

## Предсказание отказов вакуумных механизмов по параметру рабочее давление

*Р. О. Емельяненко, Е. Р. Тютюкин, Е.А. Деулин*  
Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана  
E-mail: novator90@yandex.ru, ert197@ya.ru, deulin@bmstu.ru

Представлена система предсказания отказов вакуумных механизмов, основанная на компьютерной обработке вакуумных параметров, как измеряемых в текущем режиме на эксплуатируемом оборудовании, так и стационарных механизмов, установленных на стенде.

*The vacuum mechanisms failure forecasting based on pressure parameter. R.O.Emelyanenko, E.R.Tyutyukin, E.A.Deulin. A system for predicting failures of vacuum mechanisms is presented. It is based on computer processing of vacuum parameters, measured in the current mode on the equipment being used and on stationary mechanisms.*

Базой для методики предсказания является диаграмма изменения потока газовыделения, характеризующая суммарный поток газовыделения на всем жизненном периоде работы механизма, начиная от момента запуска механизма, и заканчивая катастрофическим разрушением его кинематических (фрикционных) пар. рис 1, наглядно представленная в работах [1], [2].

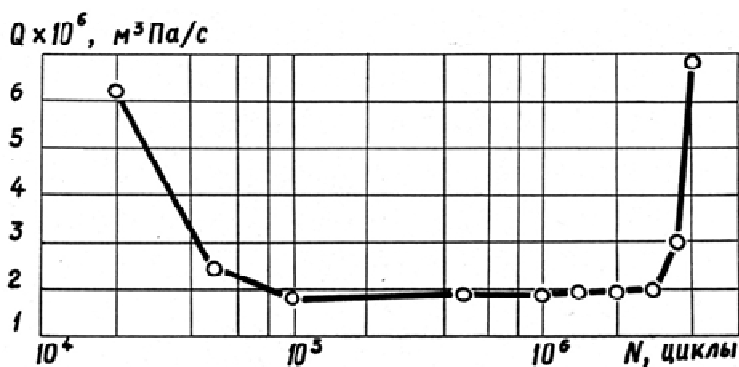


Рис.1. Характерная диаграмма изменения потока газовыделения [Вагин Н.С Марусов В.А. Кужман А.Г. Попов Е.Н.] за жизненный период работы механизма N циклов.

По оценке авторов диаграмма изменения потока газовыделения за весь период работы является ключом к диагностике механизма [2]. Отметим, что поток газовыделения после трогания механизма характеризуется интенсивным убыванием, переходящим в период стабильности, который заканчивается резким увеличением, определяемым началом катастрофического износа.

Отметим, что стабильность потока является усредненным показателем зависящим от мгновенных контактных взаимодействий элементов механизма. Характер «мгновенного» изменения потока газовыделения при контактных взаимодействиях элементов механизма отражен на рис.2, где показаны как мгновенные изменения потока (пунктир), так и давление P в вакуумном объеме, являющееся функцией потока Q, скорости откачки S<sub>0</sub>, объема вакуумной камеры V.

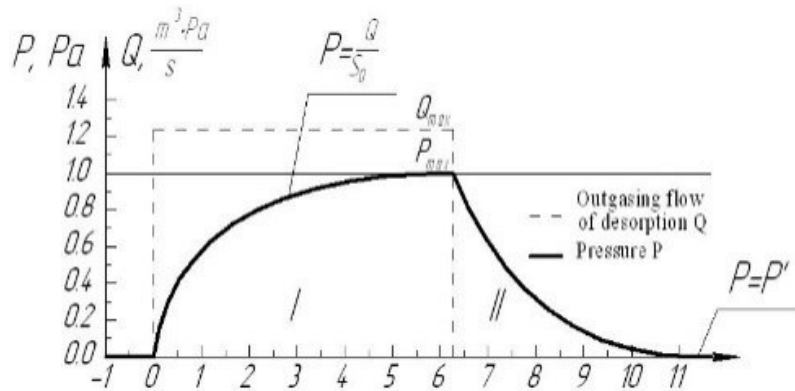


Рис.2 Диаграммы исходного потока газовой выделения  $Q_{мех}$  (пунктир) и результирующего давления в вакуумной камере  $P$  (широкая линия).

Из курса вакуумной техники [3] известно, что давление в вакуумной камере с установленным на ней механизмом характеризуется зависимостями, представленными на рис. 2, где:  $V$  – объем вакуумной камеры,  $m^3$ ;  $S_0$  – быстрота откачки,  $m^3/c$ ;  $Q_{\Sigma}$  – суммарный поток газовой выделения,  $m^3Pa/c$ ;  $Q_m$  – поток газовой выделения из механизма,  $m^3Pa/c$ ;  $t$  – время,  $c$ .

#### Основы методики предсказания

Представленное на рис. 2 изменение давления в системе позволяет оценивать газовойделение из механизма, установленного на вакуумной камере, но эта оценка усложняется тем, что указанные параметры в совокупности оказывают сглаживающее влияние на изменение давления при изменении потока газовой выделения [2] из механизма, как показано на рис.3. Авторами создана методика, позволяющая избежать ошибок при оценке потока газовой выделения из механизма, являющегося ключом к диагностике механизма.

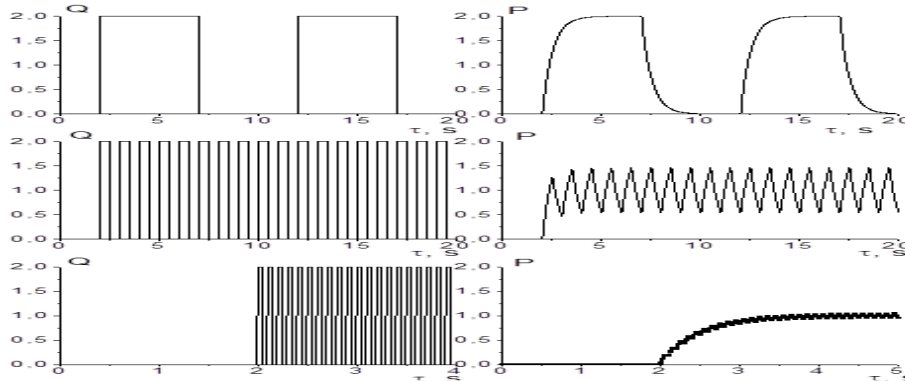


Рис.3 Трансформация показателей потока газовой выделения механизма  $Q_{\Sigma}$  (диаграммы слева) в параметр давления в вакуумной камере  $P$  (диаграммы справа).

Характерной ошибкой при оценке состояния механизма является уменьшение амплитуды колебания давления при увеличении частоты работы элементов механизма. Внешне такое уменьшение амплитуды выглядит как предполагаемое уменьшение суммарного потока газовой выделения из механизма, хотя реальный поток увеличивается, как показано на рис.3. Реальную картину позволяет получить математическое решение этой задачи трансформации показателя  $Q_{\Sigma}$  в параметр  $P$ , основанное на знании физики вакуумной техники. (Рис.4). (Увеличение частоты импульсного потока приводит к уменьшению амплитуды измеряемого давления, что создает **ошибочное представление** об отказе механизма)

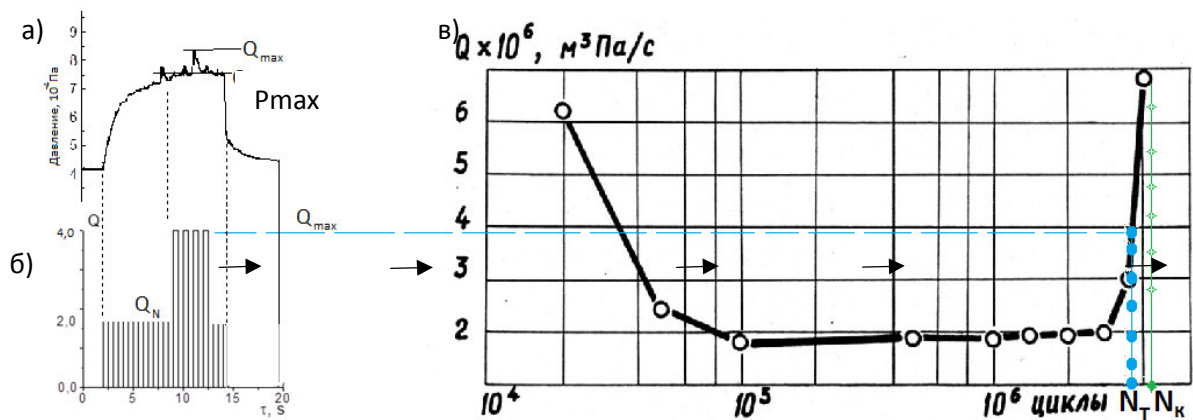


Рис.4. Иллюстрация алгоритма предсказания отказа вакуумного механизма по параметру «катастрофический поток газовыделения» ( $Q_{\max}$  – допустимый поток газовыделения из механизма): а) Замер давления  $P$  на стенде; б) Расчет потока  $Q$  по результатам замеров на стенде; в) Диаграмма изменения потока газовыделения за жизненный период эксплуатации.

Поток газовыделения из механизма формируемый в виде прямоугольных импульсов в моменты контактов кинематических пар может моделироваться с помощью компьютерного программирования потоков газовыделения из «виртуальных механизмов», создаваемых программным методом и установленным на стенде автоматизированным пьезонатекателем. Вакуумная система может быть представлена в виде апериодического звена с потоком МСГ  $Q(t)$  на входе и давлением  $p(t)$  на выходе (см.рис.4, шкала  $Q$ ):

$$V \frac{d(p_a - p_0)}{dt} = -S \cdot (p_a - p_0) + Q(t) \quad (1)$$

где  $p_a(t)$  – текущее абсолютное давление в вакуумной системе,  $V$  - объём вакуумной камеры,  $S$  - эффективная скорость откачки системы,  $Q(t)$  - исследуемый поток,  $p_0$  - предельное давление в вакуумной системе.

Сигнал Механо-Симулированного Газовыделения (МСГ) демпфируется вакуумной системой, т.е. пики давления, соответствующие пикам МСГ, имеют сглаженную форму и меньшую амплитуду, особенно при малых длительностях импульсов. Восстановление сигнала потока из экспериментально полученной записи сигнала давления  $p = f(t)$  возможно путем численного решения дифференциального уравнения (1). Недостатком этого метода является высокая чувствительность к шуму, которая увеличивается с уменьшением длительности пиков [5].

Для случая, когда сигнал потока МСГ имеет вид периодической последовательности пиков с малым разбросом по высоте, параметры потока МСГ могут быть подобраны путем подгона заданной модели к экспериментальным данным. В этом случае поток МСГ моделируется последовательностью импульсов заданной формы, после чего для данной последовательности отыскивается сигнал давления путем интегрирования. Для подгона параметров модели необходимо знать функциональные зависимости параметров сигнала давления от параметров сигнала потока МСГ. В работе [4] рассмотрен случай сигнала в виде прямоугольных импульсов. Поскольку физический механизм МСГ определяется диффузией, десорбцией и химическими реакциями, естественно предположить, что экспоненциальные функции более адекватно описывают процесс газовыделения по сравнению с прямоугольными пиками. Целью настоящей работы является разработка модели формирования сигнала давления для случая потока МСГ в виде последовательности пиков, описываемых экспоненциальными функциями.

**Математическая модель давления в вакуумной камере при нестационарном газовыделении**

Величина исследуемого потока может быть представлена как произведение амплитудного значения потока  $Q_m$  и безразмерной функции  $q(t)$ . Функция  $q(t)$  задается экспоненциальной зависимостью от времени  $t$ :

$$q(t) = \left( 1 - \exp \left[ \frac{-t + (b-t)H}{t_{01}} \right] \right) \exp \left[ \frac{(b-t)H}{t_{02}} \right] \quad (2)$$

Функция (2) определяет обе фазы пика - фронт и спад - при помощи функции Хевисайда (пороговой функции)  $H$ . Параметр  $b$  равен длительности фронта, а параметры  $t_{01}$  и  $t_{02}$  являются постоянными времени фронта и спада соответственно. Пороговая функция принимает значения

$$H = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq b \\ 1; & t \geq b \end{cases}$$

На фазе спада значение экспоненты стремится к нулю при  $t \rightarrow \infty$ , однако не достигает нуля. Для практического использования выражения (2) можно принять, что поток обращается в ноль, если его относительная интенсивность, т.е. отношение величины потока к амплитудному значению, не превышает некоторой заданной малой величины  $\Delta$ , определяемый по формуле.

$$\Delta = \exp \left[ \frac{b-t}{t_{02}} \right]$$

В практических расчетах величину  $\Delta$  можно принять равной 0,05.

После подстановки (2) в уравнение (1) и интегрирования получаем зависимость давления в вакуумной системе от времени и параметров потока газовыделения и вакуумной системы:

$$p = \frac{Q_m \exp \left[ \frac{H}{t_{02}}(b-t) \right]}{V \left( N - \frac{H}{t_{02}} \right)} - \frac{Q_m \exp \left[ b \left( \frac{H}{t_{02}} - \frac{H}{t_{01}} \right) + \left( -\frac{H}{t_{02}} + \frac{H-1}{t_{01}} \right) t \right]}{V \left( -\frac{H}{t_{02}} + \frac{H-1}{t_{01}} + N \right)} + c \exp[-Nt], \quad (3)$$

где  $c$  - постоянная интегрирования, зависящая от начальных условий, а  $\frac{1}{N} = \frac{V}{S}$  - постоянная времени вакуумной системы. Для простоты уравнение (3) записано для относительного давления  $P = p_a - p_0$ .

Пуём перехода к безразмерным переменным: безразмерного давления  $\rho = \frac{pS}{Q_m}$ , безразмерных объединенных постоянных времени процесса МСГ и вакуумной системы  $R_1 = Nt_{01}$  и  $R_2 = Nt_{02}$ , безразмерного параметра фазы фронта  $b_1 = \frac{Sb}{V}$  и безразмерного времени

$t_1 = \frac{St}{V}$ , - уравнение (3) примет вид:

$$\rho = \frac{\exp \left[ \frac{H}{R_2}(b_1 - t_1) \right]}{1 - \frac{H}{R_2}} - \frac{\exp \left[ H \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) (b_1 - t_1) - \frac{t_1}{R_1} \right]}{1 - \frac{H}{R_2} + \frac{H-1}{R_1}} + C \exp[-t_1] \quad (4)$$

Постоянная интегрирования  $C$  в (4) имеет значение отличное от постоянной  $c$  в (3). Следует отметить, что постоянные времена, входящие в уравнение для давления (4), равны отношению постоянной времени соответствующей фазы пика газовой выделения  $R_1$  и постоянной времени вакуумной системы. Это означает, что постоянные времена вакуумной системы и постоянные времена процессов газовой выделения имеют равнозначное и противоположное влияние на постоянную времени сигнала давления.

Поскольку уравнение (4) описывает обе фазы процесса, постоянная интегрирования принимает различные значения для каждой фазы. Значение постоянной для фронта  $C_1$  ( $H = 0$ ) определяется из условия  $p(t = 0) = 0$ , а для фазы спада  $C_2$  ( $H = 1$ ) – из условия неразрывности давления между фазами:

$$C_1 = \frac{1}{R_1 - 1}, \quad C_2 = \exp[b_1] \left( 1 - \frac{R_2}{R_2 - 1} \right) + \exp \left[ b_1 - \frac{t_1}{R_1} \right] \left( \frac{R_2}{R_2 - 1} - \frac{R_1}{R_1 - 1} \right) + \frac{1}{R_1 - 1}. \quad (5)$$

На Рис.5 представлены зависимости давления и потока от времени при различных значениях параметра  $b_1$ : ( $b_1 = 4; 8; 12$ ). Значения постоянных времени в расчетах приняты  $R_1 = 2$  и  $R_2 = 1.5$ .

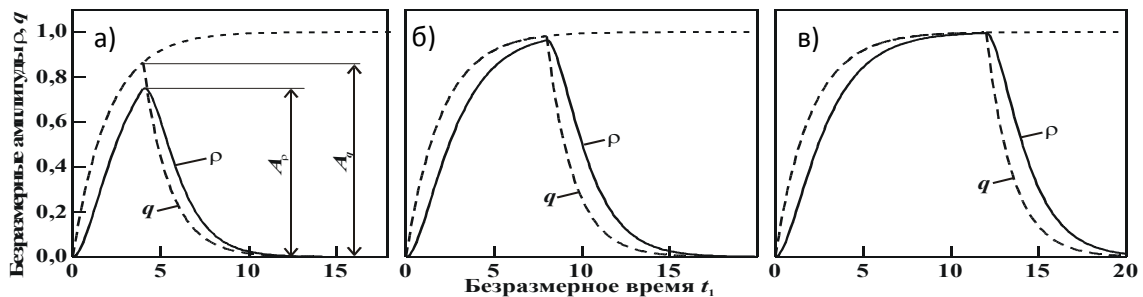


Рис. 5. Давление в вакуумной системе при различных формах пиков газовой выделения.

### Выводы.

Анализ результатов показывает, что с увеличением параметра  $b_1$  при остальных неизменных параметрах пик газовой выделения изменяет свою форму от близкой к треугольной до формы, близкой к прямоугольной, при этом изменение формы пика давления имеет ту же тенденцию, что и для пика газовой выделения.

Показано что характер изменения рабочего давления в камере с установленными механизмами является важным инструментом для оценки состояния механизмов.

### Литература

1. Mechanics and Physics of Precise Vacuum Mechanisms/ Deulin E.A., Michailov V.P., Panfilov Y.V., Nevshupa R.A. / Springer edition.- 2012, 234pp.
2. Деулин Е.А., Физика вакуумной механики – М: Горячая линия – Телеком, 2018.– 282 с.
3. Розанов Л. Н. Вакуумная техника. – М.: Высшая школа, 1990. – 320 с.
4. Деулин Е.А., Пересадко А.Г. Контроль. Диагностика, №5, 1998. – с. 21-28.
5. Peresadko A.G., Nevshupa R.A., Deulin E.A.. Vacuum 64(2002) 451-456.