

8. Чертов А. Г. Физические величины (терминология, определения, обозначения, размерности, единицы): Справ. пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – 335 с.
9. Международный стандарт ИСО 31/5. Величины и единицы электричества и магнетизма. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – 24 с.
10. Трунов Г. М. О возможности изменения некоторых электромагнитных единиц СИ // Метрология. – 2003. – № 3. – С. 28–36.
11. Спиридонов О. П. Фундаментальные физические постоянные: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1991. – 238 с.

Статья поступила в редакцию 7.08.2006

Трунов Геннадий Михайлович родился в 1943 г., окончил в 1965 г. Пермский государственный университет им. А.М. Горького. Канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры “Общая физика” Пермского государственного технического университета, член Метрологической академии РФ. Автор 50 научных работ в области теоретической физики и теоретической метрологии; в 2006 г. избран в Метрологическую академию РФ.

G.M. Trunov (b. 1943) graduated from the Permsky State University n.a. A.M. Gorky. Ph. D.(Eng.), senior researcher, assoc. professor of “General Physics” department of the Permsky State Technical University. Elected in the Metrological Academy of the Russian Federation. Author of 50 publications in the field of theoretical physics and theoretical metrology.

---

## МЕХАНИКА

УДК 533.5

П. И. Коновалов, И. П. Меньшиков,  
Р. А. Невшупа

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНОЙ СИСТЕМЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ ИСТОЧНИК ПРЕРЫВИСТОГО ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ**

*Приведен метод оценки кинетических параметров газовой выделения в виде экспоненциальных пиков по измеренной зависимости давления в вакуумной камере от времени. Полученные зависимости позволяют определить границы возможностей регистрации пиков газовой выделения, что является весьма актуальной задачей для практических приложений, таких как вакуумная диагностика механизмов.*

В работах [1–4] показано, что процесс механически стимулированного газовой выделения тесно связан с пластической деформацией, возникающей в зоне контакта вершин микронеровностей на поверхностях контактирующих материалов. При этом интенсивность и длительность

импульса газовой выделения, возникающего во время пластической деформации и разрушения, зависят от геометрии микрошероховатостей, механических свойств материалов, их химического состава, содержания газов в материале и на поверхности, условий трения и т.д. Эта взаимосвязь открывает возможность производить оценку геометрических параметров микрошероховатостей и динамики их деформирования при трении на основе анализа характеристик пиков газовой выделения. Для реализации этой возможности необходимо знать функциональную зависимость между характеристиками микрошероховатости и параметрами газовой выделения. Поскольку измерения газовой выделения производятся в вакуумной камере, необходимо также уметь восстанавливать поток прерывистого газовой выделения по измеряемой зависимости давления газов в вакуумной камере от времени. В работе [5] пики газовой выделения моделировались экспоненциальными функциями и было представлено аналитическое решение модели, связывающее давление в вакуумной камере с параметрами системы и с параметрами процесса газовой выделения. Также был предложен метод моделирования заданной формы потока.

Задача восстановления потока прерывистого газовой выделения по измеренной зависимости давления должна решаться с учетом того, что вакуумная система является инерционным аperiodическим звеном. В данной работе предлагается метод оценки кинетических параметров газовой выделения в виде экспоненциальных пиков по измеренной зависимости давления от времени. Разработанная модель позволяет также выделить область значений параметров, при которых данной системой измерения может быть зафиксировано прерывистое газовой выделение в виде пиков.

**Математическая модель.** Поведение исследуемого потока газовой выделения задается безразмерной функцией

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

а его интенсивность определяется масштабным фактором  $Q_m$ .

Функция  $q(t)$  определяет обе фазы пика — фронт и спад — при помощи функции Хевисайда  $H$ :

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

Параметр  $b$  равен длительности фронта, а параметры  $t_{01}$  и  $t_{02}$  являются постоянными времени фронта и спада соответственно. Этой функции потока газовой выделения соответствует функция давления газов в вакуумной камере в безразмерном виде:

$$\rho = \frac{\exp\left[\frac{H}{R_2}(b_1 - t_1)\right]}{1 - \frac{H}{R_2}} - \frac{\exp\left[H\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)(b_1 - t_1) - \frac{t_1}{R_1}\right]}{1 - \frac{H}{R_2} + \frac{H-1}{R_1}} + C \exp(-t_1). \quad (2)$$

Параметры  $R_1$  и  $R_2$  – безразмерные объединенные постоянные времени процесса газовыделения и вакуумной системы соответственно;  $b_1 = \frac{Sb}{V}$  – безразмерный параметр фазы фронта;  $t_1 = \frac{St}{V}$  – безразмерное время.

Давление достигает максимального значения в момент времени  $t_1$ , когда первая производная давления по времени  $F(t)$  обращается в ноль:

$$F(t_1) = \frac{1}{1 - R_2} \left[ \exp\left(\frac{b_1 - t_1}{R_2}\right) - \exp\left[\left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1}\right)(b_1 - t_1) - \frac{t_1}{R_1}\right] - \exp(b_1 - t_1) \right] + \frac{\exp(-t_1)}{1 - R_1} + \left(\frac{R_2}{R_2 - 1} - \frac{R_1}{R_1 - 1}\right) \left(-1 - \frac{1}{R_1}\right) \exp\left[b_1 - \left(1 + \frac{1}{R_1}\right)t_1\right]. \quad (3)$$

Это уравнение трансцендентное, так как содержит сложные зависимости нескольких экспонент, и не имеет аналитического решения. Его решение может быть найдено методом разложения экспоненциальных функций в ряды и последующего преобразования полученного выражения. Однако этот метод дает громоздкие аналитические выражения, неудобные для расчетов без применения электронно-вычислительной техники. Существенного упрощения расчетов можно добиться, если принять следующие допущения:

1) производная давления по времени обращается в ноль в момент времени  $t_1 = b_1 + \Delta_0$ , где  $\Delta_0$  – положительное число, зависящее от параметров  $R_1, R_2, b_1$ ;

2)  $\Delta_0$  зависит от параметров  $R_1, R_2, b_1$  по экспоненциальному закону, т.е.

$$\Delta_0 = C_{01} \exp(C_{02} R_1 R_2 b_1), \quad (4)$$

где  $C_{01}, C_{02}$  – константы.

Выбор экспоненциального закона обусловлен тем, что он в наибольшей степени соответствует значениям, полученным из численного решения уравнения (3). Значения констант  $C_{01}$  и  $C_{02}$  определяются путем приближения функции (4) к результатам численного решения (3):

$$\Delta_0 = 1,984 \cdot 10^{-4} \exp [0,02R_1R_2b_1]. \quad (5)$$

Таким образом, приближенное аналитическое выражение зависимости амплитуды давления от параметров вакуумной системы и процесса газовой выделения имеет вид

$$A = \frac{\exp \left[ \frac{H(t_1, b_1) \cdot (-\Delta_0)}{R_2} \right]}{1 - \frac{H(t_1, b_1)}{R_2}} - \frac{\exp \left[ H(t_1, b_1) \cdot \left( \frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) \cdot (-\Delta_0) - \frac{b_1 + \Delta_0}{R_1} \right]}{1 - \frac{H(t_1, b_1)}{R_2} + \frac{H(t_1, b_1) - 1}{R_1}} + C \exp [-b_1 - \Delta_0]. \quad (6)$$

Важная особенность рассматриваемого процесса — отставание по времени максимума давления от максимума газовой выделения. Однако, в приближенном расчете величиной этой задержки  $\Delta_0$  можно пренебречь. Безразмерная объединенная постоянная времени вакуумной системы  $R_2$  ограничивается заданной величиной относительной интенсивности потока, т.е. отношением значения потока при  $t_1 \rightarrow T$  к его амплитудной величине ( $T$  — полная длительность пика газовой выделения), и длительностью фазы фронта пика газовой выделения [5]:

$$\Delta = \exp \left( \frac{b_1 - t_1}{R_2} \right) \Rightarrow R_2 \leq \frac{b_1 - T}{\ln \Delta}. \quad (7)$$

**Анализ результатов.** На рис. 1 приведены результаты расчета амплитуды давления для различных значений параметра  $R_1$ . Параметр  $R_2$  при этом принимается для каждого случая максимально возможным для заданной относительной интенсивности потока, представляющей собой  $\Delta = 3\%$ , и текущего значения длительности фазы фронта  $b_1$ . Анализ результатов показывает, что амплитуда давления в вакуумной камере прямо пропорциональна длительности фазы фронта  $b_1$  и обратно пропорциональна безразмерной объединенной постоянной времени процесса газовой выделения  $R_1$ .

Зависимость максимально возможного значения параметра  $R_2$  от  $b_1$  для различных значений  $\Delta$ , приведенная на рис. 2, показывает, что

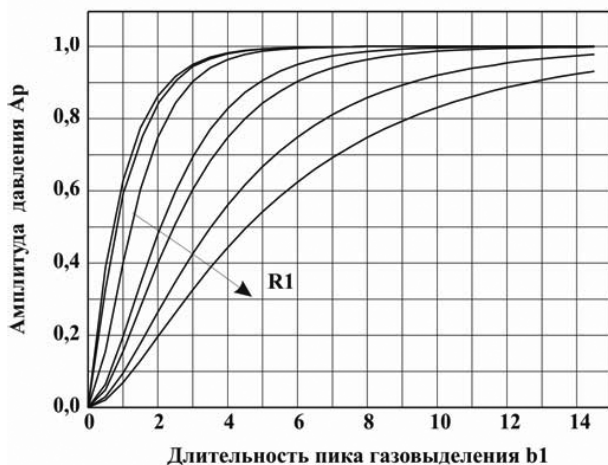


Рис. 1. Амплитуда давления для различных значений  $R_1$

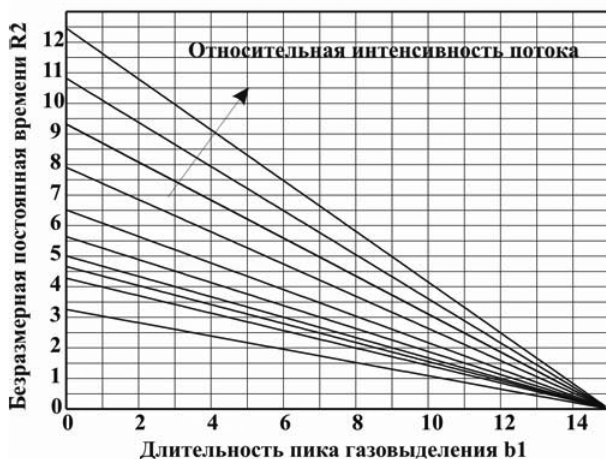


Рис. 2. Зависимость  $R_2$  для различных значений интенсивности потока

чем больше длительность фазы фронта импульса нестационарного газовыделения, тем меньше должна быть объединенная постоянная времени вакуумной камеры  $R_2$ , при которой данной системой измерения с данной относительной интенсивностью потока можно будет зафиксировать этот импульс на кривой давления.

Уменьшение значения параметра  $R_2$  приводит к изменению формы импульса газовыделения (рис. 3, б), но не влияет на величину амплитуды (рис. 3, а). Для удобства практических расчетов максимально возможных значений параметра  $R_2$  по измеренным параметрам пиков давления (длительности фазы фронта, полной длительности, амплитуде давления и др.) была разработана номограмма, показанная на рис. 4. Полученные зависимости позволяют выделить область параметров процесса газовыделения и вакуумной системы, при которых

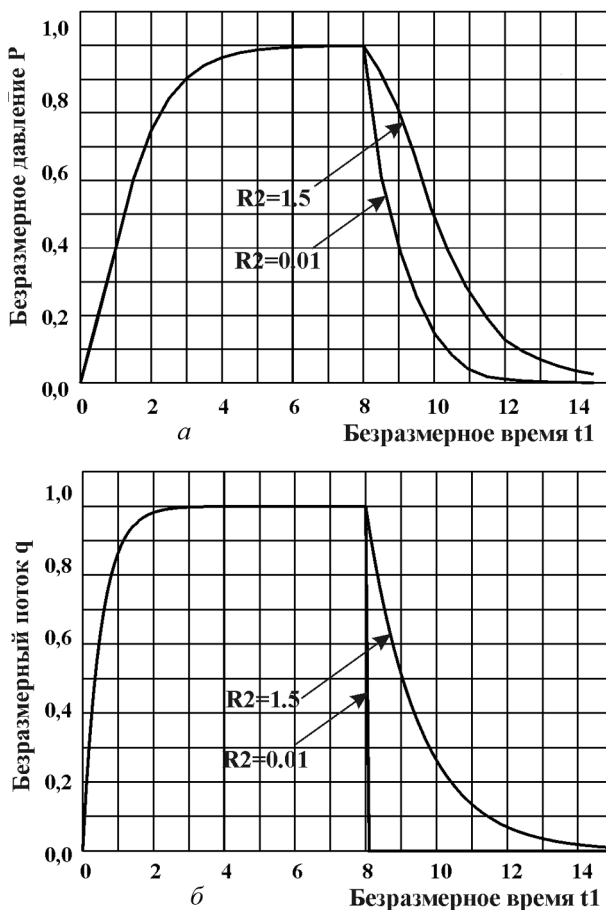


Рис. 3. Изменение формы пика давления при различных значениях параметра  $R_2$  (а) и формы пика газовыделения (б) при значениях параметра  $R_2$ , соответствующих рис. 3, а

амплитуда пиков давления превышает заданный уровень шума измерительной системы (датчиков давления, вакуумметров, усилителей, АЦП и т.п.). Так например, для относительной интенсивности потока  $\Delta = 3\%$ , безразмерной объединенной постоянной времени процесса газовыделения  $R_1 = 5$  и уровня шума, равного 0,8, системой измерения давления будут выделены только пики, длительность фазы фронта которых лежит в пределах  $9,25 \leq b_1 \leq 11,8$  (рис. 4). При  $b_1 < 9,25$  амплитуда давления оказывается ниже заданного уровня шума, а при  $b_1 > 11,8$  увеличивается относительная интенсивность потока. Таким образом, полученные зависимости позволяют определить границы возможностей регистрации пиков газовыделения, что является весьма актуальной задачей для ряда практических приложений, таких как вакуумная диагностика механизмов и других.

**Выводы.** Приведен метод оценки кинетических параметров газовыделения в виде экспоненциальных пиков по измеренной зависи-

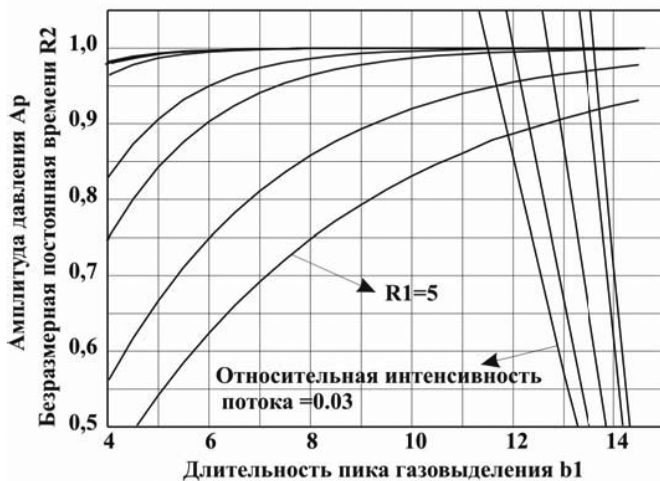


Рис. 4. Передаточная характеристика вакуумной системы

мости давления в вакуумной камере от времени. Разработанная модель позволяет выделить область значений параметров, при которых данной системой измерения может быть зафиксировано прерывистое газовыделение в виде пиков.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рёра Р., Rott M. Vacuum. – 1997. – № 48. – P. 775–778.
2. Nevshupa R. A., J. L. de Segovia, Peresadko A. G., Deulin E. A. Vacuum. – 2003. – № 69. – P. 477–487.
3. Nevshupa R. A., J. L. de Segovia, Deulin E. A. Vacuum. – 1999. – № 53. – P. 295–298.
4. Nevshupa R. A., J. L. de Segovia. Vacuum. – 2002. – № 64. – P. 425–430.
5. Коновалов П. И., Меньшиков И. П. Студенческий вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2004. – С. 49–53.

Статья поступила в редакцию 20.03.2006

Павел Игоревич Коновалов родился в 1984 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области вакуумной техники.

P.I. Konovalov (b. 1984) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of vacuum technology.

Илья Павлович Меньшиков родился в 1984 г. Студент МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области вакуумной техники.

I.P. Menshikov (b. 1984) — student of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of vacuum technology.

Роман Александрович Невшупа родился в 1970 г., канд. техн. наук, доцент кафедры “Электронные технологии в машиностроении” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 43 научных работ в области трибологии, физики и химии вакуумной механики.

R.A. Nevshupa (b. 1970) — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Electronic Technologies in Mechanical Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 43 publications in the field of tribology, physics and chemistry of vacuum mechanics.