

03

Анализ динамических характеристик вакуумной системы

© В.В. Савранский, Р.А. Невшупа, Е.А. Деулин, А.А. Авдиенко

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана
Государственное унитарное предприятие „МЕТИС“, Москва
E-mail: savransky@bmstu.ru

Поступило в Редакцию 22 июня 2005 г.

Экспериментально исследовано поведение давления газов в вакуумной системе при динамическом газовыделении в форме последовательности прямоугольных пиков. Показано, что результаты экспериментов совпадают с разработанной ранее моделью.

Для решения ряда задач, связанных с вакуумной техникой, необходимо анализировать динамику общего и парциального давления в вакуумной системе в режиме реального времени. Одной из таких задач является *in situ* диагностика состояния пар трения, работающих в вакууме, разрабатываемая в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Данная система измеряет и анализирует поток газовой выделения из пары трения при скольжении либо качении и по известным зависимостям оценивает степень ее износа и техническое состояние [1]. Как было показано в ряде исследований [2–8], газовой выделение при трении носит существенно нестационарный характер и представляет собой случайную последовательность отдельных импульсов, распределенных как по амплитуде, так и по длительности. Такой характер газовой выделения объясняется механикой контакта шероховатых тел, поскольку каждый импульс газовой выделения соответствует контакту одной пары микронеровностей на контактирующих поверхностях.

Одной из основных проблем в системе диагностики является определение функциональной зависимости потока газовой выделения от времени по имеющемуся сигналу давления, полученному во время процесса трения. Было показано, что использование аналитической модели для конкретных видов форм исходного потока газовой выделения имеет ряд преимуществ перед универсальными способами обработки данных с использованием функциональных преобразований. Аналитическая мо-

дель поведения общего и парциального давления газов в вакуумной системе $p(t)$ для одной из основных форм газовой выделения, меандра, представлена в работе [9]. Эта модель описывает поведение давления в безразмерном виде, что позволяет применять ее для всех видов вакуумных систем. Результаты моделирования показали, что вакуумную систему можно рассматривать в качестве аperiodического звена, т.е. в зависимости от значений параметров процесса газовой выделения и характеристик вакуумной системы функция $p(t)$ либо имеет форму пиков, либо является гладкой функцией, т.е. пики не разрешаются [1].

Для проверки данной модели нами была доработана экспериментальная установка, описанная ранее [1], и проведены исследования, представленные в данной работе. Вакуумная камера имела объем $V = 40.4$ л, а средняя эффективная быстрота откачки, измеренная экспериментально методом постоянного давления, равнялась $S = 71$ л/с, таким образом постоянная времени вакуумной системы составляла $\tau_0 = V/S = 0.57$ с. Система предварительно откачивалась до давления $1.3 \cdot 10^{-3}$ Па. Импульсы газа создавались при помощи пьезонатекателя, позволяющего гибко управлять процессами открытия и закрытия, а также величиной потока. Разработанная нами система управления позволяла регулировать продолжительность открытия и закрытия натекателя при помощи набора резисторов. Для уменьшения влияния изменения быстроты откачки с увеличением давления, а также для облегчения записи давления, максимальная величина потока Q_m^* выбиралась таким образом, чтобы изменение давления не превышало одного порядка, что позволяло проводить эксперимент без переключения вакуумметра с одного диапазона давления на другой.

Наибольший интерес представляет поведение вакуумной системы при напуске импульсов газа с продолжительностью в диапазоне $0.1\tau \geq T_i \geq 10\tau$. В ходе эксперимента варьировалась длительность импульса газовой выделения b при постоянном периоде T_i (рис. 1, b). На рис. 1, b представлены управляющие импульсы, подаваемые на пьезонатекатель, которые соответствуют импульсам газовой выделения, а на рис. 1, a — соответствующий им отклик давления. Амплитуда пиков давления A , максимальное и минимальное давления пиков p_{\max} и p_{\min} изменялись нелинейно с изменением продолжительности импульса b при $T_i = 16$ с. При увеличении продолжительности импульса напуска газа пиковое значение давления увеличивалось постепенно и достигало максимального значения p_{\max} , а минимальное давление, т.е. давление между пиками, возрастало от фонового значения p_0 до значения p_{\min} .

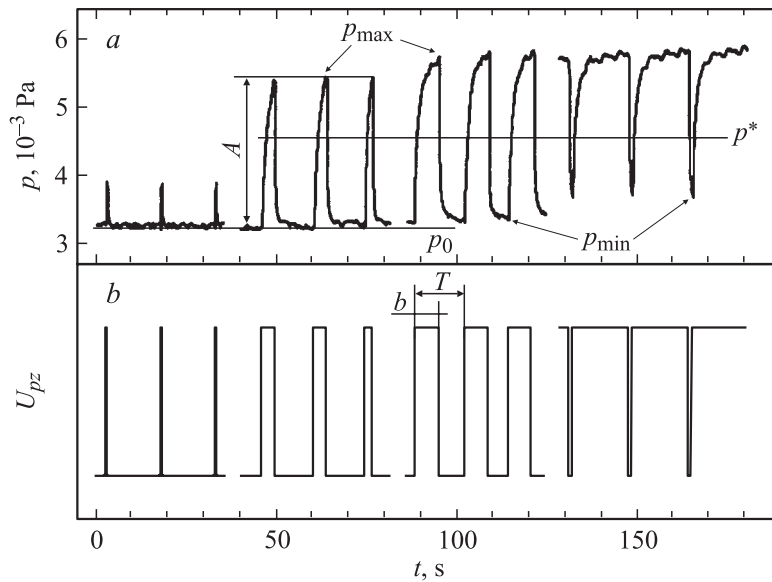


Рис. 1. *a* — изменение общего давления при пульсирующем газовыделении; *b* — управляющие импульсы пьезонатекателя длительностью $b = 0.5; 4; 8; 15$ s при постоянном периоде $T = 16$ s.

Поскольку повышение минимального значения запаздывало по отношению к росту максимального значения, амплитуда пиков сначала возрастала и достигала максимального значения при $b = 0.5 T_i$, а затем снижалась. Интересно отметить, что при увеличении b форма пиков давления существенно изменялась. При этом очевидно, что соблюдается принцип подобия с зеркальным отражением, иными словами пики, соответствующие продолжительности импульса b , являлись зеркальным отражением пиков, соответствующих продолжительности импульсов $T_i - b$, относительно горизонтальной линии $p^* = (p_{\max} + p_0)/2$. Этим и объясняется симметрия функции $A = f(b)$ относительно $b = 0.5 T_i$. Таким образом, в указанном диапазоне b и T_i амплитуда пиков давления контролируется наименьшим из двух параметров: b или $T_i - b$, что связано с равенством постоянных времени переходных процессов установления равновесного давления как при открытии натекателя, так и при его закрытии.

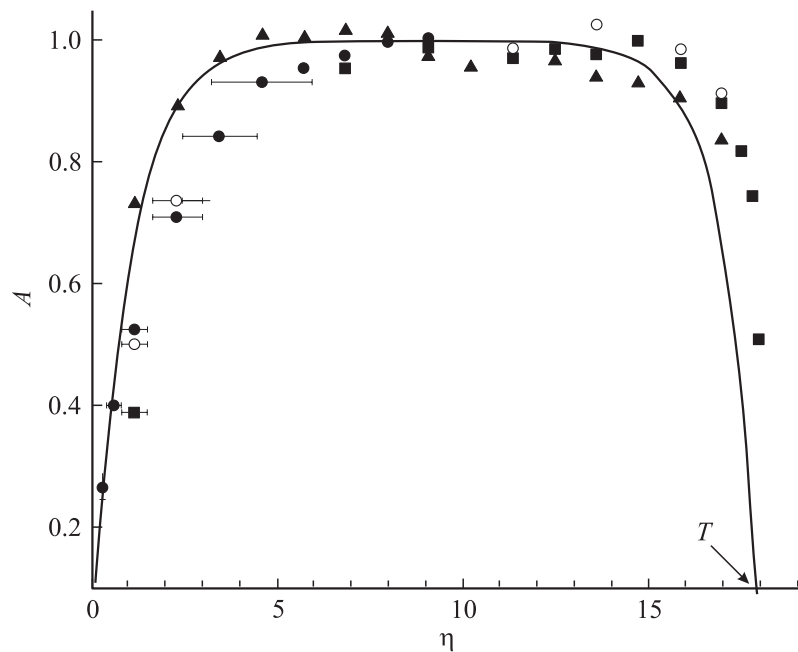


Рис. 2. Зависимость амплитуды пиков давления от длительности импульсов газовыделения (в безразмерной форме); точки — экспериментальные значения, линия — модель.

Для сопоставления экспериментальных данных с результатами моделирования результаты экспериментов были преобразованы в безразмерную форму [9]: безразмерное давление $\rho = (p - p_0)S/Q_m^*$, безразмерное время $\tau = t \cdot S/V$.

На рис. 2 представлены результаты экспериментов (точки) и модели (линия), рассчитанной для экспериментальных условий, по формуле [9]:

$$A = f_A(T, \eta) = \frac{\exp \eta - 1}{\exp T - 1} \left(\frac{\exp T}{\exp \eta} - 1 \right),$$

где η — безразмерный аналог b , а T — безразмерный аналог T_t .

В целом наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных значений, однако также имеются систематические откло-

нения экспериментальных значений: при $b < 0.5 T_i$ амплитуда пиков давления меньше расчетного, а при $b > 0.5 T_i$ — больше расчетного. По всей видимости, это связано с несовершенством пьезонатекателя, а именно с ненулевым временем открытия и закрытия, которое не учитывается в модели. За счет конечной скорости открытия пьезонатекателя фактический импульс газовыделения меньше теоретического при малых b , что и приводит к снижению амплитуды давления. Аналогично за счет конечной скорости закрытия амплитуда газовыделения больше расчетной при больших b .

Выводы. Экспериментальные результаты согласуются с результатами моделирования. При возрастании b максимальное и минимальное значения давления плавно возрастают, однако при $b < 0.5 T_i$ максимальное значение растет быстрее минимального, а при $b > 0.5 T_i$ минимальное растет быстрее максимального. В результате этого амплитуда пиков достигает максимума при $b = 0.5 T_i$. При переходе через $b = 0.5 T_i$ наблюдается зеркальная симметрия пиков давления относительно $p^* = (p_{\max} + p_0)/2$.

В дальнейшем планируется продолжить начатые исследования с использованием различных газов, а также для других видов функции газовыделения. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Министерства образования и науки РФ по программе „Развитие научного потенциала высшей школы“, 2005 г.

Список литературы

- [1] Деулин Е.А., Пересадыко А.Г. // Контроль. Диагностика. 1998. № 5. С. 21–28.
- [2] Řepa P., Rott M. // Vacuum. 1997. Т. 48. В. 7–9. Р. 775–778.
- [3] Peressadko A.G., Nevshupa R.A., Deulin E.A. // Vacuum. 2002. Т. 64. В. 3–4. Р. 451–456.
- [4] Nevshupa R.A., de Segovia J.L., Deulin E.A. // Vacuum. Т. 1999. В. 53. Р. 295–298.
- [5] Nevshupa R.A., de Segovia J.L. // Vacuum. 2002. Т. 64. В. 3–4. Р. 425–430.
- [6] Řepa P., Orálek D. // Vacuum. 1999. Т. 53. В. 1–2. Р. 299–302.
- [7] Dickinson J.T., Jensen L.C., McKay M.R. // J. Vac. Sci. Technol. A. 1986. Т. 4. В. 3. Р. 1648–1652.
- [8] Dickinson J.T., Jensen L.C., Langford S.C. // Phys. Rev. Lett. 1991. Т. 66. В. 16. Р. 2120–2123.
- [9] Nevshupa R.A., de Segovia J.L., Peressadko A.G. et al. // Vacuum. 2003. Т. 69. Р. 477–487.