

УДК 004.94:62-1/-9

**Е.Р. Мошев**

Пермский национальный исследовательский  
политехнический университет, Пермь, Россия

**М.А. Ромашкин**

ООО «УралПромБезопасность», Пермь, Россия

**Р.А. Кантюков, Р.К. Гимранов, А.Г. Попов,  
Ф.М. Мустафин, В.К. Модин**

ООО «Газпром трансгаз Казань», Казань, Россия

**АЛГОРИТМ РАСЧЕТА РЕСУРСА  
ПОРШНЕВЫХ КОМПРЕССОРОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ДИСКРЕТНОГО ВИБРОМОНИТОРИНГА**

*Поршневые компрессоры широко распространены в нефтегазовой отрасли, включая предприятия нефтехимии, нефте- и газопереработки, компрессорные станции газораспределительных систем, станции перекачивания углеводородного сырья, и относятся к классу технических устройств, от надежной работы которых существенно зависят эффективность и безопасность эксплуатации всего предприятия. Результирующим показателем работоспособности поршневых компрессоров является уровень вибрации элементов его конструкции и конструкции элементов трубопроводной обвязки, образующей вместе с поршневым компрессором единую систему конструктивно-технологического типа – поршневой компрессорный агрегат.*

*На практике определение уровня вибрации поршневых компрессоров осуществляется преимущественно с помощью вибродиагностики, проводимой периодически через определенные интервалы времени. Периодический, или дискретный вибромониторинг не позволяет получить надежную оценку работоспособности компрессорных агрегатов на период межремонтного пробега.*

*В результате работы алгоритма осуществляется расчет дат достижения элементов поршневого компрессорного агрегата критического уровня вибрации для пяти стандартных функцио-*

*нальных зависимостей. В качестве основной выбирается наиболее ранняя дата достижения критического уровня вибропараметра, при этом дополнительно учитывается точность аппроксимации.*

*Проверка работоспособности алгоритма была проведена в среде MathCAD с использованием экспериментальных данных вибродиагностики, полученных при проведении экспертизы промышленной безопасности поршневых компрессорных агрегатов предприятий нефтехимического профиля. Предполагается, что программная реализация разработанного алгоритма должна повысить надежность эксплуатации поршневых компрессорных агрегатов и способствовать переходу к системе технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию.*

**Ключевые слова:** *поршневой компрессорный агрегат, вибрация, алгоритм, межремонтный период, дискретный вибромониторинг, экстраполяция.*

**E.R. Moshev**

Perm National Research Polytechnic University,  
Perm, Russian Federation

**M.A. Romashkin**

LLC "Uralprombezopasnost", Perm, Russian Federation

**R.A. Kantyukov, R.K. Gimranov, A.G. Popov,  
F.M. Mustafin, V.K. Modin**

LLC "Gazprom transgaz Kazan", Kazan, Russian Federation

## **THE ALGORITHM FOR CALCULATING THE RESOURCE RECIPROCATING COMPRESSOR ACCORDING TO THE RESULTS OF DISCRETE VIBRATION MONITORING**

*Reciprocating compressors are widely distributed in the oil and gas industry, including petrochemical companies, oil and gas processing facilities, compressor stations and gas distribution systems, pumping station hydrocarbons and it belong to the class of technical devices, reliable operation which significantly influence the efficiency and safety of operation of the entire enterprise. The resulting indicator of the operational capability of reciprocating compressors is the vibration components of its structure and construction elements piping, that form-*

*ing together with piston compressor unified structural-technological system – piston compressor unit.*

*In practice, the determination of the level of vibration of the reciprocating compressor are mainly using vibrodiagnostics, which conducted periodically at certain intervals of time. Periodic or discrete analysis of vibration does not allow to obtain reliable assessment of the operational capability of a compressor units for the period of turnaround.*

*Algorithm calculates of the date of achievement of the element piston compressor unit critical vibration level for the five standard functional dependencies. As the main selects the earliest date of onset a critical level of parameter vibration, also additionally is taken into account the accuracy of the approximation.*

*Checking the operational capability of the algorithm was carried out in MathCAD using the experimental data of vibration obtained during the examination of industrial safety of reciprocating compressor units of factories of the petrochemical profile. Software implementation of the developed algorithm should improve the reliability of operation of reciprocating compressor units, and facilitate the transition to the system of technical maintenance and repair of the actual state.*

**Keywords:** *piston compressor unit, vibration, algorithm, turnaround time, discrete analysis of vibration, extrapolation.*

Поршневые компрессоры (ПК) благодаря способности обеспечивать постоянство расхода транспортируемой газообразной среды независимо от создаваемого давления получили широкое распространение в нефтегазовой отрасли, включая предприятия нефтехимии, нефти и газопереработки, компрессорные станции газораспределительных систем, станции перекачивания углеводородного сырья. Вследствие большой роли в осуществлении производственного процесса, а также по причине сложности конструкции и высокой энергоемкости ПК относятся к классу технических устройств, от надежной работы которых всецело зависят эффективность и безопасность эксплуатации всего предприятия. Результирующим показателем работоспособности ПК является уровень вибрации элементов его конструкции и конструкции элементов трубопроводной обвязки, образующей вместе с ПК единую систему конструкционно-технологического типа – поршневой компрессорный агрегат (ПКА) [1, 2].

В подавляющем большинстве случаев причинами повышенной вибрации ПКА являются механический износ конструктивных элементов компрессора, обусловленный наличием динамических нагрузок

переменного характера и направления, а также пульсации давления рабочей среды, образующиеся вследствие цикличности работы поршней компрессора. В обоих случаях вибрация прогрессирует в сторону возрастания амплитуды вибропараметров. В связи со сказанным в условиях эксплуатации чрезвычайно важно осуществлять мониторинг вибросостояния как ПК, так и всего компрессорного агрегата.

На практике определение уровня вибрации осуществляется с помощью вибродиагностики – регламентированной процедуры, проводимой в рамках системы технического обслуживания и ремонта<sup>1</sup> всех видов динамического оборудования. В последнее время для контроля вибросостояния динамического оборудования центробежного типа часто используется непрерывный вибромониторинг, позволяющий получать тренд значений вибропараметров в реальном времени, что значительно облегчает оценку надежности работы центробежных компрессоров.

Для контроля вибросостояния ПКА в большинстве случаев проводится дискретный мониторинг, при котором виброобследования осуществляются в период от одного года до нескольких лет или чаще. Дискретный вибромониторинг не позволяет получить надежную оценку работоспособности ПКА на период межремонтного пробега. Низкая надежность полученной оценки, с одной стороны, приводит к перестраховке и побуждает предприятие осуществлять ремонт заранее, с другой стороны – к недооценке прогрессирования вибропараметров, что может послужить причиной возникновения аварийной ситуации. Повысить надежность оценки работоспособности ПКА можно с помощью статистически обоснованной экстраполяции результатов вибромониторинга на текущий плановый межремонтный период. Однако по причине большого количества результатов замеров вибропараметров решить данную задачу не компьютеризированными методами чрезвычайно сложно.

В соответствии со сказанным выше целью настоящей работы являлась разработка алгоритма, позволяющего автоматизировать расчет экстраполяционной кривой вибропараметров по результатам дискретного вибромониторинга.

---

<sup>1</sup> ПБ 03-582–03. Правила устройства и безопасной эксплуатации компрессорных установок с поршневыми компрессорами, работающими на взрывоопасных и вредных газах / ПИО ОБТ. М., 2003. 26 с.

Результаты дискретного вибромониторинга –  $x_i, y_i; i = [1 \dots N]$  – могут быть представлены как в табличном, так и в графическом виде, здесь  $N$  – количество сессий замеров вибрации,  $x_i$  – интегральное значение вибропараметра, например среднеквадратическое значение (СКЗ) виброскорости, полученное в  $i$ -ю сессию замеров;  $y_i$  – дата  $i$ -й сессии замеров. Оба вида представления вибропараметров формируются автоматически с помощью программного обеспечения вибродиагностического оборудования. В настоящей работе выбран табличный вариант представления параметров вибрации, который позволяет осуществить их автоматизированную обработку.

Результаты анализа изменения вибропараметров ПКА во времени показали, что по причине неопределенности факторов, вызывающих вибрацию, для повышения надежности оценки технического состояния ПКА при экстраполяции экспериментальных данных следует использовать несколько разных функциональных зависимостей. Были использованы следующие табличные функции: линейная (1), полиномиальная 2-й степени (2), логарифмическая (3), степенная (4) и показательная (5):

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x; \quad (1)$$

$$\varphi(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2; \quad (2)$$

$$\varphi(x) = a \ln(x) + b, \quad (3)$$

$$\varphi(x) = ax^b, \quad (4)$$

$$\varphi(x) = a \cdot e^{kx}, \quad (5)$$

где  $a_0, a_1, a_2, a, b, k$  – расчетные коэффициенты аппроксимации.

С помощью выражений (1)–(5) авторами разработан алгоритм расчета по результатам дискретного мониторинга периода достижения элементами поршневого компрессорного агрегата недопустимого нормативно-технической документацией уровня вибрации. Кроме результатов дискретного вибромониторинга  $x_i, y_i; i = [1 \dots N]$  для функционирования разработанного алгоритма необходимы следующие входные переменные:

–  $x_{cr}$  – критическое значение параметра вибрации. Критическое значение принимается на основе нормативных документов или требований завода – изготовителя оборудования. Например, нормированные значения СКЗ виброскорости поршневого компрессора приведены в источниках, указанных в сноске<sup>2</sup>;

–  $z$  – количество последних по времени получения экспериментальных данных, которое следует учитывать при расчете,  $z = [1 \dots N]$ . Эта переменная задается пользователем исходя из условий расчета и имеющихся экспериментальных данных.

В результате работы алгоритма осуществляется расчет дат достижения поршневым компрессором критического уровня вибрации для каждой из зависимостей (1)–(5). Блок-схема алгоритма расчета дат достижения поршневым компрессором недопустимого уровня вибрации приведена на рисунке.

В качестве основной выбирается наиболее ранняя дата достижения критического уровня вибропараметра, при этом дополнительно учитывается точность аппроксимации, которая оценивается по величине  $S$  [3–8]:

$$S = \sum_{i=0}^N [\varphi(x_i) - y_i]^2.$$

Проверка работоспособности алгоритма проводилась в среде MathCAD с использованием экспериментальных данных вибродиагностики, полученных при проведении экспертизы промышленной безопасности поршневых компрессорных агрегатов предприятий нефтехимического профиля.

Программная реализация разработанного алгоритма должна повысить надежность эксплуатации поршневых компрессорных агрегатов и способствовать переходу к системе технического обслуживания и ремонта по фактическому состоянию.

---

<sup>2</sup> ГОСТ ИСО 10816-1-97. Межгосударственный стандарт. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. М.: Изд-во стандартов: Стандартинформ, 2010. 14 с.

РД 09-244-98. Инструкция по проведению диагностирования технического состояния сосудов, трубопроводов и компрессоров промышленных аммиачных холодильных установок / НТЦ «Промышленная безопасность». М., 2002. 91 с.

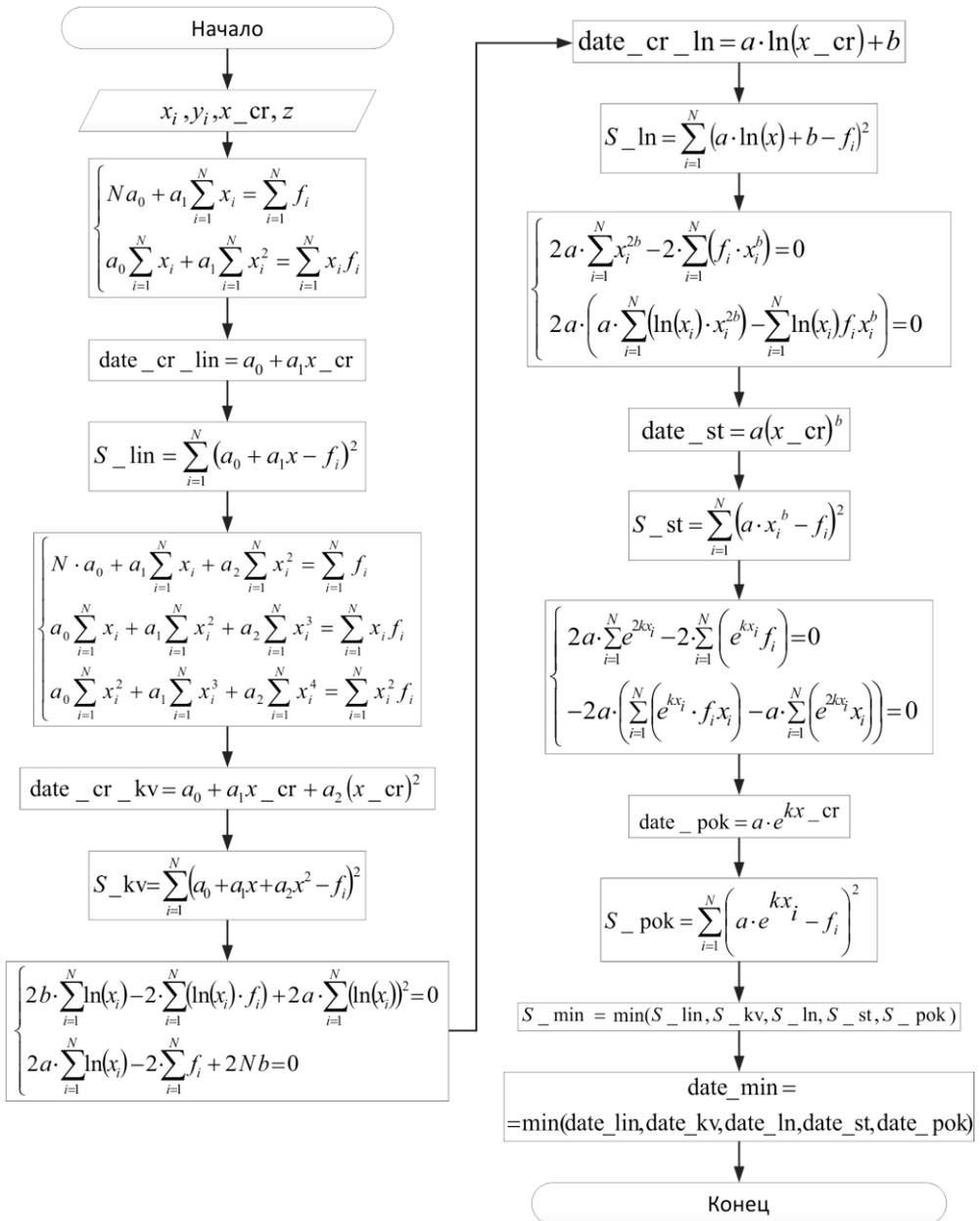


Рис. Блок-схема алгоритма расчета даты достижения поршневым компрессором недопустимого уровня вибрации

## Список литературы

1. Мошев Е.Р., Ромашкин М.А. Модели и алгоритмы расчета устройств для гашения пульсаций газообразной среды в трубопроводных системах // Прикладная информатика. – 2014. – № 2. – С. 56–76.
2. Бутусов О.Б., Мешалкин В.П., Кантюков Р.А. Компьютерное моделирование полей температуры и давления нестационарных турбулентных газовых течений в технологических трубопроводах // Химическая промышленность. – 1998. – № 7. – С. 433–438.
3. Турчак Л.И. Основы численных методов: учеб. пособие. – М.: Наука, 1987. – 320 с.
4. Вентцель Е.С. Теория вероятностей: учеб. для вузов. – 6-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 1969. – 576 с.
5. Попов В.П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 1985. – 496 с.
6. Де Бор К. Практическое руководство по сплайнам. – М.: Радио и связь, 1985. – 304 с.
7. Вапник В.М. Восстановление зависимостей по эмпирическим данным. – М.: Наука, 1979. – 448 с.
8. Румшицкий Л.З. Математическая обработка результатов эксперимента. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

## References

1. Moshev E.R., Romashkin M.A. Modeli i algoritmy rascheta ustroystv dlya gasheniya pulsatsii gazoobraznoy sredy v truboprovodnykh sistemakh [Models and algorithms for device calculations for damping pulsations gaseous medium in piping systems]. *Prikladnaya informatika*, 2014, no. 2, pp. 56-76.
2. Butusov O.B., Meshalkin V.P., Kanyukov R.A. Kompyuternoe modelirovanie poley temperatury i davleniya nestatsionarnykh turbulentnykh gazovykh techeniy v tekhnologicheskikh truboprovodakh [Computer simulation of temperature and pressure fields nonstationary turbulent gas flows in technological pipelines]. *Khimicheskaya promyshlennost*, 1998, no. 7, pp. 433-438.
3. Turchak L.I. Osnovy chislennykh metodov [Fundamentals of numerical methods]. Moscow: Nauka, 1987. 320 p.
4. Ventcel E.S. Teoriya veroyatnostey. Moscow: Vysshaya shkola, 1969. 576 p.
5. Popov V.P. Osnovy teorii tsepey [Fundamentals of circuit theory]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 496 p.
6. De Bor K. Prakticheskoe rukovodstvo po splaynam [Practical guide for splines]. Moscow: Radio i svyaz, 1985. 304 p.
7. Vapnik V.M. Vosstanovlenie zavisimostey po empiricheskim dannym [Restoration of dependencies from empirical data]. Moscow: Nauka, 1979. 448 p.

8. Rumshiskiy L.Z. Matematicheskaya obrabotka rezultatov eksperimenta [Mathematical processing of the experimental results]. Moscow: Nauka, 1971. 192 p.

### **Об авторах**

**Мошев Евгений Рудольфович** (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры машин и аппаратов производственных процессов Пермского национального исследовательского политехнического университета (614013, г. Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: erm@pstu.ru).

**Ромашкин Макар Андреевич** (Пермь, Россия) – эксперт отдела информационных технологий ООО «УралПромБезопасность» (614013, г. Пермь, ул. Академика Королева, 4; e-mail: t\_romash\_63@mail.ru).

**Кантюков Рафкат Абдулхаевич** (Казань, Россия) – кандидат технических наук, генеральный директор ООО «Газпром трансгаз Казань» (420073, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 41; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Гимранов Рашад Карибуллович** (Казань, Россия) – главный инженер ООО «Газпром трансгаз Казань» (420073, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 41; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Попов Алексей Гаврилович** (Казань, Россия) – ведущий специалист ООО «Газпром трансгаз Казань» (420073, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 41; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Мустафин Фаиль Магсумьянович** (Казань, Россия) – ведущий специалист ООО «Газпром трансгаз Казань» (420073, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 41; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Модин Вячеслав Константинович** (Казань, Россия) – ведущий специалист ООО «Газпром трансгаз Казань» (420073, г. Казань, ул. Аделя Кутуя, 41; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

### **About the authors**

**Evgeniy R. Moshev** (Perm, Russian Federation) – Ph.D. of technical sciences, associate professor, department of machines and apparatus of manufacturing processes, Perm National Research Polytechnic University (Komsomolsky av., 29, Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: mapp@pstu.ru).

**Makar A. Romashkin** (Perm, Russian Federation) – expert, department of information technology, LLC “Uralprombezopasnost” (Akademika Koroleva st., 4, Perm, 614013, Russian Federation; e-mail: t\_romash\_63@mail.ru).

**Rafkat A. Kantyukov** (Kazan, Russia) – Ph.D. of technical sciences, general director, LLC “Gazprom transgaz Kazan” (Adel Kutui st., 41, Kazan, 420073, Russian Federation, Republic of Tatarstan; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Rashad K. Gimranov** (Kazan, Russian Federation) – the chief engineer, LLC “Gazprom transgaz Kazan” (Adel Kutui st., 41, Kazan, 420073, Russian Federation, Republic of Tatarstan; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Aleksey G. Popov** (Kazan, Russian Federation) – a leading specialist, LLC “Gazprom transgaz Kazan” (Adel Kutui st., 41, Kazan, 420073, Russian Federation, Republic of Tatarstan; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Fail M. Mustafin** (Kazan, Russian Federation) – a leading specialist, LLC “Gazprom transgaz Kazan” (Adel Kutui st., 41, Kazan, 420073, Russian Federation, Republic of Tatarstan; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

**Vyacheslav K. Modin** (Kazan, Russian Federation) – a leading specialist, LLC “Gazprom transgaz Kazan” (Adel Kutui st., 41, Kazan, 420073, Russian Federation, Republic of Tatarstan; e-mail: info@tattg.gazprom.ru).

Получено 14. 02. 2015