

ПНЕВМОДВИГАТЕЛЬ-КОМПРЕССОРНЫЙ АГРЕГАТ С САМОДЕЙСТВУЮЩИМИ КЛАПАНАМИ

А.А. Горбунов; Р.А. Данилов; В.В. Калекин;

В.С. Калекин, д-р техн. наук

Омский государственный технический университет

В соответствии со статистическими данными института угля и углехимии СО РАН каждый миллион тонн добытого угля сопряжен с гибелью одного шахтера. В настоящее время на угольных шахтах России добывается около 270 млн. тонн угля ежегодно. Значительный резонанс в обществе вызывают взрывы метана и угольной пыли с громадными разрушениями для предприятий и катастрофическими последствиями для работающих [1]. Среди прочих основным направлением снижения взрывоопасности остается использование пневмодвигателей для привода механизмов и машин шахтного оборудования как не имеющих альтернативы в пожаро- и взрывоопасных производствах.

Применение пневмодвигателей в горнодобывающей промышленности связано не только с повышенной опасностью взрыва газа и пыли, но и с проявлением холодильного эффекта, роль которого возрастает с повышением температуры окружающего воздуха в подземных выработках. Холодопроизводительность пневмодвигателей, принципиально не отличающихся от детандеров, как известно, тем выше, чем выше давление сжатого воздуха на входе [2].

Существующие схемы пневмоснабжения предприятий предусматривают выработку сжатого воздуха на централизованных компрессорных станциях (ЦКС), откуда сжатый воздух по магистральным трубопроводам подается и распределяется потребителям. Как правило, на современных компрессорных станциях вырабатывается сжатый воздух давлением 0,8-0,9 МПа. При этом системы пневмоснабжения предприятий отличаются сравнительно низким КПД. Эффективность использования пневматической энергии находится в прямой зависимости от качества и, прежде всего, давления сжатого воздуха. Снижение давления ниже номинального на 0,12-0,17 МПа приводит к уменьшению производительности, ухудшению эксплуатационных показателей пневмопотребителей в среднем на 21-34% [3].

Поддержание номинального давления сжатого воздуха на входе у потребителей (0,6 МПа и выше) с целью обеспечения их максимальной эффективности работы возможно за счет применения дожимающих компрессоров, устанавливаемых в непосредственной близости с ними [4,5]. При этом для привода дожимающих компрессоров с целью обеспечения безопасности производства работ наиболее целесообразно использовать пневмодвигатели.

Введение в систему газораспределения самодействующих клапанов расширяет область применения поршневых пневмодвигателей. Самодействующие клапаны, обладая малой инерционностью, позволяют повышать частоту вращения коленчатого вала пневмодвигателя до уровня частот современных высокооборотных поршневых компрессоров, что создает предпосылки для объединения двух машин - дожимающего поршневого компрессора и пневмодвигателя в один агрегат, размещать их в одном корпусе.

Агрегатирование и повышение частоты вращения одновременно ведет к снижению массогабаритных показателей машины и пневмосистемы в целом. Разработка и создание поршневых пневмодвигатель-компрессорных агрегатов

(ПДКА) на основе унифицированных компрессорных баз способствует сокращению сроков изготовления и внедрения указанных машин в производство [6].

В лаборатории кафедры "Машины и аппараты химических производств" ОмГТУ ведутся разработки компрессорно-расширительных машин с самодействующими клапанами: пневмодвигатели, агрегаты детандер-компрессорные и пневмодвигатель-компрессорные. Для проведения экспериментальных исследований ПДКА разработан и изготовлен экспериментальный стенд на базе Ш – образного поршневого компрессора с ходом поршня 38 мм, диаметрами цилиндров 60 мм и частотой вращения вала до 50 с^{-1} .

При выполнении модели ПДКА на базе компрессора была произведена замена двух клапанных крышек компрессора на крышки поршневого пневмодвигателя с размещенными в них нормально-открытыми прямооточными самодействующими впускными клапанами. Для реализации прямооточной схемы движения воздуха в нижней части цилиндров пневмодвигателя по его периметру были выполнены выхлопные окна диаметром отверстий 0,003 м в количестве 16 шт.

Для исследований значительный интерес также представляет комбинированная схема движения воздуха, которая способна обеспечить увеличение мощности пневмодвигателя до 20 – 30 % в сравнении с прямооточной схемой [7]. В этом случае в клапанной крышке пневмодвигателя были размещены нормально-открытые впускной и выпускной клапаны.

Непрямоточная схема движения воздуха в детандере детандер-компрессорного агрегата в сравнении с прямооточной схемой не привела к существенному увеличению индикаторной мощности. Для пневмодвигателя с самодействующими клапанами эта схема остается пока не исследованной. В модели ПДКА непрямоточная схема может быть реализована за счет установки пробок в выхлопных окнах.

В качестве источника сжатого воздуха в экспериментальной установке использовался компрессор ВУ-0,6/16 ОАО «Компрессоры БС» (г. Санкт-Петербург) с конечным давлением 1,6 МПа и производительностью $0,6 \text{ м}^3/\text{мин}$.

При экспериментальном исследовании ПДКА предполагается использование автоматизированной системы измерений, накопления и обработки экспериментальных данных с выводом на экран монитора и записью в файл интегральных параметров, быстроменяющихся давлений и температур в рабочих камерах, диаграмм движений запорных элементов клапанов компрессора и пневмодвигателя.

Особенностью работы поршневых пневмодвигателей и ПДКА является зависимость создаваемого крутящего момента (мощности) и числа оборотов коленчатого вала от начального давления воздуха. Эту особенность необходимо учитывать при математическом моделировании рабочих процессов.

В математической модели процесса пневмодвигателя, приведенной в [8], эта особенность не была реализована в полной мере, поскольку эта модель описывала только режимы работы физической модели двигателя. При отличающихся геометрических параметрах машины и клапанов, режимов работы такая модель процессов может быть использована и для установления частоты вращения вала, но только вместе с безразмерной зависимостью, приведенной в [9]. Но в связи с тем что область применения полученной зависимости ограничена диапазоном входящих в нее параметров (n , D , S , C_{np} , a , типа клапанов), необходимы дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования подобного типа машин.

Математические модели рабочих процессов компрессора и пневмодвигателя ПДКА включают известные уравнения: энергии термодинамического тела переменной массы, расхода, состояния, динамики запорных элементов самодействующих клапанов. К ним добавляются уравнения расчета потерь на трение в кривошипно-

шатунном механизме. Используются допущения: газ идеальный, процессы в рабочих полостях являются равновесными и квазистационарными, угловая частота вращения вала неизменна в течение рабочего цикла, течение воздуха в трубопроводах, клапанах неплотностях считается адиабатным через эквивалентные круглые отверстия, картер агрегата выполнен с бесконечным объемом. Уравнения динамики запорных элементов для кольцевых полосовых и тарельчатых клапанов компрессора и пневмодвигателя реализованы в одномассовой, для лепестковых и прямоточных клапанов в многомассовой постановке.

Расчет рабочего процесса агрегата на ЭВМ проводится известными численными методами Эйлера или Рунге Кутты. В качестве начальных условий принимаются параметры воздуха p , T в рабочих полостях и положения запорных элементов клапанов. Для компрессора - в положении ВМТ, для цилиндров пневмодвигателя с учетом угла фазового сдвига рядов относительно компрессорного ряда. Предварительно задаются также частотой вращения коленчатого вала агрегата.

Условием окончания внутреннего вычислительного цикла является установление равенства (отклонения с установленной погрешностью) предыдущих от последующих значений параметров процесса в цилиндрах для начальных положений поршней. После чего производится расчет интегральных показателей работы компрессора и пневмодвигателя агрегата, проверка энергетического баланса:

$$N_{i,де} = N_{i,к} + N_{тр,к} + N_{тр,де}.$$

вычисление энергетической функции

$$f(n) = N_{i,де} - (N_{i,к} + N_{тр,к} + N_{тр,де}).$$

Затем число оборотов коленчатого вала изменяется на величину Δn и итерационный расчет повторяется для вновь принятой частоты $(n + \Delta n)$ с проверкой энергетического баланса и вычислением нового значения $f(n + \Delta n)$.

Следующее значение частоты вращения коленчатого вала агрегата после этого вычисляется с использованием известного метода Ньютона (внешний цикл):

$$n_{k+1} = n_k - \Delta n \cdot f(n) / f'(n),$$

где $f'(n) = [f(n + \Delta n) - f(n)] / \Delta n$ - производная энергетической функции ПДКА при установленной частоте вращения коленчатого вала; k - параметр внешнего вычислительного цикла.

Вычисление частоты вращения коленчатого вала на основе энергетического баланса можно также использовать при математическом моделировании рабочих процессов детандер - компрессорных агрегатов с дожимающими компрессорами и поршневыми детандерами, приводимыми в действие от самостоятельного источника газа повышенного давления, например, природного газа, подлежащего редуцированию перед подачей его в газопроводы.

Аналогичный способ, основанный на методе Ньютона, хорошо зарекомендовал себя при расчете промежуточного давления двухступенчатых компрессоров и детандер - компрессорных агрегатов с самодействующими клапанами [10].

На основе полученных экспериментальных данных для пневмодвигателя была выбрана методика проектирования ПДКА с самодействующей системой воздухораспределения, состоящая из двух этапов. На первом этапе с помощью инженерного расчета определяются основные геометрические соотношения ПДКА, обеспечивающие его работоспособность. На втором этапе с помощью математической модели рабочих процессов проводится оптимизация рабочих процессов, в результате которой уточняются конструктивные параметры агрегата и клапанов. В качестве целевой функции используются удельные затраты на сжатие газа в дожимающем компрессоре.

В математических моделях рабочих процессов, разработанных ранее на кафедре, для детандер – компрессорного агрегата и пневмодвигателя при расчете внешнего теплообмена использовалась формула Ньютона, где известными являются температуры стенок рабочих полостей и коэффициенты теплоотдачи. Расчет коэффициентов теплоотдачи в математических моделях процессов поршневых расширительных машин проводился по формулам, предложенным в [11]. Рекомендованные в работе зависимости, полученные на основании экспериментальных процессов поршневых компрессоров, не совсем справедливы для детандеров и пневмодвигателей. В связи с этим появляется необходимость в проведении экспериментальных исследований с целью получения зависимостей для расчета температурного состояния и коэффициентов теплоотдачи поверхностей рабочих камер в математических моделях процессов детандеров и пневмодвигателей с самодействующими клапанами.

Поскольку при работе пневмодвигателей и ПДКА немаловажное значение для шахт и подземных разработок имеют холодильный эффект и чистый отработанный воздух, необходимы исследования в направлении разработки компрессорно-расширительных машин без смазки цилиндров, которые также ведутся на кафедре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Костарев А.П. О предупреждении взрывов метана и пыли и снижения взрывоопасности шахт // Журнал уголь.-2002.-№1.-С.7-11.
2. Зиневич В.Д., Гешлин Л.А.. Поршневые и шестеренчатые пневмодвигатели горношахтного оборудования. -М.:Недра,1975.-199 с.
3. Горбунов В.Ф.,Резник Б.Л, Фукс Л.А. О стандартизации качества пневматической энергии // Стандарт и качество.- 1972.-№8.
4. Тихонов Б.Д., Никитин С.Н. Область применения промежуточных дожимных компрессоров в условиях угольных шахт / Сб. науч. тр. Горная электромеханика и технология горного машиностроения. – Харьков.: ХГИ.-1958.
5. Никитин С.Н. Применение дожимных компрессоров на шахте // Уголь Украины.-1962.-№4.
6. Калекин В.С. Рабочие процессы поршневых компрессорно-расширительных агрегатов с самодействующими клапанами: Дис... д-ра техн. наук.- Омск.- 1999. - 450 с.
7. Ваяншов А.Д., Калекин В.С., Коваленко С.В. Анализ рабочих процессов поршневых детандер – компрессорных агрегатов //Динамика систем, механизмов и машин: Материалы IV Международной научно – технической конференции. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2002.- С.401-403.
8. Бычковский Е.Г., Калекин В.С, Плотников В.А. Математическая модель поршневого пневмодвигателя с самодействующими клапанами // Вестник Кузбасского государственного технического университета.-1999.- № 4.- С.5-8.

9. Калекин В.С., Бычковский Е.Г. Применение безразмерных зависимостей для расчета и проектирования поршневых расширительных машин // Химическое и нефтегазовое машиностроение.- 2003. -№7.- С.28-29.
10. Ваняшов А.Д., Калекин В.С., Плотников В.А. Расчет поршневых многоступенчатых компрессорных машин и детандер-компрессорных агрегатов методом математического моделирования // Вестник Кузбасского государственного технического университета.-1999.- № 5.- С.10-13.
11. Прилуцкий И.К. Разработка, исследование и создание компрессоров и детандеров для криогенной техники: Дис... д-ра техн. наук. –Л., 1991.- 523 с.

Поступила в редакцию 15 октября 2004г.

