

УДК 621.514

Исследование вибрационных процессов в винтовых маслозаполненных компрессорах

Филиппов И. В.^{1,*}

[*fv61@yandex.ru](mailto:fv61@yandex.ru)

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Вибродиагностика является перспективным методом диагностирования, обеспечивающим комплексную безразборную оценку технического состояния машин при их эксплуатации. Вибродиагностирование винтовых маслозаполненных компрессоров преследовало цель установления отклонения компрессора от основного режима по изменению свойств вибрационных процессов. Экспериментальные исследования вибрационных процессов проводились с использованием высокоточного трёхканального виброизмерительного комплекта SM231. Для обработки виброинформации, с целью повышения отношения «сигнал/шум» и выделения пиковых значений виброускорений, использовался метод стробирования. Установлена достаточно тесная связь между уровнем «анормальности» режима компрессора и параметрами вибрационных процессов, сопровождающих его работу.

Ключевые слова: винтовой компрессор, вибродиагностика, стробирование

Введение

Виброакустическая диагностика является перспективным методом диагностирования, обеспечивающим комплексную безразборную оценку технического состояния машин и механизмов при их доводке и эксплуатации. Возникающие в машинах вибрационные процессы высокоинформативны, достаточно полно отражают техническое состояние многих узлов и деталей, а также характер протекания рабочих процессов. В отличие от других способов диагностирования, вибродиагностика позволяет не только обнаружить неисправность, но и выявить её причины. Однако, определение необходимой для исследования информации, её получение, анализ и использование достаточно сложно и во многом обуславливается связями вибропроцессов с диагностируемыми параметрами, а эти связи отличаются многообразием [1, 2, 3]. Назначением вибродиагностирования винтовых маслозаполненных компрессоров (далее – ВКМ) является оценка отклонения работы компрессора от основного режима по изменению свойств вибрационных процессов.

1. Постановка задачи

Опыт эксплуатации ВКМ на ряде предприятий страны показал, что, несмотря на достаточно высокий уровень надёжности компрессоров этого типа, имеются случаи отказов (аварий), заключающиеся в воспламенении масловоздушной смеси. Анализ статистических данных натуральных наблюдений за эксплуатацией сорока ВКМ типа 6ВКМ-25/8, работающих на карьерах Ингулецкого, Качканарского ГОКов и комбината «Ураласбест», показал, что вероятность безотказной работы ВКМ в течение 500 часов составляет 0,52, а наибольшее количество отказов приходится на маслоотделитель – 17% [4]. Изучение материалов о наработках ВКМ типов 6ВКМ-25/8 (4 шт.) и 7ВКМ-32/8 (3 шт.), полученных автором на карьере «Мукуланский» Тырныаузского вольфрамомолибденового комбината, даёт несколько лучшие показатели надёжности: коэффициент технического использования – 0,824, коэффициент технической готовности – 0,857. Пристальное внимание к проблеме надёжности (безопасности) ВКМ обусловлено тем обстоятельством, что на практике авария, заключающаяся в воспламенении масловоздушной смеси, зачастую приводила к взрыву компрессоров.

Изучением причин отказов, обусловленных воспламенением масловоздушной смеси в ВКМ занимался ряд учёных и специалистов: Архангельский Л.Н., Каплун А.А., Помазан О.К. [5]; Назаров В.В. [4]; Лобода В.В. [6]; Залесский П.С. [7]; Сапронов В.Т., Фёдоров М.М., Базюк В.Е. [8] и другие. В перечисленных работах высказывались различные гипотезы, приводились многочисленные причины взрывов, которые, по всей видимости, имеют право на существование и дают объяснение конкретным случаям взрывов ВКМ.

Общий вывод из проведённого анализа результатов исследований [4-8], можно сформулировать следующим образом: аварии ВКМ имеют место в результате отказов встроенных защит и отдельных систем, нарушений правил технической эксплуатации и при технической исправности компрессорной установки возможность аварий, связанных с воспламенением и взрывом масловоздушной смеси, исключается.

В свою очередь, автором была предложена своя версия причины воспламенения и взрыва масловоздушной смеси – наличие начального разрыва (далее – НР) и его распад при работе ВКМ в аномальных режимах [9, 10].

Применение виброакустической диагностики ставит перед исследователем множество задач: в том числе, какие параметры вибрационных процессов использовать для оценки; в каких точках машины или механизма производить их измерение; какую измерительную аппаратуру использовать; какой применить метод выделения и представления информации и т.д. Но в первую очередь, по всей видимости, необходимо ответить на вопрос о принципиальной возможности использования виброинформации для оценки состояния машины и протекающих в ней процессах (в нашем случае, машина – это ВКМ, процессы – это фаза нагнетания). Вибродиагностике компрессоров посвящено немало научных работ [11-13], но в них рассматриваются, как правило, вибрационные процессы, происходящие в поршневых компрессорах.

При работе ВКМ в аномальных режимах в момент соединения полостей сжатия с камерой нагнетания происходит процесс выравнивания давлений, который протекает весьма интенсивно и сопровождается сложными газодинамическими явлениями – НР и их распадами. Указанные газодинамические явления оказывают существенное влияние на характер протекания вибрационных процессов, что позволяет предположить наличие связи вибропараметров и режима работы компрессора.

2. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования, проведённые на ВКМ типа 6ВКМ-25/8 обработка и анализ полученных данных, дали следующие результаты:

- определены точки, вибрационные параметры в которых наиболее полно отражают техническое состояние компрессоров и характер, протекающих в них процессов;
- наиболее приемлемым для дальнейшего анализа вибропараметром признано виброускорение, а, именно, его пиковое значение;
- для обработки виброинформации, с целью повышения отношения «сигнал/шум» и выделения пиковых значений виброускорений, предложено использовать метод стробирования, который был реализован с помощью пакета Signal Processing Toolbox математической системы MATLAB 6.0;
- установлено наличие достаточно тесной корреляционной связи между соотношением давлений внутреннего сжатия и в камере нагнетания K_d , характеризующим степень «анормальности» режима работы компрессора, и вибрационными параметрами.

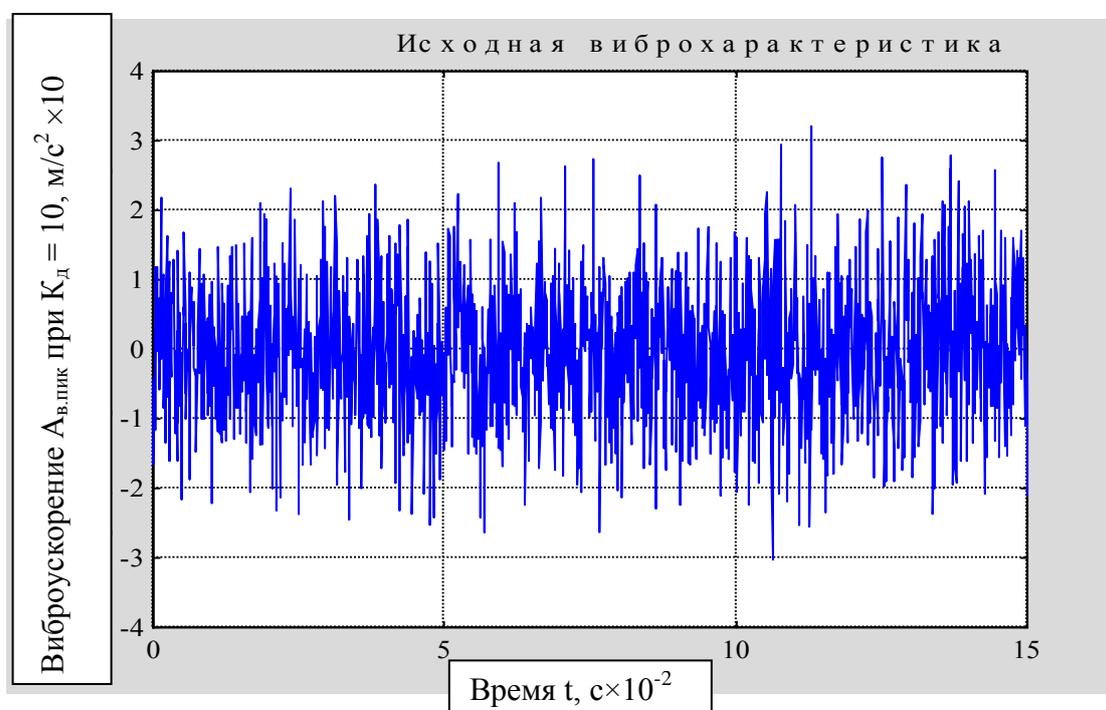


Рис. 1. Исходные данные: K_d – соотношение давлений сжатого воздуха в камере нагнетания и внутреннего сжатия ВКМ

Экспериментальные исследования вибрационных процессов проводились с использованием высокоточного трёхканального виброизмерительного комплекта SM231 (11003), прецизионных датчиков виброускорения KD-35, самописца ENDIM 621.01. Полученная таким образом информация о виброускорениях, имеющих место при том или ином режиме, вводилась в программу, работающую в среде математической системы MATLAB 6.0 (Signal Processing Toolbox). Метод стробирования реализовывался заданием фильтра, отслеживающего пиковые значения виброускорения в моменты времени, соответствующие фазе нагнетания компрессора. Результаты представлены на рис. 1 и 2.

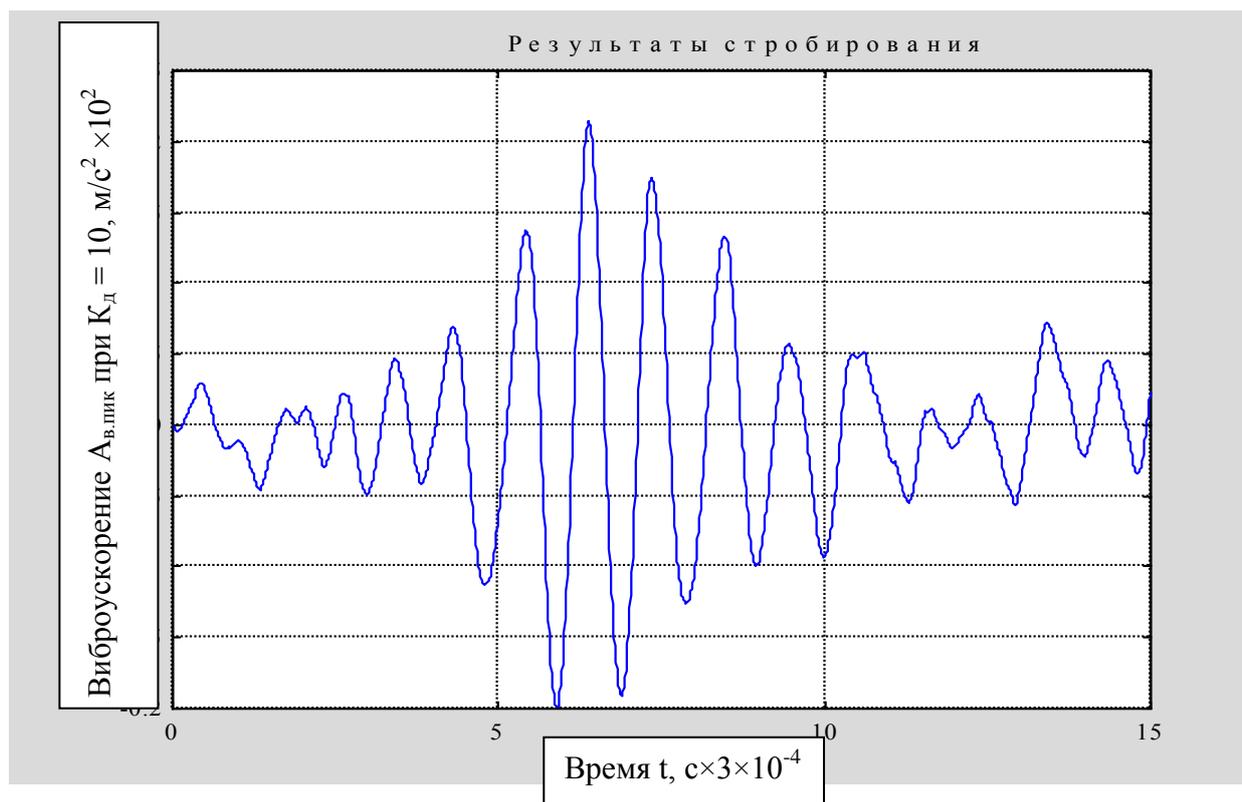


Рис. 2. Результаты стробирования виброинформации

В результате статистического анализа виброинформации получены выборочные средние значения пикового виброускорения $A_{в.пик}$ в различных точках корпуса компрессора и для различных значений K_d . Корреляционный анализ полученных экспериментальных данных показал наличие достаточно тесной связи между $A_{в.пик}$ и K_d : коэффициент корреляции в среднем составил 0,969. Регрессионный анализ экспериментальных данных, произведённый с помощью математического пакета Table Curve2D, позволил получить следующее уравнение регрессии:

$$A_{в.пик} = -1767,6 + 1795,5 \exp\left[-\frac{(K_d - 20,13)^2}{277,8^2}\right], \quad (1)$$

где $A_{в.пик}$ - среднее значение пикового виброускорения, $м/с^2$.

Для наглядной иллюстрации можно привести данные регрессионного анализа параметров газа после НР, полученные при помощи пакета Table Curve2D. В данном случае, регрессионный анализ преследует не совсем обычную цель: определить уравнение регрессии данных, полученных, в свою очередь, расчётным путём. В качестве исходных данных для поиска уравнений регрессии $M_{ув} = f_1(K_d)$, $T_{ув} = f_2(K_d)$ и $V_{ув} = f_3(K_d)$, где $M_{ув}$, $T_{ув}$, и $V_{ув}$ – мера интенсивности (число Маха), температура газа и скорость ударной волны (далее - УВ), возникшей после распада НР, принимаются результаты вычислений [9, 10]. Итоги такого, своеобразного, регрессионного анализа представлены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты уравнения регрессии типа $Y = A + B \exp\{-[(X - C)^2/D^2]\}$ (уравнение Гаусса), где $X=K_d$

Y	A	B	C	D	R ²
$M_{ув}$	-150,106	151,616	17,925	218,278	0,9755
$T_{ув}$	-31900,500	32394,600	18,124	209,158	0,9752
$V_{ув}$	-62769,300	63441,800	18,653	195,947	0,9747
$A_{в.пик}$	-1767,600	1795,450	20,134	277,804	0,9914

Примечание: R² – достоверность аппроксимации.

Сравнивая данные, приведённые в табл. 1, в частности, параметр C, определяющий форму аппроксимирующей кривой, можно сделать вывод о достаточно высокой степени сходства между установленными уравнениями регрессии.

Практически адекватная реакция параметров УВ ($M_{ув}$, $T_{ув}$ и $V_{ув}$) и пикового значения виброускорения $A_{в.пик}$ на изменение величины K_d , является обстоятельством, свидетельствующем о большой степени правдоподобия выдвинутой гипотезы о существовании НР в ВКМ при работе в аномальных режимах.

Помимо описанного регрессионного анализа, была произведена оценка тесноты корреляционной связи между параметрами УВ и пиковым значением виброускорения при одних и тех же значениях K_d . Были получены следующие результаты: $R(M_{ув}; A_{в.пик}) = 0,99207$; $R(T_{ув}; A_{в.пик}) = 0,99177$; $R(V_{ув}; A_{в.пик}) = 0,99379$ (где $R(X; Y)$ – коэффициент корреляции), которые говорят о наличии достаточно сильной связи между исследуемыми величинами.

Заключение

Подводя итог проведённым теоретическим и экспериментальным исследованиям вибрационных процессов, происходящих в ВКМ при работе в аномальных режимах, можно сделать следующие выводы:

- вибродиагностика позволяет определить режим работы ВКМ по изменению свойств вибрационных процессов;

- интенсивность УВ в ВКМ определяются начальными параметрами газа при прочих равных условиях;

- установлена достаточно тесная связь между параметрами газа после распада НР (а, значит, уровнем «анормальности» режима работы компрессора) и параметрами вибрационных процессов, сопровождающих работу ВКМ;

- стробирование виброинформации позволило установить, что пиковое значение виброускорения совпадает по времени с началом фазы нагнетания.

Список литературы

1. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1987. 288 с.
2. Васильев А.В., Огарков А.А. Исследование вибрации трубопроводов поршневых компрессорных установок ОАО "КУЙБЫШЕВАЗОТ" // II международный экологический конгресс (IV международная научно-техническая конференция) "Экология и безопасность жизнедеятельности промышленно-транспортных комплексов" (Тольятти, 24-27 сентября 2009 г.): тр. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2009. С. 57-63.
3. Быков С.В. Погрешность оценки вибрационного состояния оборудования // Экспозиция Нефть Газ. 2012. № 3. С. 19-20.
4. Назаров В.В. Эксплуатационная надёжность компрессорной установки // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1977. № 8. С. 86-87.
5. Архангельский Л.Н., Каплун А.А., Помазан О.К. Исследование процесса наполнения ёмкости как возможная причина взрыва в пневматической системе // Известия ВУЗов. Горный журнал. 1983. № 5. С. 78-80.
6. Лобода В.В. Пусковой режим шахтной винтовой компрессорной станции // Уголь Украины. 1985. № 7. С. 36-37.
7. Залесский П.С. Повышение безопасности эксплуатации рудничных передвижных компрессорных станций // Уголь Украины. 1981. № 6. С. 39-40.
8. Сапронов В.Т., Фёдоров М.М., Базюк В.Е. Тепловые режимы винтовых маслозаполненных компрессоров // Шахтное строительство. 1983. № 5. С. 13-15.
9. Филиппов И.В. Ударные волны в винтовых маслозаполненных компрессорах // Известия ВУЗов. Машиностроение. 1995. № 1-3. С. 26-32.
10. Филиппов И.В. Начальный разрыв и его распад в винтовых компрессорах // Труды МГТУ им. Н.Э. Баумана № 568. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1996. С. 118-123.
11. Kostyukov V.N. Naumenko A.P. Condition monitoring of reciprocating machines // In: Proc. of the 22nd Intern. Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2009). Spain, San Sebastian, June 9-11, 2009. Fundacion TEKNIER, 2009. P. 113-120.

12. Костюков В.Н., Науменко А.П. Анализ современных методов и средств мониторинга и диагностики поршневых компрессоров. Часть 2. Системы real-time мониторинга // В мире неразрушающего контроля. 2010. № 2 (48). С. 28-35.
13. Костюков В.Н., Науменко А.П. Проблемы и решения безопасной эксплуатации поршневых компрессоров // Компрессорная техника и пневматика. 2008. № 3. С. 21-28.

The Study of Vibration Processes in Oil Flooded Screw Compressors

I.V.Filippov^{1,*}

* fv61@yandex.ru

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: screw compressor, vibration-based diagnostics, strobing

Vibration processes that accompany most of machines and mechanisms are of interest to the researcher, as a source of information about the technical condition and the nature of the business processes flow. Vibration-based diagnostics of oil flooded screw compressors allows us to estimate the deviation of their operation from the main mode in accordance with changing the settings of vibration processes.

The oil flooded screw compressor transition from the main mode of operation to the abnormal one is accompanied by complex gas-dynamic phenomena i.e. the initial gaps and their decays. This leads to changes in the nature of vibration processes, prompting suggestions that there is a relationship to a change of vibration parameters and mode of compressor operation.

Studies were conducted by combined method using an analytical calculation of the decay parameters of the initial discontinuity and an experimental one based on the measurement of acceleration on the body of the real oil flooded screw compressor. A virtually adequate reaction of the decay parameters of the initial gap and the peak values of vibration acceleration to the change of operation mode of oil flooded screw compressor has been received. The peak value of the vibration acceleration was selected by the method of Gating being time-coinciding with the beginning discharge phase of the oil flooded screw compressor, and therefore, with the decay time of the initial discontinuity.

This indicates a large degree of hypothesis likelihood on an existing initial break in oil flooded screw compressor when operating in abnormal conditions. This work contains the study results of vibration processes and their relationship to the operating mode of the oil flooded screw compressor, which distinguish it from the other works studied vibration processes in reciprocating compressors. The vibration parameters control of operating oil flooded screw compressor allows us to create an automatic capacity control system with vibration acceleration feedback. Such system implementation will allow us to exclude extremely dangerous regimes of polytropic boosting during discharge phase when there is mismatch between the internal compression pressure of the oil flooded screw compressor and that of in discharge line.

References

1. Genkin M.D., Sokolova A.G. *Vibroakusticheskaia diagnostika mashin i mekhanizmov* [Vibroacoustic diagnostics of machines and mechanisms]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 288 p. (in Russian).
2. Vasil'ev A.V., Ogarkov A.A. Study of vibration of pipelines of reciprocating compressor units of JSC "KUIBYSHEVAZOT". 2 *mezhdunarodnyi ekologicheskii kongress (4 mezhdunarodnaia nauchno-tehnicheskaiia konferentsiia) "Ekologiia i bezopasnost' zhiznedeiatel'nosti promyshlennno-transportnykh kompleksov"*: tr. [Proc. of the 2 International ecological congress (the 4 International scientific-technical conference "Ecology and life safety of industrial-transport complexes"]]. Tol'iatti, 24-27 September, 2009. Tol'iatti, TSU Publ., 2009, pp. 57-63. (in Russian).
3. Bykov S.V. The estimation error of vibration condition of the equipment. *Ekspozitsiia Neft' Gaz = Exposition Oil and Gas*, 2012, no. 3, pp. 19-20. (in Russian).
4. Nazarov V.V. The operational reliability of the compressor unit. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 1977, no. 8, pp. 86-87. (in Russian).
5. Arkhangel'skii L.N., Kaplun A.A., Pomazan O.K. Study of process of filling tank as possible cause of explosion in pneumatic system. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal*, 1983, no. 5, pp. 78-80. (in Russian).
6. Loboda V.V. Starting regime of mine screw compressor station. *Ugol' Ukrainy*, 1985, no. 7, pp. 36-37. (in Russian).
7. Zalesskii P.S. Improving the safety of operation of mine mobile compressor stations. *Ugol' Ukrainy*, 1981, no. 6, pp. 39-40. (in Russian).
8. Sapronov V.T., Fedorov M.M., Baziuk V.E. Thermal regimes of oil-injected screw compressors. *Shakhtnoe stroitel'stvo*, 1983, no. 5, pp. 13-15. (in Russian).
9. Filippov I.V. Shock waves in the oil filled screw compressors. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1995, no. 1-3, pp. 26-32. (in Russian).
10. Filippov I.V. The initial discontinuity and destruction in screw compressors *Trudy MGTU im. N.E. Baumana. Vol. 568* [Proc. of the Bauman MSTU. Vol. 568]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1996, pp. 118-123. (in Russian).
11. Kostyukov V.N. Naumenko A.P. Condition monitoring of reciprocating machines. In: *Proc. of the 22nd Intern. Congress of Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Manage-*

ment (COMADEM 2009). Spain, San Sebastian, June 9-11, 2009. Fundacion TEKNIER, 2009, pp. 113-120.

12. Kostiukov V.N., Naumenko A.P. The Analysis of Modern Methods and Tools for Condition Monitoring and Diagnostics of Reciprocating Compressors. Pt. 2. Real-Time Monitoring Systems. *V mire nerazrushaiushchego kontrolya = NDT World*, 2010, no. 2 (48), pp. 28-35. (in Russian).
13. Kostiukov V.N., Naumenko A.P. Problems and solutions of safe operation of piston compressors. *Kompressornaia tekhnika i pnevmatika*, 2008, no. 3, pp. 21-28. (in Russian).