

УДК 621.039.5-519

Поддержание вакуума в конденсаторах турбин атомных электростанций

Салькевич Я.А., Миргород Ю.С.

Научный руководитель – к.э.н., доцент КРАВЧЕНКО В.В.

Основной задачей системы конденсаторов турбины является конденсация отработавшего пара в турбине: пар, поступающий из турбины в паровое пространство, конденсируется на поверхности конденсаторных трубок, внутри которых протекает охлаждающая вода. Процесс конденсации может идти при любом давлении. Однако, чем меньше температура отвода теплоты цикла (что соответствует более низкому давлению конденсации), тем выше тепловая экономичность паротурбинной установки при неизменных начальных параметрах, если при этом не возникают потери из-за необратимости протекающих процессов. Поэтому важной задачей на энергетических объектах является не только установление глубокого вакуума, но и дальнейшее его поддержание.

На данный момент в энергетике нашли широкое применение эжекторы и водокольцевые насосы.

Эжекторы предназначены для удаления паровоздушной смеси из конденсатора и циркуляционной системы и поддержания необходимого вакуума [1]. В паротурбинных установках применяют пароструйные и водоструйные эжекторы. Если в качестве рабочего тела используется пар, то эжектор называется пароструйным, а если вода, то водоструйным. При обычном режиме турбоустановки включены основные эжекторы, использующие, например, выпар деаэрата. При пуске энергоблока используется пусковой эжектор, работающий, в отличие от основного, при переменных режимах. Он начинает работу при давлении всасывания, равном атмосферному, а отключается, когда это давление снижается до расчетного, и в дальнейшем вакуум поддерживается основными эжекторами.

Для пускового эжектора резерв не предусматривается, а для основных эжекторов обычно один резервный приходится на два рабочих.

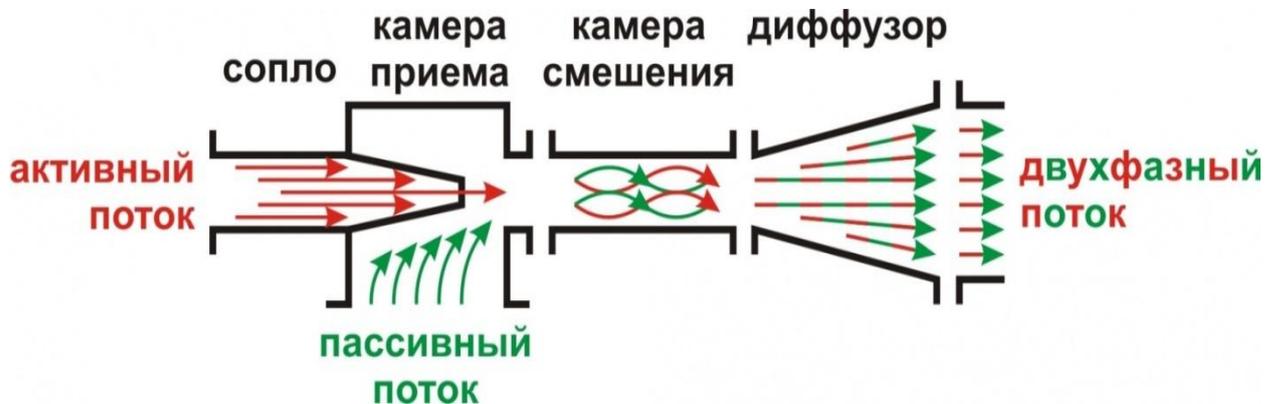


Рисунок 1 – Принципиальная схема эжектора

Рабочее тело (пар – в пароструйном эжекторе, вода – в водоструйном) подается под давлением в приемную камеру, откуда через суживающееся сопло (или несколько сопел) с большой скоростью направляется в камеру смешения, соединенную с паровым пространством конденсатора (рисунок 1). Струя рабочего тела (пара или воды), обладая большой кинетической энергией, увлекает за собой паровоздушную смесь из камеры в суживающуюся часть канала переменного сечения и далее поступает в диффузор, в котором происходит торможение потока и преобразование кинетической энергии в потенциальную. Вследствие этого давление на выходе из диффузора превышает атмосферное и происходит постоянное удаление паровоздушной смеси из конденсатора. Самое широкое распространение в паротурбинных установках получили пароструйные эжекторы, которые выполняются одно-, двух- и трехступенчатыми. Одноступенчатые эжекторы создают разрежение до 0,073–0,080

МПа и применяются в качестве пусковых. Двух- и трехступенчатые эжекторы создают более глубокое разрежение и применяются в качестве рабочих, обеспечивая устойчивую и надежную работу турбины при глубоком вакууме. В последних конструкциях пароструйных эжекторов имеются приборы для измерения количества отсасываемого воздуха, что позволяет контролировать воздушную плотность конденсатора. Расход рабочего пара на эжекторы имеет заметное значение (0,5–0,8%) расхода на турбину, и, кроме того, некоторое количество пара поступает с воздухом из конденсатора. Во избежание потерь конденсата и для уменьшения тепловых потерь с рабочим паром конструкция эжекторов органически сочетается с холодильниками пара.

Основными причинами неудовлетворительной работы пароструйных эжекторов, приводящими к ухудшению вакуума в турбине, являются:

- 1) малый расход рабочего пара из-за засорения сопел эжектора;
- 2) падения давления рабочего пара;
- 3) повышение температуры паровоздушной смеси из-за загрязнения холодильников эжекторов или уменьшения расхода воды через них;
- 4) рециркуляция воздуха между ступенями эжектора и между первой ступенью эжектора и конденсатором при наличии неплотностей в перегородках между ступенями и другие факторы.

Аварийные случаи в работе пароструйных эжекторов связаны с их «запариванием» либо с «захлебыванием». «Запаривание» – это нарушение нормальной работы пароструйного эжектора, возникающее вследствие неполной конденсации пара в холодильниках эжекторов при недостаточном расходе через них конденсатора. «Захлебывание» эжекторов – переполнение их охладителей конденсатом вследствие неудовлетворительной работы системы сброса конденсата в конденсатор. В последнее время все большее применение находят водоструйные эжекторы, рабочим телом в которых служит вода, отбираемая из напорного циркуляционного водовода в количестве 5–7%. Водяные эжекторы могут создавать более глубокий вакуум, чем пароструйные. Однако отсасываемый пар и его теплота теряются бесполезно.

На Белорусской атомной станции для поддержания вакуума создана система вакуумирования на основе водокольцевых насосов.

Система вакуумирования главных конденсаторов [2] предназначена для:

- 1) создания вакуума на выхлопе турбины с целью использования возможно большего теплового перепада рабочего тела посредством охлаждения циркуляционной водой и конденсации пара, отработавшего в турбине;
- 2) отсоса паровоздушной смеси из конденсатора турбины и возможно более глубокого вакуума, необходимого для обеспечения надежной и экономичной работы турбины;
- 3) создания необходимого разрежения в конденсаторе пара уплотнений (КПУ).

Отвод из конденсатора неконденсирующихся газов, а также воздуха, проникающего через уплотненности вакуумной системы, осуществляется с помощью водокольцевых насосов. Количество одновременно работающих устройств определяется необходимостью поддержания расчетного вакуума.

Состав системы водокольцевого насоса

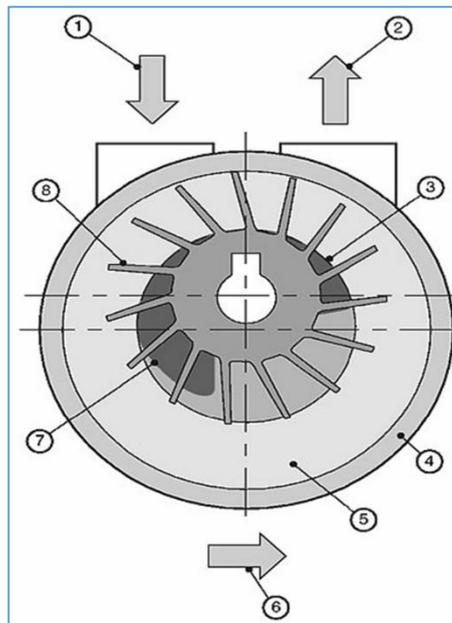
Технологический воздух вместе с парами воды поступает в вакуумный насос (рисунок 2) через входной трубопровод, оборудованный вакуумметром для визуальной индикации и дисковым клапаном с приводом для автоматической изоляции системы от процесса. Также, на трубопровод установлена форсунка для конденсации излишних паров воды перед входом в вакуумный насос.

Через форсунку в насос подается небольшое количество рабочей жидкости для конденсации излишних паров воды, поступающих из процесса. Форсунки в сочетании с использованием межступенчатого воздухопровода малого сечения защищают насос от возникновения условий кавитации при недогрузке второй ступени. Это может происходить, когда большая часть паров конденсируется на первой ступени вакуумного насоса при

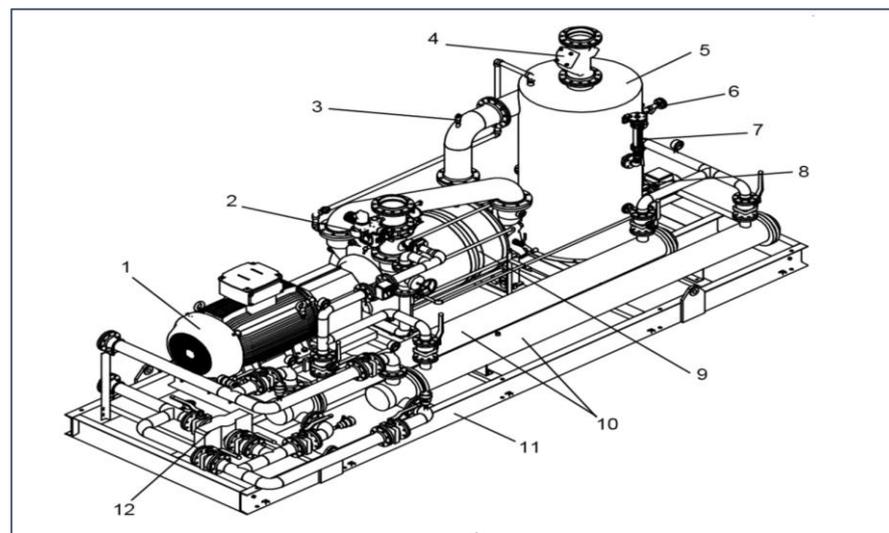
соприкосновении с водяным кольцом и затем сжимается. В результате поток, поступающий на вторую ступень, очень мал, что приводит к работе при высоком уровне вакуума и как следствие к кавитации.

Принцип работы водокольцевых насосов

Межступенчатый трубопровод (рисунок 3) берет воздух с выхода первой ступени и подает на промежуточную пластину вакуумного насоса, где необходим неконденсируемый поток для поддержания корректного межступенчатого давления. В данный трубопровод встроена ограничительная насадка для поддержания фиксированного потока, и байпасный вакуумный предохранительный клапан.



1 – вход процесса; 2 – выход процесса; 3 – выхлопное отверстие; 4 – литой корпус; 5 – жидкостное кольцо; 6 – направление вращения; 7 – всасывающее отверстие; 8 – импеллер
Рисунок 2 – Водокольцевой насос



1 – электродвигатель насоса, 2 – дисковый клапан; 3 – реле температуры; 4 – обратный клапан; 5 – сепаратор; 6 – подпитка; 7 – индикатор уровня; 8 – рециркуляционный насос; 9 – ВVKH; 10 – теплообменники; 11 – рама агрегата; 12 – дуплексный фильтр
Рисунок 3 – Общий вид агрегата

ХАРАКТЕРИСТИКИ (ОДНОГО НАСОСА)						
СКОРОСТЬ НАСОСА		rpm	585	585	585	585
ПОТРЕБЛЯЕМАЯ МОЩНОСТЬ (на валу)	(прим 1)	kW	85,2	85,1	87,8	93,0
УСТАНОВЛЕННАЯ МОЩНОСТЬ		kW	132	132	132	132
ТИП ПРИВОДА			Прямой	Прямой	Прямой	Прямой
ВЫПУСКНАЯ ТЕМПЕРАТУРА		°C	19,9	14,3	29,9	41,4
РАБОЧАЯ ЖИДКОСТЬ			КОНДЕНСАТ	КОНДЕНСАТ	КОНДЕНСАТ	КОНДЕНСАТ
ТЕМПЕРАТУРА РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ		°C	13,5	8,0	23,0	34,0
ПОТОК РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ	(прим 1)	m ³ /h	24,00	24,00	24,00	24,00
ОХЛАЖДАЮЩАЯ ЖИДКОСТЬ			СССВ	СССВ	СССВ	СССВ
ТЕМПЕРАТУРА ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ		°C	10,50	5,00	20,00	31,00
ПОТОК ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ	(прим 1)	m ³ /h	50,0	50,0	50,0	50,0
ПОТОК ПОДПИТОЧНОЙ ЖИДКОСТИ		lit/min	1,0	1,0	1,0	1,0
ОЖИДАЕМЫЙ УРОВЕНЬ ШУМА НА 1М В ОТКРЫТОМ (± 3 дБ'А')		дБ'А'	82	82	82	82

Рисунок 4 – Параметры водокольцевого насоса

Технологический воздух выходит из вакуумного насоса, вместе с неконденсируемыми парами и порцией рабочей жидкости. Эта смесь поступает в газожидкостный сепаратор, изготовленный из углеродистой стали, в котором под действием сил гравитации и вихревого движения газа происходит разделение газовой и жидкой фазы.

Выходной сепаратор находится только под атмосферным давлением. Он не предназначен для работы при любом давлении выше атмосферного.

На сепаратор устанавливается магнитный индикатор уровня с ручными изолирующими клапанами, закрытое сливное отверстие и реле низкого уровня жидкости.

Данное реле посылает аварийный сигнал, информирующий о падении уровня рабочей жидкости, и возможных протечках, защищает вакуумный насос и механические уплотнения циркуляционного насоса от работы «в сухую». Работа механических уплотнений без охладителя и смазки, или работа циркуляционного насоса «в сухую» может привести к мгновенному повреждению и выходу их из строя.

К сепаратору подключена линия перелива, которая позволяет удалять лишнюю рабочую жидкость естественным образом и поддерживать корректный уровень воды в сепараторе.

Рабочая жидкость подается обратно в насос при помощи небольшого центробежного рециркуляционного насоса, оборудованного механическим уплотнением вала однокомпонентного типа.

Далее рабочая жидкость поступает в теплообменник из нержавеющей стали, спроектированный для отвода тепла от сжатия и тепла, образующегося при конденсации паров воды в охлаждающую воду.

После теплообменника рабочая жидкость поступает обратно в вакуумный насос по трубопроводу, оборудованному индикаторами температуры и реле потока для визуального отображения.

Все вышеописанное оборудование устанавливается на общую раму (рисунок 4), оборудованную монтажными проушинами и расположенными друг напротив друга по диагонали точками подключения заземления.

Импеллер расположен эксцентрично относительно оси корпуса насоса (это лопаточная машина, заключённая в кольцо, конструктивно позволяющая существенно снизить перетекание воздуха/жидкости на концах лопастей и тем самым способно обеспечивать максимальную тягу при минимальном диаметре вентилятора). Жидкостное кольцо концентрически вращается относительно оси корпуса. Перерабатываемые газы всасываются через впускной патрубок в ячейки импеллера, где газ сжимается и выбрасывается через выхлопное отверстие. Рабочая жидкость, формирующая жидкостное кольцо, подается под давлением, равным выпускному давлению насоса, что позволяет насосу автоматически

восполнять количество жидкости, выбрасываемой через выхлопное отверстие, отводить тепло, выделяющееся при сжатии.

Выбор применения эжекторов или водокольцевых насосов требует основательного технико-экономического обоснования для конкретной станции. Эжекторы проще по конструкции и, следовательно, дешевле, но для их работы требуются значительные затраты пара (0,5–0,8%), что снижает эффективность цикла. В свою очередь, водокольцевые насосы не нуждаются в паре, но для их работы требуется использование электроэнергии (около 85 кВт). Но, несмотря на определенные недостатки, каждое устройство свою основную функцию: поддержание вакуума в конденсаторах турбин, выполняет безукоризненно.

Литература

1. Турбины тепловых и атомных электрических станций / А.Г. Костюк [и др.]; под ред. А.Г. Костюка, В.В. Фролова – М.: Изд. МЭИ, 2001. – 488 с.
2. Водокольцевые насосы для энергетики [электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.intech-group.ru/>. – Дата доступа: 13.10.2018.