

УДК 621.3.084.2

DOI 10.53403/9785951505170\_2021\_26\_2\_216

# Газодинамическое демпфирование в задаче по расчету конструкции чувствительного элемента МЭМС-датчика давления разрежения

Е. И. Волкова\*, С. А. Попков\*

*Статья посвящена разработке чувствительного элемента МЭМС-(микроэлектромеханического) датчика давления разрежения. Решается задача по нахождению конструкции чувствительного элемента (ЧЭ) для измерения давления остаточных газов, функционирование которого затрагивает несколько механизмов демпфирования, в частности газодинамическое демпфирование.*

## Введение

Микросистемная техника является динамично развивающимся направлением, определяющим новую революцию в области систем, реализуемых на микроуровне. Устройства микросистемной техники – МЭМС-системы – за последние годы показали свой огромный потенциал. На сегодняшний день в мире существует большое разнообразие выпускаемых МЭМС-датчиков, но наработки по созданию датчиков для измерения вакуума не так велики. В большинстве случаев это сложные приборы, в которых необходимо осуществлять разогрев или ионизацию газа для измерения его теплопроводности или электропроводности [1, 2]. Контроль уровня вакуума в ряде приборов является первостепенной задачей, поскольку обеспечение низкого давления остаточных газов позволяет обеспечить стабильность выходных характеристик. С этой целью на базе единого прибора при проектировании закладывают два устройства – ЧЭ, один из которых может измерять искомый физический параметр, а другой – отслеживать уровень вакуума в корпусе прибора. Подобный подход актуален для инерциальных приборов, таких как МЭМС-акселерометр и МЭМС-гироскоп.

---

\* Филиал РФЯЦ-ВНИИЭФ «НИИИС им. Ю. Е. Седакова», г. Н. Новгород.

### Учет влияния механизмов демпфирования при проектировании

Демпфирование в устройствах микросистемной техники – одно из наиболее распространенных явлений [3]. Вклад от различных механизмов демпфирования бывает настолько значителен, что неучет тех или иных процессов может свести на нет принципиальную модель ЧЭ разрабатываемого МЭМС-датчика. С другой стороны, тот же вклад от газодинамического демпфирования, как наиболее существенного, возможно использовать для разработки устройства измерения давления.

Среди многообразия принципов и конструкций МЭМС-датчиков по измерению давления наиболее перспективными являются конструкции с микрорезонаторами, функционирование которых оценивается по величине добротности колебательной системы [4].

Вывести зависимость изменения добротности системы при изменении давления окружающей среды возможно, решив уравнение Рейнольдса (1), которое подходит для упрощенного описания динамики газа в зазоре между резонатором и основанием или другой частью конструкции ЧЭ [3]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( H^3 P \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( H^3 P \frac{\partial P}{\partial y} \right) = 12\mu P \left( H \frac{\partial P}{\partial t} + P \frac{\partial H}{\partial t} \right), \quad (1)$$

где на примере плоского параллельного конденсатора  $x$  и  $y$  – пространственные координаты вдоль направления длины и ширины электрода,  $t$  – время,  $H$  – переменное расстояние между электродами,  $P$  – полное давление,  $\mu$  – коэффициент вязкости газа.

Поскольку основной элемент МЭМС-датчика давления разрежения – микрорезонатор, то учет малых зазоров между элементами конструкции приводит к тому, что остаточный газ невозможно рассматривать как непрерывную сплошную среду, поэтому вводят понятие эффективной вязкости

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{\mu}{1 + 9,638 K_n^{1,159}}. \quad (2)$$

Данное уравнение получено, основываясь на уравнении Больцмана [5], где  $K_n$  – число Кнудсена, которое зависит от длины свободного пробега молекул газа и характерного размера системы.

Добротность колебательной системы можно определить как

$$Q = \frac{1}{2\zeta}, \quad (3)$$

где  $\zeta$  – коэффициент демпфирования

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega}, \quad (4)$$

где  $c$  – коэффициент вязкого демпфирования,  $m$  – эффективная масса,  $\omega$  – собственная частота колебаний. Коэффициент вязкого демпфирования вычисляется по формуле

$$c = \frac{b^3 l \mu_{\text{eff}}}{H^3} \times 0,7, \quad (5)$$

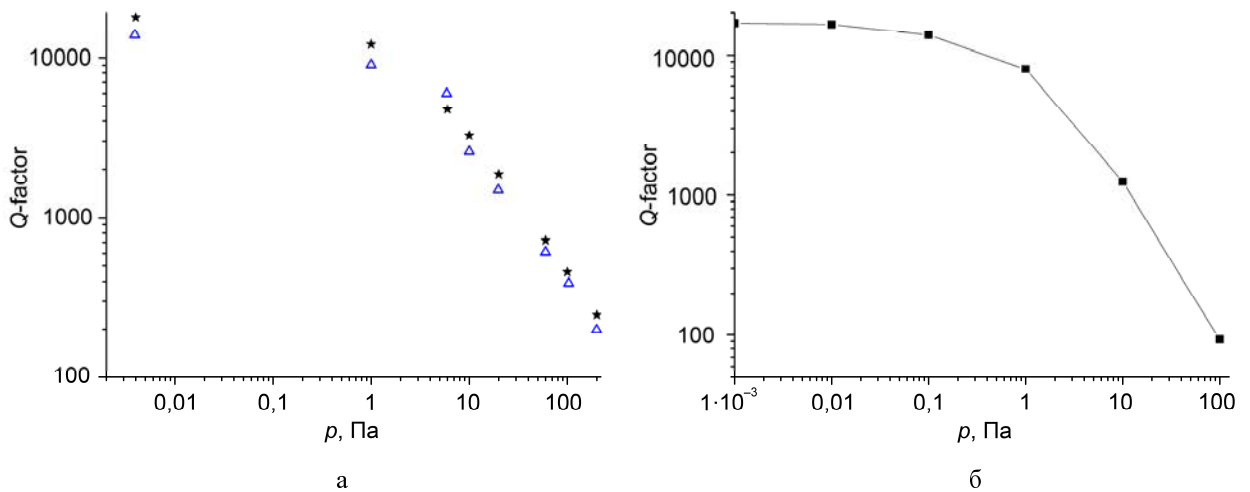
где  $b$  и  $l$  – характерные габариты резонатора. Следовательно, коэффициент вязкого демпфирования зависит от давления газа, а учитывая уравнения (3) и (4), можно найти выражение для расчета добротности системы.

### Проектирование ЧЭ МЭМС-датчика давления разрежения

Разработка и моделирование ЧЭ МЭМС-датчика давления разрежения проводились с использованием пакета мультифизического моделирования Comsol Multiphysics. На первом этапе проводилось построение модели плоской пластины, закрепленной с двух сторон, описанной в работе [4], для которой были известны экспериментальные данные зависимости добротности системы от давления. При этом решалась связанная мультифизическая задача, учитывающая различные эффекты диссипации энергии.

Основной расчет проводился с учетом доминирующих эффектов внешних и внутренних механизмов диссипации энергии, в частности демпфирования в тонких газовых пленках – squeeze-film damping (SQFD) эффекта и термоупругого демпфирования. Хотя в данном случае термоупругое демпфирование вносит не такой значительный вклад, как демпфирование в тонких слоях газа, тем не менее учет данного эффекта позволяет произвести наиболее точный расчет для сравнения с экспериментальными зависимостями.

При выполнении расчетов с учетом SQFD эффекта с использованием методов численного моделирования решалось модифицированное уравнение Рейнольдса. Задавались такие параметры, как давление разреженного газа, динамическая вязкость и длина свободного пробега молекул при начальном давлении. Также решалась связанная мультифизическая задача по переносу тепла в ЧЭ, вследствие сжатия и растяжения отдельных областей микрорезонатора. Было проведено параметрическое исследование для диапазона давлений  $10^{-3}$ –100 Па. Полученная зависимость значений добротности от давления и экспериментальные данные [4] представлены на рисунке а.



Зависимость добротности от давления для пластины [4] (а) и резонатора ЧЭ (б):  $\Delta$  – экспериментальные данные,  $\star$  – расчет в Comsol

Согласно приведенным данным, полученная характеристика хорошо верифицируется со значениями из литературного источника. Для реализации заданного диапазона чувствительности МЭМС-датчика давления для имеющейся технологии была разработана собственная конструкция резонатора, в котором оптимизационным методом подбирались геометрические параметры. Достижение необходимой величины зазоров между подвижным и неподвижным элементами

конструкции для проявления SQFD эффекта осуществлялось путем подачи смещающего электрического поля. Рассчитанная зависимость добротности от давления для оригинального резонатора представлена на рисунке б.

### **Заключение**

Учет влияния механизмов диссипации энергии, в частности газодинамического демпфирования, на работу резонатора позволяет разработать ЧЭ МЭМС-датчика давления разрежения, необходимого для измерения давления остаточных газов. Данное устройство является важным решением для обеспечения работы высокоточных инерциальных МЭМС-датчиков.

### **Список литературы**

1. Giebel F. J., Köhle M., Stramm T. et al. Concept for a MEMS-type vacuum sensor based on electrical conductivity measurements // J. Sens. Sens. Syst. 2017. Vol. 6. P. 367–374.
2. Wang S., Feng Y. Micro capacitive vacuum sensor based on MEMS // Proc. of the 5th IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems. 2010. P. 1160–1164.
3. Younis M. I. MEMS linear and nonlinear statics and dynamics. NY.: Springer, 2011.
4. Nayfeh A. H., Younis M. I. A new approach to the modeling and simulation of flexible microstructures under the effect of squeeze-film damping // Micromechanics and Microengineering. 2004. Vol. 14. P. 170–181.
5. Veijola T. Kuisma H., Lahdenperä et al. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer // Sensors and Actuators. 1995. A. 48. P. 239–248.

## **Gas-Dynamic Damping in the Problem of Calculating the Design of the Sensitive Element Mems Vacuum Pressure Sensor**

**E. I. Volkova, S. A. Popkov**

*The article is devoted to the development of the sensitive element MEMS vacuum pressure sensor. The problem of finding the design of a sensitive element for measuring the pressure of residual gases, the functioning of which affects several damping mechanisms, in particular gas-dynamic damping, is solved.*