© О.В. Замыцкий, 2005

УДК 622.44

О.В. Замыцкий

КОНТАКТНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СЖАТОГО ВОЗДУХА В ТУРБОКОМПРЕССОРАХ

Семинар № 17

В настоящее время, на горных предприятиях, для получения сжатого воздуха, используются в основном многоступенчатые турбокомпрессоры. Обязательным условием их нормальной эксплуатации является промежуточное охлаждение сжатого воздуха между секциями, этим достигается существенное уменьшение затрат электроэнергии. Воздухоохладители поверхностного типа, применяемые для этих целей, не всегда обеспечивают необходимое охлаждение воздуха. Это связано, в первую очередь, с ухудшением их эффективности из-за загрязнения теплообменных поверхностей накипными отложениями вследствие отсутствия на компрессорных станциях водоподготовки. При этом температура воздуха на выходе их воздухоохладителей, в наихудших случаях, может достигать 75–90 ^{o}C (вместо 35 ^{o}C). В тоже время повышение температуры воздуха после промежуточных воздухоохладителей на 10 ^{o}C, в диапазоне давлений 0,7–0,8 МПа, приводит к увеличению удельного расхода электроэнергии в среднем на 0,6–0,8 % [1], а перерасход электроэнергии на один турбокомпрессор может составить 450–600 кВт·ч в сутки. Ухудшение эффективности концевых воздухоохладителей напрямую не влияет на работу турбокомпрессоров, но приводит к увеличению потерь давления при транспортировке сжатого воздуха и попаданию влаги в пневмодвигатели горных машин из-за отдаления точки выпадения конденсата за пределы влагоуловителей.

Повысить эффективность охлаждения воздуха, можно отказавшись от применения воздухоохладителей поверхностного типа заменив их, например внутренним испарительным охлаждением воздуха. Но и этот способ имеет целый ряд недостатков. Возможность снижения температуры сжимаемого воздуха за счет впрыскивания воды не является безграничной, так как при достижении температуры, соответствующей точке росы, дальнейшее испарение воды, а следовательно, и охлаждение воздуха прекращается. Например, при абсолютном давлении 0,75 МПа и впрыскивании более 70 г воды на 1 кг сухого воздуха наименьшая достижимая температура воздуха составляет 92 ^{o}C [2]. Эффект охлаждения впрыскиванием воды ухудшается при увеличении влажности засасываемого турбокомпрессором воздуха. Выигрыш в мощности, получаемый в связи со снижением температуры, уменьшается из-за необходимости затрачивать дополнительную работу на сжатие образовавшихся паров. Несколько снижается экономия мощности также вследствие нарушения кинематики потока при введении жидкости.

Более эффективно применение контактных воздухоохладителей с безиспарительным режимом охлаждения. Впервые такая возможность обоснована в работе [3].

Основным достоинством этого способа является высокая интенсивность теплообмена из-за отсутствия разделяющих поверхностей подверженных загрязнению накипью.

Условие отсутствия испарения охлаждающей жидкости при контактном охлаждении воздуха выражается соотношением

$$t_{w2} \le t_1 \text{; } ^{o}\text{C},$$

где t_{w2}– конечная температура воды, ^{o}C; t_1– начальная температура воздуха по мокрому термометру, ^{o}C.

Исходя из теплового баланса контактного тепломассообмена, конечная, температура воды, при фиксированном значении начальных параметров сред, определяется ее расходом. Таким образом, безиспарительный режим работы воздухоохладителя может быть реализован за счет правильного выбора расхода охлаждающей жидкости.

При этом вода впрыскивается в воздухопровод компрессора после каждой секции сжатия в количестве около 1,6 кг на 1кг воздуха (для нормальных начальных условий эксплуатации турбокомпрессора), что обеспечивает

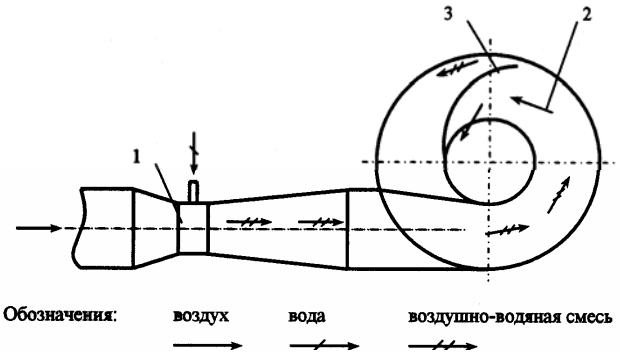

Рис. 1. Схема контактного воздухоохладителя турбокомпрессора

охлаждение воздуха от 135 °С до 35 °С. Отделение воды происходит в специальных сепараторах-каплеуловителях установленных перед следующей секцией сжатия турбокомпрессора.

Контактный воздухоохладитель (рис. 1) включает смесительное устройство 1, выполненное в виде трубы Вентури, сепаратор капельной влаги *2* с внутренним карманом *3* и поплавковый регулятор уровня (на рисунке не показан).

Принцип действия контактного воздухоохладителя заключается в следующем. Холодная вода подается в смесительное устройство *1*, распыляется потоком горячего воздуха и смешивается с ним. В образовавшейся воздушно-водяной смеси происходит интенсивный тепломассообмен, при котором происходит охлаждение воздуха, и нагревание воды. В сепараторе *2* капельная вода отбрасывается центробежной силой к периферии и с частью воздуха уходит через карман *3* в свободное пространство. В свободном пространстве скорость воздуха уменьшается ниже величины витания капель, далее он сливается с основным потоком сухого охлажденного воздуха. Отделенная в сепараторе вода самотеком поступает в регулятор уровня, обеспечивающий ее отвод на охлаждение в градирню с поддержанием гидравлического затвора.

С целью проверки адекватности теоретических зависимостей и методик расчета, для начальных условий характерных при промежуточном и концевом охлаждении сжатого воздуха в турбокомпрессорах проведены промышленные исследования контактного воздухоохладителя.

Промышленные испытания контактного воздухоохладителя турбокомпрессора выполняются на специально разработанной опытной установке (рис. 2) состоящей из контактного концевого воздухоохладителя ВКС-500 с системой водоснабжения, а также средств измерения температур, давлений и капельного уноса жидкости. Установка смонтирована в камере концевого воздухоохладителя турбокомпрессора №7 типа К500-61-5 компрессорной станции КСЦВ-4 РУ им. Кирова (КГГМК), г. Кривой Рог, Украина.

Сжатый воздух из турбокомпрессора подается в трубу Вентури 1, где происходит смешивание с холодной водой и ее дробление, далее воздушно-водяная смесь поступает в центробежный, оборудованный камерой разрыва,

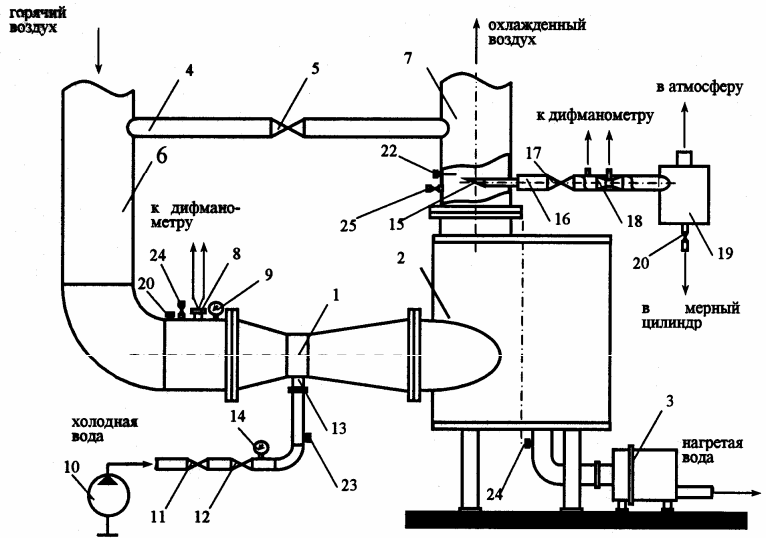

Рис. 2. Схема промышленной экспериментальной установки с воздухоохладителем ВКС500

Результаты промышленных испытаний контактного воздухоохладителя турбокомпрессора

Давление воздуха абс., $p_{в1}$, МПа	Расход воздуха, н. у., $V_в$, м^3/мин	Начальная темп. воздуха, $t_{в1}$, °С	Конечная темп. воздуха, $t_{в2}$, °С	Начальн. темп. воды, t_{w1}, °С	Конечная темп. воды, t_{w2}, °С	Начальн. влагосод., $d_1 \cdot 10^3$, кг/кг	Конечное влагосод., $d_2 \cdot 10^3$, кг/кг	Гидр. сопротивл. сепаратора, Δp_c, Па
0,3	260	70,2	30,4	12	16,8	12,2	4,5	671
0,35	285	75,2	31,4	12	18,0	11,0	3,8	621
0,5	370	90,6	34,2	12	23,4	9,24	2,9	742
0,72	475	195,2	58,0	30	45,0	5,61	10	703

сепаратор-каплеуловитель 2 [4], где происходит разделение потоков воздуха и воды. Нагретая вода выводится из сепаратора регулятором уровня *3* и направляется на охлаждение в градирню. Охлажденный воздух поступает в сборный коллектор компрессорной станции и далее в магистральный трубопровод. Регулирование производительности воздухоохладителя производится при помощи перепускного трубопровода *4* и шибера *5*, при этом осуществляется переток части сжатого воздуха в сборный коллектор, минуя контактный воздухоохладитель. Расход воздуха определяется при помощи расходомера трубка Пито-Прандтля *8* с дифференциальным манометром и вторичным прибором.

Вода из системы водоснабжения компрессорной станции, дожимным насосом *9* типа ЦНС-38-80, подается через обратный клапан *11* и кран *12* в сопло *13*. Кран *12* служит для регулирования расхода охлаждающей воды. Расход воды определяется по перепаду давления на сопле *13*, рассчитываемому по разности показаний манометров *9* и *14*.

Величина капельного уноса воды определяется при помощи специально разработанного устройства включающего зонд *15*, измерительный коллектор *16* с вентилем *17* и расходомером труба Вентури *18* с жидкостным дифференциальным манометром, а также центробежного сепаратора-капле-уловителя *19* и краном *20*. Вентиль *17* служит для регулирования расхода воздуха через устройство, при этом скорость в свободном пространстве сепаратора *19* поддерживается ниже скорости витания наиболее мелких капель (не более 0,1 м/с), что гарантирует практически полное отделение влаги. Кран *20* служит для удаления воды из сепаратора *19*.

К параметрам подлежащим регистрации при производстве исследований относятся: перепад давления на расходомерном устройстве 8 – h_n, начальное давление воздуха $p_{в1}$ и начальная температура сжатого воздуха $T_{в1}$, начальная температура воздуха по мокрому термометру T_1, начальная температура воды T_{w1}, конечная температура воздуха $T_{в2}$, конечная температура воздуха по мокрому термометру T_2 и конечная температура воды T_{w2}, давление воды p_w, перепад давления на сепараторе Δp_c, перепад давления на расходомерном устройстве *17* – $h_в$, объем воды попавшей в течение опыта в сепаратор *19* – $V_к$, а также продолжительность эксперимента τ.

Эксперименты проводятся в два этапа. На первом этапе определяются опытные данные для начальных условий характерных при промежуточном охлаждении воздуха. На втором этапе – при концевом. На каждом этапе проводится несколько серий экспериментов для определения критического значения критерия гидродинамической устойчивости газожидкостной системы.

В ходе экспериментов объемный расход воздуха, приведенный к нормальным начальным условиям $V_в$ варьируется от 260 до 490 м^3/мин, давление воздуха абсолютное $p_{в1}$ от 0,2 до 0,72 МПа с шагом 0,05 МПа, начальная температура воздуха $t_{в1}$ от 50 до 195 °С. Расход воды G_w фиксирован и составляет 12 кг/с.

Эксперименты первого этапа с давлениями воздуха, характерными для промежуточных ступеней воздухоохладителя выполняются при работе на порожнюю внешнюю сеть после еженедельной остановки турбокомпрессора. На втором этапе воздухоохладитель испытывается в режиме концевого охлаждения воздуха.

Эксперименты включают выполнение следующих операций. Включается компрессор. Запускается насос *9* и при помощи крана *12*, по показаниям манометров *9* и *14*, устанавливаются необходимый расход охлаждающей воды. Показания потенциометров снимаются по мере роста давления сжатого воздуха по мере заполнения внешней сети через каждые 0,05 МПа (на втором этапе давление сжатого воздуха фиксировано и составляет 0,72 МПа). Расход воздуха через контактный воз-

духоохладитель варьируется при помощи шибера *5* для каждой ступени давления. Регистрация показаний дифференциального манометра и потенциометров производится после достижения температурной стабилизации на каждом режиме – определяется по неизменности показаний потенциометров в течение 3 мин. Одновременно регистрируются показания дифференциального манометра устройства для определения капельного уноса. Для этого открывается вентиль *17* и включается секундомер, по истечении необходимого промежутка времени τ вентиль *17* перекрывается с одновременным выключением секундомера. Затем открывается кран *20* и жидкость, попавшая в результате уноса в сепаратор *19*, сливается в мерный цилиндр для определения объема. На каждом режиме измеряется также потеря давления на сепараторе-каплеуловителе Δp_c.

Результаты экспериментов приведены в табл. Прирост влагосодержания воздуха в последнем эксперименте объясняется недостаточным количеством охлаждающей жидкости из-за низкой для данного расхода воздуха производительности дожимного насоса. Остальные эксперименты протекают со снижением влагосодержания, т. е. помимо охлаждения одновременно обеспечивается и осушка воздуха. Усредненное по результатам экспериментов критическое значение критерия газодинамической устойчивости газожидкостной системы $Ku_{кр}$ составляет около 5,42; коэффициент гидравлического сопротивления сепаратора-каплеуло-вителя с камерой разрыва ζ_c =1,9. Погрешность экспериментов составляет не более 10,2 % при доверительной вероятности 0,85.

Таким образом, в результате проведенных промышленных испытаний контактного воздухоохладителя подтверждена адекватность полученных теоретических зависимостей и методик расчета, а также работоспособность воздухоохладителя в реальных условиях эксплуатации компрессорных станций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Замыцкий О.В.* Влияние промежуточного охлаждения на показатели работы турбокомпрессоров// Горный информационно-аналитичес-кий бюллетень. – М: Изд. МГГУ. – 2002. № 1, – С. 81–82.

2. *Степанов А.И.* Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. М.: ГНТИМЛ, 1960.–348 с.

3. *Замыцкий О.В.* Анализ способов охлаждения при производстве сжатого воздуха для горных машин // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М: Изд. МГГУ. – 2001. №10. – С.67-70.

4. Декларационный патент на изобретение. Сепаратор капельной влаги / М. И. Великий, О. В. Замыцкий, Б. М. Литовко, В. А. Трегубов. – Опубл. БИ № 12. 16.12.2002.

Коротко об авторах

Замыцкий Олег Владимирович – доцент, кандидат технических наук, Криворожский технический университет.