

УДК 621.51

**ЧАСТНАЯ МЕТОДИКА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭНЕРГОЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ТУРБОКОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ
ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЯ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

© 2009 Д. А. Довгялло, В. А. Кудинов

Самарский государственный технический университет

Представлены рекомендации по использованию эксплуатационных режимно-параметрических показателей воздушного турбокомпрессора для оценки резервов энергосбережения при работе на нерасчетном режиме.

Турбокомпрессор, производство воздуха, удельные затраты энергии, показатели работы станции

Среди энергоресурсов, используемых в технологиях крупных промышленных предприятий, важное место занимает сжатый воздух [1]. Он производится непрерывно в течение суток. Его потребление отличается только количеством в единицу времени.

Сжатый воздух является дорогим энергоносителем [2]. Общие затраты на производство одного кубического метра воздуха (для крупного завода) доходят до 0,75руб/м³_н (по ценам 2008 г).

Энергоёмкость воздуха обычно оценивается отношением количества затраченной электроэнергии к количеству воздуха. Причём затраты электроэнергии и количество воздуха можно относить как к собственно компрессорам, так и к компрессорной станции в целом. В общем случае эти показатели будут разными, потому что количество произведенного и отпущенного со станции потребителям воздуха отличаются друг от друга. Эта разница возникает в случае, когда часть или весь воздух проходит специальную подготовку – осушку. Вполне очевидно, что энергоёмкость неосушенного воздуха будет ниже осушенного (воздух КИП). Причём это обусловлено не только дополнительными энергозатратами на осушку, но в основном уменьшением самого количества воздуха, так как часть сухого очищенного воздуха (до 18%) безвозвратно теряется в блоках осушки.

Интересным является тот факт, что если раньше во многих случаях количество осушенного воздуха, отпускаемого с компрессорной станции, определялось только потребностью приборов автоматики, аппара-

туры КИП и отдельными техпроцессами, то в последнее время количество осушаемого воздуха часто доходит до 100 %. Это объясняется тем, что увеличение затрат на эксплуатацию трубопроводной сети (это десятки километров) при использовании неосушенного воздуха начинают превышать затраты на осушку.

Поиск резервов энергоресурсосбережения требует знания энергоёмкости и количества воздуха на всех этапах его производства компрессорной станцией. При этом прямой резерв энергосбережения оценивается по потреблению электроэнергии, а резерв ресурсосбережения определяется потреблением воды и потерями воздуха на осушку.

Обычно анализ проводят отдельно по энергоёмкости воздуха (затраты собственно электроэнергии), удельным затратам воды на один кубометр произведенного или отпущенного со станции воздуха и по доле потерь воздуха в блоках осушки. В то же время затраты на воду можно через текущие внутренние тарифы предприятия привести к киловатт-часам и выразить общие энерго- и ресурсозатраты также в кВт.ч/м³_н. Этот показатель будет более полно отражать все расходы на производство воздуха основным оборудованием станции.

Таким образом, можно обозначить следующие энергоэкономические показатели (здесь предполагается 100% осушка воздуха на станции):

$e_k = W_k / V_k$ кВт.ч/м³_н - энергоёмкость произведенного компрессорами воздуха (затраты электроэнергии только на компрессорах,

отнесенные к количеству выработанного компрессорами воздуха);

$e_{ск} = W_c / V_c$ кВт.ч/м³_н - энергоёмкость произведенного станцией воздуха (полные затраты электроэнергии на станции, отнесенные к количеству выработанного компрессорами воздуха);

$e_c = W_c / V_c$ кВт.ч/м³_н - энергоёмкость отпущенного потребителю сухого воздуха (полные затраты электроэнергии на станции, отнесенные к количеству отпущенного со станции осушенного воздуха);

$e_{рк} = E_c / V_c$ кВт.ч/м³_н - энергоресурсоёмкость произведенного воздуха (полные затраты электроэнергии и воды, отнесенные к количеству выработанного компрессорами воздуха);

$e_{рс} = E_c / V_c$ кВт.ч/м³_н - энергоресурсоёмкость отпущенного потребителю сухого воздуха (полные затраты электроэнергии и воды, отнесенные к количеству отпущенного со станции осушенного воздуха).

При расчёте на один килограмм воздуха энергоёмкость $e = W / m$ и энергоресурсоёмкость $e = E / m$ будут иметь размерность кВт.ч/кг.

Входящие в приведенные выше показатели энергоёмкости значения W и V измеряются по приборам учёта или определяются расчётным путем. И если измеряемая прибором учета величина является в максимальной степени объективным параметром, то определяемая по какой-либо методике, она имеет отклонения от фактической, часто весьма существенные. Наиболее достоверными данными обычно являются измеряемые и рассчитываемые затраты электроэнергии. Для станции в целом это будут общие расходы электроэнергии по электросчетчику, а для отдельных видов основного оборудования они определяются расчётом по регистрируемым в журналах учета силе тока, напряжению в сети и времени работы данного оборудования.

Значительно сложнее обстоит дело с определением расхода производимого воздуха. Так, если точными данными можно считать только расход по поверенному расходомеру, то остальные величины расхода (например, расход на выходе из компрессора), определяемые расчётным путем, будут в той или иной степени приближенными.

Получение более точных данных по количеству произведенного компрессором воздуха позволит иметь более достоверные значения e_c и $e_{ск}$, что весьма важно для оценки состояния компрессоров.

Ниже предлагается методика определения количества производимого компрессорами воздуха на основе использования режимно-параметрических показателей их работы.

Используемый на предприятиях сжатый воздух при централизованном воздухообеспечении производится на компрессорных станциях, в состав оборудования которых могут входить компрессоры различных типов (центробежные, винтовые, поршневые).

При уровне давления производимого воздуха до 1,0 МПа и производительности порядка 100 м³/мин и выше используют, как правило, многоступенчатые центробежные компрессоры.

Теория рабочих процессов таких компрессоров хорошо разработана [3]. Изучены также вопросы совместной работы компрессора с сетью, устойчивость работы, методы регулирования, а также вопросы эксплуатации.

Вместе с этим при эксплуатации компрессоров, которые, как правило, работают на нерасчетном режиме, возникают проблемы оценки фактических показателей, таких как производительность и удельные затраты энергии на производство воздуха.

При обследовании компрессоров приходится пользоваться так называемой базовой характеристикой оборудования.

Она построена в координатах $P_k - V$ (либо $P_k - m$, рис. 1) для расчетных параметров входа P_0, T_0 (обычно это 0,1 МПа и 293 К).

Как показала практика обследования компрессорных станций, становится необходимым разработка практической методики, позволяющей получить фактическую производительность компрессора по текущим режимно-параметрическим показателям его работы (часто далеко не полным).

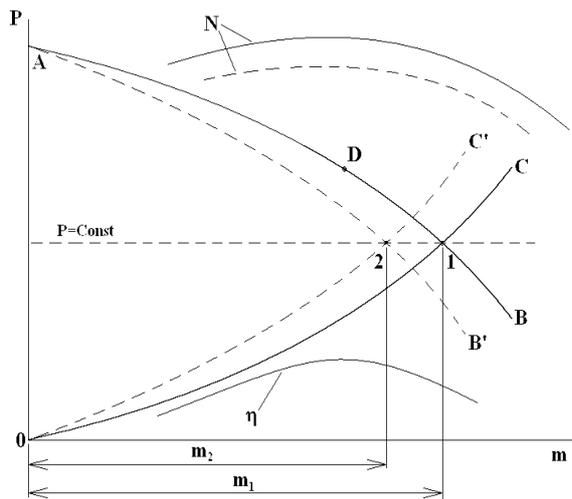


Рис 1. Характеристики компрессора и сети при $P_k = \text{Const}$

Обследование показывает, что подавляющее большинство турбокомпрессоров работает на режиме постоянства оборотов $n = \text{const}$ и давления сети $P = \text{const}$, причем последнее значительно отличается от давления расчетной точки D в меньшую сторону. При снижении потребного расхода (переход характеристики сети с линии OC на OC') постоянство давления P_k обеспечивается системой регулирования чаще всего путём дросселирования на входе. При этом степень повышения давления компрессора остается неизменной (расчетной при $n = \text{const}$), объёмный расход также сохраняется, но массовая производительность за счет разрежения на входе снижается (переход из точки 1 в точку 2).

Ставится вопрос, как определить реальную производительность компрессора в точке 2, не лежащей на паспортной характеристике AB.

Нетрудно показать, что в этом случае производительность изменится в число раз, равное отношению давления расчетной точки D к давлению P_k , т.е. постоянному давлению в сети. Во столько же раз изменится от расчётного P_0 и давление на входе P_{ex} . Ввиду отсутствия комплексных характеристик компрессора и сети в полном диапазоне изменения параметров оценить к.п.д компрессора η будет затруднительно. Найденная по приведенной здесь методике уточненная производительность V_k позволяет найти энергоёмкость произведенного собственно

турбокомпрессором воздуха, что позволит дополнить и уточнить методику расчета норм расхода электроэнергии.

Разница между значениями $N_{уд}$ для точек 1 и 2 и будет определять перерасход электроэнергии при уходе с базовой характеристики компрессора, т.е. характеризовать резерв энергосбережения по компрессорам.

Так как не весь воздух, производимый компрессорами, отпускается со станции, то разница между V_k и V_c должна определять затраты воздуха на осушку и собственные нужды станции.

Расход воздуха на регенерацию адсорбента (холодная и горячая продувки) принято определять по графикам или номограммам, представленным в инструкциях по эксплуатации блоков осушки воздуха (БОВ). Однако практика эксплуатации систем осушки показывает, что режимы регенерации не всегда соответствуют рекомендациям и фактические потери воздуха в БОВ могут отличаться от нормативных (кстати не всегда в худшую сторону). Установка расходомеров на блоках осушки часто затруднительна и нецелесообразна.

При обследовании систем осушки выяснилось, что режимно-параметрические показатели, которые регистрируются в журналах учета вполне позволяют определить расход воздуха на регенерацию.

В журналах учета компрессорных станций фиксируются режимные показатели работы блоков осушки. Это, как правило, величина тока на электронагревателях воздуха, направляемого на регенерацию адсорбента и время холодной и горячей продувок. В режиме горячей продувки при работе подогревателя его можно рассматривать в качестве калориметра. Тогда массовый расход воздуха можно определить из соотношения:

$$Q = G_{ВП} \cdot c_{pB} \cdot (t_B'' - t_B') \cdot \tau_{ВП} = W \cdot \tau_{ВП}, \quad (1)$$

где: Q - тепло, пошедшее на нагрев воздуха в воздухоподогревателе; W - электрическая мощность, кВт; c_{pB} - теплоёмкость воздуха, кДж/кг К; $G_{ВП}$ - расход воздуха при горячей продувке, кг/с; t_B' - температура воздуха на входе в подогреватель; t_B'' - температура воз-

духа на выходе из подогревателя; $\tau_{ГП}$ - время горячей продувки, с.

Электрическая мощность достаточно просто определяется по току I и фазовому напряжению U_{ϕ} .

Набирая из журнала учёта суммарное время горячих продувок за анализируемый период (сутки, неделя,...), можно определить общий расход воздуха за это время.

В зависимости от типа блока осушки время регенерации составляет от 1,5 до 2,5 ч. В действительности же оно может существенно отличаться в зависимости от условий и состояния адсорбента.

Время холодной продувки $\tau_{хп}$ адсорбента обычно в два раза меньше, чем $\tau_{эн}$. Как правило, давление воздуха на холодную продувку остается таким же, как и для горячей продувки. Поэтому при этих условиях расход на эту фазу продувки можно принимать пропорционально времени холодного дутья.

Таким образом, общий расход воздуха на регенерацию адсорбента в блоках осушки будет составлять:

$$G_{B.Pez} = G_{ВП} \cdot \left(1 + \frac{\tau_{ХП}}{\tau_{ГП}}\right), \text{ кг/ч.} \quad (2)$$

Следует подчеркнуть, что такой расчет справедлив при неизменном давлении воздуха, поступающего в блоки осушки и одинаковом значении $\Delta t = t_B'' - t_B'$. В противном случае, необходимо подсчитать $G_{B.Pez}$ для отдельных режимов, после чего просуммировать. Доля воздуха, идущая на собственные нужды (осушка сжатого воздуха), определяется коэффициентом

$$k_{с.н} = \frac{V_{B.Pez}}{V_{Об}}. \quad (3)$$

Если этот коэффициент больше 0,17, то следует провести самостоятельное обследование систем осушки. Если же меньше 0,17, то это значение можно принять за нормативный коэффициент.

Таким образом, возникает дополнительная возможность ещё раз оценить количество воздуха, произведенного компрессорами.

Общее количество воздуха $V_{Об}$, отпущенное со станции и затраченное на осушку, будет равно сумме количества воздуха, определенного по выходному расходомеру и

рассчитанному по представленной выше формуле.

Представление $G_{B.Pez}$ к объёмному количеству с учетом нормальных условий,

$$V_{B.Pez} = \frac{G_{B.Pez} \cdot 287 \cdot 273}{1,02 \cdot 10^5} = 0,768 \cdot G_{B.Pez},$$

(м³/ч), позволяет найти:

$$V_{Об} = V_{B.П} + V_{B.Pez},$$

где $V_{B.П}$ – количество воздуха, регистрируемое на выходе из компрессорной станции и направляемое потребителям.

Таким образом, предлагаемая здесь методика позволяет найти два значения количества воздуха V_k и $V_{Об}$. В принципе эти значения должны быть равны (с погрешностью расчетов).

Однако можно заранее отметить, что если расхождение будет существенным, то эта разница будет означать потери воздуха при перепуске (через байпас) в компрессорах, аварийных сбросах и технологических продувках на самих станциях. Очевидно, что при перепуске в магистраль станции поступает количество воздуха, не соответствующее V_k . Несмотря на это, вследствие того, что энергия на производство всего количества, прошедшего через компрессор воздуха была затрачена, для энергоэкономических показателей e_k , $e_{ск}$ и $e_{рк}$ следует выбирать именно это значение V_k .

В качестве вывода можно отметить, что приведенный в настоящей статье аналитический материал позволяет разработать простые и удобные для эксплуатационников методики расчета энергоэкономических показателей работы воздушных компрессорных станций без привлечения дополнительных дорогостоящих приборов учета.

Библиографический список

1. Миняев, Ю.Н. Энергетическое обследование пневмохозяйств промышленных предприятий / Ю.Н. Миняев. – Екатеринбург: Изд-во УГГГА, 2003. - 151 с.
2. Назаренко, У.П. Экономия электроэнергии при производстве и использовании сжатого воздуха. Изд.2-е, перераб. и доп. / У.П. Назаренко. – М.: Энергия, 1976. – 104 с.
3. Селезнев, К.П. Теория и расчет турбокомпрессоров. Учебное пособие / К.П. Се-

лезнев [и др.]. Под общей ред. К.П. Селезнева. – 2-е изд. перераб. и доп. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-е, 1986. – 392 с.

References

1. Minyaev Y.N. Energy investigation of industrial factories' pneumo devices. – Ekaterinburg, 2003. - 151 p.

2. Nazarenko U. P. Electro energy economy in production and using of pressed air – M.: Energy, 1976. – 104 p.

3. Seleznev K.P., Galerkin and other. Theory and calculation of turbo compressors.– L.: Mashinostroenie, 1986. – 392 p.

SPECIAL METHODIC OF ECONOMICS INDEXES DETERMINATION OF TURBOCOMPRESSOR STATIONS FOR CENTRAL AIR SUPPLY OF INDUSTRIAL FACTORIES

© 2009 D. A. Dovgyallo, V. A. Kudinov

Samara state technical university

In this paper it is presented recommendations of using of compressor stations working parameters and their external output characteristics to evaluate of energy saving reserves during work on non standard regime.

Turbo compressor, air production, energy unit costs, plant work data

Информация об авторах

Довгялло Данила Александрович, аспирант кафедры теоретических основ теплотехники и гидромеханики Самарского государственного технического университета. Тел. (927) 713-95-39. E-mail: dovdan@mail.ru. Область научных интересов: рабочие процессы тепловых и холодильных машин, энергоресурсосбережение.

Кудинов Василий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники и гидромеханики Самарского государственного технического университета. Тел: (846) 332-42-44, 332-42-35. E-mail: totig@yandex.ru. Область научных интересов: математические методы и математическое моделирование, рабочие процессы ТЭС, энергоресурсосбережение.

Dovgyallo Danila Aleksandrovich, post-graduate student of department heat engineering theory and hydromechanics, Samara state technical university. Phone: (927) 713-95-39. E-mail: dovdan@mail.ru. Area of research: heat and cooling machines' work processes, energy saving.

Kudinov Vasily Aleksandrovich, doctor of physico-mathematical science, professor of department heat engineering theory and hydromechanics of Samara state technical university. Phone: (846) 332-42-44, 332-42-35. E-mail: totig@yandex.ru. Area of research: mathematical methods and mathematical simulation, thermal power plant work processes, energy saving.