наклона относительно охлаждающего потока воздуха. Большая часть ее относится к пучкам гладких труб с коридорным и шахматным расположением.

Вопрос выбора рациональной конструкции ВК остается открытым до настоящего времени. На станции, работающей по циклу Ренкина, наиболее важными параметрами, используемыми для определения оптимальной конфигурации ВК, являются:

- минимальная фронтальная поверхность;
- минимальная теплопередающая поверхность;
- максимальная эффективность (нетто) цикла.

Все эти величины зависят от температуры в конденсаторе и от скорости охлаждающего воздуха. Так как все эти параметры меняются, то, естественно, конструктор должен оперировать их оптимальными значениями, что позволит достигнуть наибольшей эффективности.

Стюарт и другие [5] провели оптимизационные расчеты ВК. В результате была получена температура в конденсаторе, которой соответствует минимальная фронтальная поверхность. Была определена также скорость воздуха, которой соответствует минимальная теплопередающая поверхность при постоянной температуре в ВК и полезной мощности (определяемой как общая мощность за вычетом мощности вентиляторов ВК). Во всех случаях авторы предполагали, что воздух на выходе из ВК имеет температуру, равную температуре насыщения в ВК.

В [6] приведены результаты оптимизации стоимости единицы теплопередающей поверхности. Однако для инженерных расчетов желательно иметь общие формулы для определения значений как скорости охлаждающего воздуха, так и температуры в ВК, при которых возможно получение оптимальных теплопередающих поверхностей, фронтальной поверхности и эффективности нетто.

С позиций этих задач интерес представляет работа [7]. В ней оптимизируется фронтальная поверхность, теплопередающая поверхность и эффективность станции в зависимости от скорости охлаждающего воздуха и температуры в ВК. В работе приняты следующие допущения:

- 1) температура охлаждающего воздуха на выходе из ВК равна температуре насыщения в ВК;
- 2) трубы и их оребрение образуют в ВК четырехугольные широкие ячейки;
- 3) ребра труб очень тонкие по сравнению с пространством между ними, так что фронтальная поверхность ВК такая же, как и на входе в конденсаторную секцию;
- 4) скорость охлаждающего воздуха внутри ВК постоянна и равна средней скорости на входе в конденсаторную секцию;
- 5) внутри ВК охлаждающий воздух нагревается как поверхностью ребер, так и трубной поверхностью, которые имеют температуру насыщения.

Были получены алгебраические выражения, связывающие независимые параметры с возможной оптималь-

ной конструкцией. Результаты расчета показали, что желательны высокие скорости охлаждающего воздуха несмотря на то, что они сопровождаются повышением потребляемой вентиляторами мощности. Такой вывод вызывает сомнения в корректности проведенных исследований и полученных результатов. Кроме того, допущение о равенстве температур насыщения и воздуха на выходе из ВК может быть принято для предельного случая — бесконечно большой поверхности теплообмена. В реальных условиях ВК имеет определенную поверхность, что приводит к температурному напору между температурой насыщения и температурой воздуха на выходе из ВК и может составлять $\delta t = 5 \dots 7^\circ \text{C}$ и более.

Допущение о равенстве температур поверхности ребер и трубной поверхности температуре насыщения приводит к систематической погрешности, так как не учитывает термического сопротивления стенки трубы и изменения температуры по высоте ребра. Все это приводит к значительной ошибке при определении коэффициента теплопередачи и, как следствие, эффективности функционирования конденсатора.

Известны ВК, содержащие пучки труб, вертикально расположенные между двумя решетками, и вентилятор, установленный по оси аппарата [8].

Одним из методов борьбы с замерзанием конденсата на выходе из трубного пучка является метод, реализованный в ВК, представленном на рис. 6.22. Конденсатор [9] представляет собой двускатную секцию с принудительным воздушным охлаждением, содержащую пучки

оребранных конденсаторных трубок 1. Трубки соединены одним своим концом с верхней парораспределительной камерой 2, а другим — с нижней камерой 3.

В целях повышения надежности работы ВК при низких температурах охлаждающего воздуха в трубах предусмотрено встречное движение пара, которое происходит за счет установки перпендикулярно оси трубки конденсатоотводчика 4. Пар, подведенный через парораспределительные камеры 2, конденсируется в верхней части трубки, а конденсат отводится через конденсатоотводчик и дополнительную центральную трубку 5 в конденсатосборник 6.

В верхней части дополнительной центральной трубки выполнены отверстия 7 для отсоса паровоздушной смеси, расположенные ниже конденсатоотводчика.

В результате такого выполнения ВК сокращается путь конденсата по холодной внутренней стенке верхней части трубки в первых рядах трубок по ходу охлаждающего воздуха. Дополнительные трубки состоят из двух помещенных одна в другую частей разного диаметра, что позволяет компенсировать тепловые удлинения.

Конденсатосборник 6 снабжен патрубком 8 для отсоса паровоздушной смеси, подсоединенным к воздухоотводу 9, и патрубком 10 для отвода конденсата в конденсатопровод 11. В нижней части патрубка 3 для слива конденсата установлен патрубок 12 для слива конденсата в конденсатосборник 13. Участки трубок, расположенные между конденсатоотводчиком и конденсатосборником, выполнены увеличивающимися по длине в направлении потока пара по коллекторам 3, а участки трубок между верхним коллектором 2 и конденсатоотводчиком 4 выполнены увеличивающимися по длине в каждом следующем ряду по ходу охлаждающего воздуха (вглубь пучка).

Определенный интерес представляет воздушно-конденсационная установка (ВКУ) Новомосковского производственного объединения «Азот». Она используется для конденсации отработавшего водяного пара после турбинпривода компрессоров для сжатия природного газа. Воздушно-конденсационная установка изготовлена в 1972 г. фирмой GEA (ФРГ).

Технические характеристики воздушно-конденсационных установок представлены в табл. 6.31.

На Черкасском химкомбинате ПО «АЗОТ» установлена ВКУ фирмы «ЛЮММАС». Эксплуатация выявила следующие проблемы:

- замерзание конденсата в горизонтальных трубах в зимнее время и разрушение труб, в основном, в районе неоребранных гибов;
- необходимость орошения поверхности теплообмена в жаркий период конденсатом для углубления вакуума;
- неудовлетворительная работа редуктора для привода вентилятора, он оказался слабым местом передачи;
- необходимость очистки поверхностей теплообмена 2 раза в год от отложений на ребрах, характер отложений не определялся, классифицируется как грязь, смываемая водой.

Вместе с тем не зафиксировано коррозионных процессов на алюминиевом оребрении.

В целом опыт эксплуатации ВКУ оценивается как положительный.

Особая проблема в процессе эксплуатации ВК — это регулирование режима его работы.

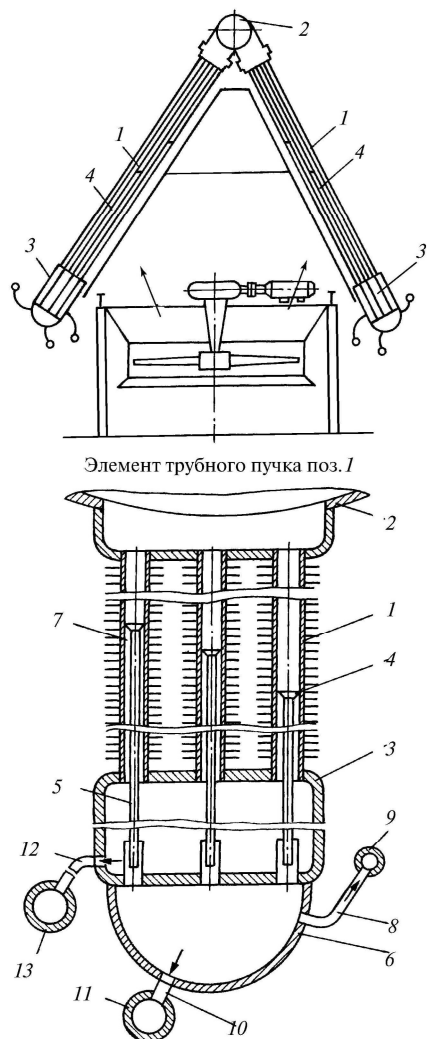


Рис. 6.22. Конструкция конденсатора с двускатной секцией

Таблица 6.31. Технические характеристики ВКУ 102-ЖС и 105-ЖС

Наименование	Тип ВКУ	
	102-ЖС	105-ЖС
Количество принимаемого тепла, ккал/ч	$9,85 \cdot 10^6$	$27,1 \cdot 10^6$
Расход пар, кг/ч	16650	52700
Начальная температура пара, °С	70,2	70,2
Конечная температура пара, °С	67,0	67,0
Абсолютное рабочее давление, 10^5 Па	0,32	0,32
Потери давления, 10^5 Па:		
расчетные	0,0173	0,0173
допустимые	0,04	0,04
Поверхность по оребрению, м ²	12534	37480
Поверхность охлаждения по трубам, м ²	986	2955
Число трубок, шт.	1980	4752
Температура воздуха на входе, °С	28	28
Температура воздуха на выходе, °С	56	56
Расход воздуха, м ³ /ч	1400000	3600000
Число вентиляторов, шт.	3	
Число трубных модулей на секцию, шт.	4	4
Число рядов труб в модуле	3	3
Число секций в установке, шт.	3	6
Суммарная мощность вентиляторов, кВт	120	258
Число лопастей вентиляторов, шт.	6	6
Сопротивление пучка по воздуху, мм вод. ст.	15,5	13,9
Расчетное значение атмосферного давления, мм рт. ст	730	730
Расчетное значение относительной влажности воздуха, %	45	45
Масса установки, т	63	190

Она состоит в том, чтобы поддерживать оптимальное давление на выходе из турбины в условиях изменяемых нагрузок турбины и изменяемой температуры охлаждающего воздуха, которая зависит от условий погоды и времени года. Качество регулирования по существу заключается в том, чтобы получить достаточно тонкие изменения потока охлаждающего воздуха при сохранении максимального КПД. Это достигается следующими методами:

- изменением угла наклона лопастей вентилятора;
 - изменением частоты вращения электродвигателя;
 - прикрытием охлаждающей поверхности модулей (жалюзи);
 - отключением вентилятора;
 - впрыском воды в воздушный поток;
- регулированием температуры охлаждающего воздуха посредством его рециркуляции