

УДК 532.516

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАГНИТНОЙ ГОЛОВКИ И ДИСКА
В НАКОПИТЕЛЯХ ВИНЧЕСТЕРСКОГО ТИПА**

Р. А. Грунтфест

*Ростовский государственный университет,
344000 Ростов-на-Дону*

Основные элементы накопителей — это вращающийся диск и магнитная головка (слайдер), летящая на малой высоте над поверхностью диска. Тонкий воздушный слой препятствует контактам между слайдером и диском и создает условия для устойчивого полета слайдера на заданной высоте. Очевидно, что математическое моделирование взаимодействия системы головка — воздушный слой — диск является необходимым этапом общей программы создания накопителей. Систематические исследования по данной теме в России не проводятся. Зарубежные публикации за последние 5–7 лет свидетельствуют о глубокой теоретической проработке этой темы, но они не содержат полной информации и прежде всего программных реализаций, что не позволяет их считать тем, что называется «know how» [1–3].



Рис. 1

При теоретическом анализе выделены три задачи: 1) стационарный полет головки; 2) динамика слайдера при периодических и ударных внешних воздействиях, а также при переходах между дорожками; 3) контактные взаимодействия между слайдером и диском на этапах отрыва и посадки. В настоящей работе рассматриваются первые две задачи.

Геометрия стандартной головки изображена на рис. 1, где U, V — продольная и поперечная скорости головки относительно диска; a, b, c, d, e — геометрические размеры головки; ψ_0 — угол атаки головки; ψ_1, ψ_2 — углы наклона слайдера относительно плоскости диска; ψ_3 — угол поворота слайдера в плоскости диска; m, J_1, J_2, J_3 — масса и моменты инерции слайдера; F, M_1, M_2, M_3 — сила и моменты, действующие на головку со стороны упругой подвески (рычаг подведения); P, L_1, L_2, L_3 — аэродинамические сила и моменты, приложенные к головке со стороны воздушного слоя; x_F, y_F — точка приложения упругой силы F ; $h(x, y, t)$ — толщина воздушного слоя (зазор).

Нестационарное течение вязкого газа в тонком слое с учетом молекулярного скольжения на граничных поверхностях описывается уравнением Рейнольдса [4, 5]

$$\text{Sh} \frac{\partial(h(1+p))}{\partial t} + \frac{\partial(h(1+p))}{\partial x} + \beta \frac{\partial(h(1+p))}{\partial y} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left[h^2(h + \alpha + hp) \frac{\partial p}{\partial x} \right] + \delta \frac{\partial}{\partial y} \left[h^2(h + \alpha + hp) \frac{\partial p}{\partial y} \right]. \quad (1)$$

Здесь $p(x, y, t)$ — искомая функция, определяющая безразмерное избыточное давление в воздушном слое; $\text{Sh} = 2a/U\tau$ — число Струхалия; $\varepsilon = h_0^2 p_0 / 6\mu Ua$ — число сжимаемости; $\alpha = 6\lambda_0/h_0$ — коэффициент скольжения; $\beta = aV/bU$; $\delta = (a/b)^2\varepsilon$; p_0 — давление воздуха в камере накопителя; μ — вязкость воздуха; λ_0 — длина свободного пробега молекул; h_0 — зазор в выходном сечении; τ — временной масштаб, который будет определен дальше.

Граничные условия для уравнения (1) имеют вид

$$\begin{aligned} p &= 0 \quad \text{при} \quad x = 0, \quad x = 1, \\ p &= 0 \quad \text{при} \quad y = 0, \quad y = 1. \end{aligned} \quad (2)$$

Толщина воздушного слоя (с учетом угла атаки на входном участке) задается функцией

$$\begin{aligned} h(x, y, t) &= h(t) + \psi_0(t)(d/a - x) + \psi_1(t)(1 - x) \mp \psi_2(t)(c/2a - y), \quad 0 \leq x < d/a, \\ h(x, y, t) &= h(t) + \psi_1(t)(1 - x) \mp \psi_2(t)(c/2a - y), \quad d/a \leq x \leq 1, \quad 0 \leq y \leq 1. \end{aligned} \quad (3)$$

Верхний знак в формулах (3) соответствует внешней лыже слайдера, нижний — внутренней лыже. Решение сложной краевой задачи (1)–(3) получается методом конечных элементов (МКЭ) [6]. Область течения разбивается на прямоугольные ячейки (элементы). В узлах (вершинах прямоугольников) вводятся неизвестные давления $p_{ij}(t)$, после чего используются аппроксимации

$$\begin{aligned} p(x, y, t) &= \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} p_{ij}(t) \omega_i(x) \omega_j(y), \\ p^2(x, y, t) &= \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} p_{ij}^2(t) \omega_i(x) \omega_j(y), \end{aligned} \quad (4)$$

где $\omega_i(x)$ — функции Куранта типа «крышки»; $n1, n2$ — число внутренних узлов соответственно вдоль осей x и y . Представления (4) учитывают граничные условия (2). Стандартная процедура МКЭ, примененная к уравнению (1), дает систему нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d}{dt} P_{rq} = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (L_{ij}^r p_{ij} + Q_{ij}^q p_{ij}^2) - R_{rq}, \quad 1 \leq r \leq n1, \quad 1 \leq q \leq n2. \quad (5)$$

Элементы матриц L и Q достаточно громоздки и здесь не приводятся. Численное интегрирование системы (5) методом Рунге — Кутты требует задания начальных условий. Если движение слайдера начинается из некоторого стационарного состояния, то в качестве начальных условий необходимо принять соответствующее стационарное распределение давления

в узловых точках

$$p_{ij} = p_{ij}^{(0)} \quad \text{при} \quad t = 0. \quad (6)$$

Система дифференциальных уравнений (5) может быть использована для изучения стационарного полета или периодического движения слайдера методом установления. В этих случаях можно принять для давления нулевые начальные условия

$$p_{ij} = 0 \quad \text{при} \quad t = 0, \quad (7)$$

а решения указанных задач получаются при $t \rightarrow \infty$. Стационарное течение может быть изучено также с помощью системы нелинейных алгебраических уравнений

$$\sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} (L_{ij}^{rq} p_{ij} + Q_{ij}^{rq} p_{ij}^2) = R_{rq}, \quad 1 \leq r \leq n1, \quad 1 \leq q \leq n2, \quad (8)$$

решение которой будем строить итерационным методом Ньютона, принимая условия (7) в качестве начального приближения. Нахождение давления в узлах позволяет определить аэродинамические силу и моменты, действующие на слайдер со стороны воздушного слоя:

$$P(t)/p_0 a b = \int_0^1 \int_0^1 p dx dy = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} p_{ij} \sigma_{ij}/4,$$

$$L_1/p_0 a^2 b = \int_0^1 \int_0^1 (1-x) p dx dy = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} p_{ij} (1-x_i) \sigma_{ij}/4,$$

$$L_2/p_0 a b^2 = \int_0^1 \int_0^1 y p dx dy = \sum_{i=1}^{n1} \sum_{j=1}^{n2} p_{ij} y_j \sigma_{ij}/4,$$

$$L_3 = ((V + U \psi_3) \alpha_1 - a \psi_3 \alpha_2) \mu a^2 b/h_0 - \frac{1}{2} (L_1 - P x_F)/2,$$

$$\alpha_i = \int_0^1 \int_0^1 \frac{(x_F - x)^i}{h(x, y, t) + \alpha/3} dx dy \quad (i = 1, 2).$$

Здесь (x_i, y_j) — координаты узла (i, j) ; σ_{ij} — площади конечных элементов.

Рычаг подведения (упругая подвеска) позиционирует головку на определенную дорожку и создает силу прижима F_0 , которая действует в точке (x_F, y_F) . Схема подвески изображена на рис. 2, где OAF — упругая консольная балка, AB — упругая балка, защемленная на обоих концах, DF — жесткий сферический шарнир (пукля).

Подвеска допускает четыре степени свободы слайдера — вертикальное перемещение $h(t)$ и углы поворота $\psi_1(t)$, $\psi_2(t)$, $\psi_3(t)$ относительно

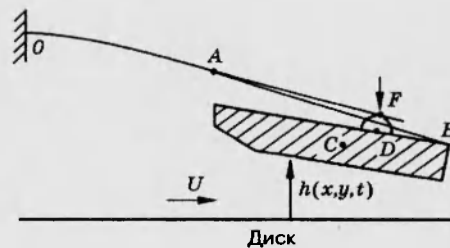


Рис. 2

осей y, x, z . Расчет рычага проводится методами сопротивления материалов с учетом совместности перемещений в точках F и D , что позволяет получить уравнения движения слайдера под действием аэродинамических и упругих сил:

$$\begin{aligned} \tilde{m} \ddot{h} + \tilde{s}_A \ddot{\psi}_1 &= P - F - \tilde{m} g k_1(t), \\ \tilde{s}_A \ddot{h} + \tilde{j}_A \ddot{\psi}_1 &= L_1 - M_1 - \tilde{s}_A g k_1(t), \\ J_2 \ddot{\psi}_2 &= L_2 - M_2 - k_2(t) m g e, \quad J_3 \ddot{\psi}_3 = L_3 - M_3 - k_2(t) m g (x_C - x_F). \end{aligned} \quad (9)$$

Здесь \tilde{m} , \tilde{s}_A и \tilde{j}_A — приведенные масса, статический и инерционный моменты относительно точки A для системы подвеска — слайдер; $k_i(t)$ — коэффициенты перегрузки по осям z и y ($i = 1, 2$); $F = F_0 + C_0 h + C_{10} \psi_1$; $M_1 = F_0 x_F + h C_{10} + \psi_1 C_{11}$; $M_2 = C_2 \psi_2 + F_0 y_F$; $M_3 = C_3 \psi_3$ ($C_0, C_{10}, C_{11}, C_2, C_3$ — эффективные жесткости подвески, которые могут быть рассчитаны или найдены экспериментально).

Поскольку аэродинамические силы существенно зависят от движения слайдера, то системы дифференциальных уравнений (5) и (9) следует объединить и интегрировать совместно, а к начальным условиям (6) добавить условия

$$h = h_0, \quad \dot{h} = h_1, \quad \psi_i = \psi_{i0}, \quad \dot{\psi}_i = \psi_{i1} \quad (i = 1, 2, 3) \quad \text{при } t = 0,$$

где h_0, ψ_{i0} — параметры начального положения, из которого начинается движение головки; h_1, ψ_{i1} — начальные линейная и вращательные скорости, возникающие при ударных воздействиях на слайдер. Для стационарной задачи из (9) имеем систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} P - F - \tilde{m} g k_1 &= 0, \quad L_1 - M_1 - \tilde{s}_A g k_1 = 0, \\ L_2 - M_2 - k_2 \tilde{m} g e &= 0, \quad L_3 - M_3 - k_2 m g (x_C - x_F) = 0, \end{aligned}$$

которую также следует объединить с системой (8) и решать совместно итерационным методом Ньютона. Некоторые трудности представляет задание начального приближения, что требует определенного опыта.

Предложенные алгоритмы решения стационарной и динамической задач реализованы в пакете программ для РС. Эти программы могут быть использованы как при расчете слайдеров заданных конструкций, так и для разработки новых типов слайдеров. Приведем и обсудим некоторые результаты для головки, имеющей параметры (см. рис. 1):

$$a = 4 \text{ мм}, \quad b = 0,65 \text{ мм}, \quad c = 3,35 \text{ мм}, \quad d = 0,4 \text{ мм}, \quad e = 0,65 \text{ мм},$$

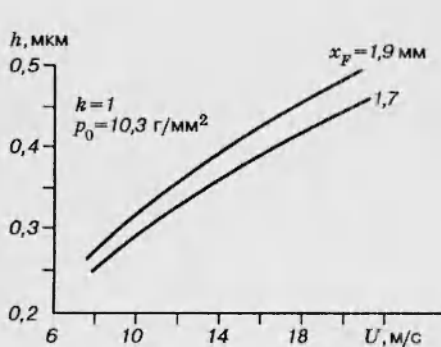


Рис. 3

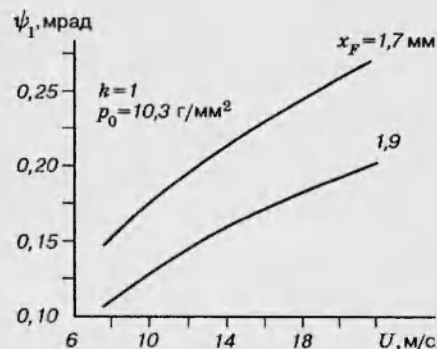


Рис. 4

$$m = 0,074 \text{ г}, \quad J_1 = 0,4 \text{ г}\cdot\text{мм}^2, \quad J_2 = 0,07 \text{ г}\cdot\text{мм}^2, \quad J_3 = 0,17 \text{ г}\cdot\text{мм}^2,$$

$$\tilde{m} = 0,091 \text{ г}, \quad \tilde{s}_A = 0,182 \text{ г}\cdot\text{мм}, \quad \tilde{j}_A = 0,47 \text{ г}\cdot\text{мм}^2,$$

$$C_0 = 1,5 \text{ г/мм}, \quad C_{10} = 4,5 \text{ г}, \quad C_{11} = 42 \text{ г}\cdot\text{мм/рад}, \quad C_2 = 40 \text{ г}\cdot\text{мм/рад},$$

$$F_0 = 10 \text{ г}, \quad x_C = 2 \text{ мм}, \quad y_F = 0, \quad \psi_0 = 15 \text{ мрад}.$$

Физические параметры воздуха в камере накопителя следующие:

$$\mu = 0,00018 \text{ П}, \quad \lambda_0 = 0,069 \text{ мкм}, \quad p_0 = 10,3 \text{ г/мм}^2.$$

На рис. 3 и 4 представлены зависимости выходного зазора h и угла наклона ψ_1 от скорости диска для двух положений точки прижима: $x_F = 1,9$ и $1,7$ мм ($y_F = 0$ для обоих случаев). Смещение точки прижима к выходному сечению увеличивает угол ψ_1 и уменьшает зазор. В реальном интервале скоростей полета $10 \div 20$ м/с относительное изменение зазора не превышает 40 %.

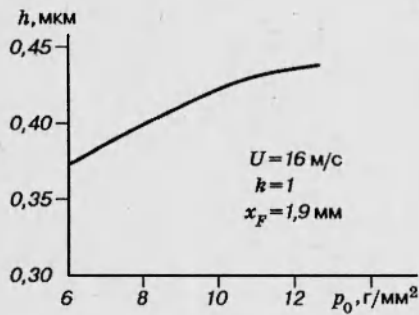


Рис. 5

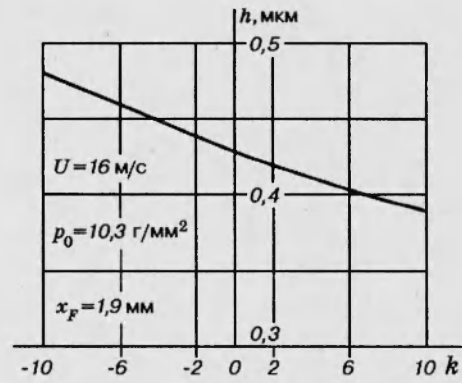


Рис. 6

Рис. 5, 6 могут быть полезны при анализе работы накопителя в нестандартных условиях (на подвижных и высотных объектах), рис. 5 определяет изменение зазора от давления воздуха в камере, а на рис. 6 дана зависимость зазора от коэффициента перегрузки по оси z . В обоих случаях можно сделать вывод о сохранении нормальной высоты полета головки в достаточно широком диапазоне изменения соответствующих параметров.

Динамика слайдера при действии ударных нагрузок показана на рис. 7. Начальным состоянием является стационарный полет головки при

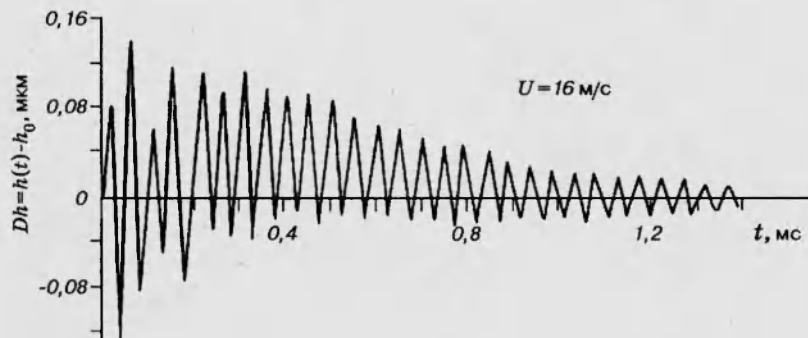


Рис. 7

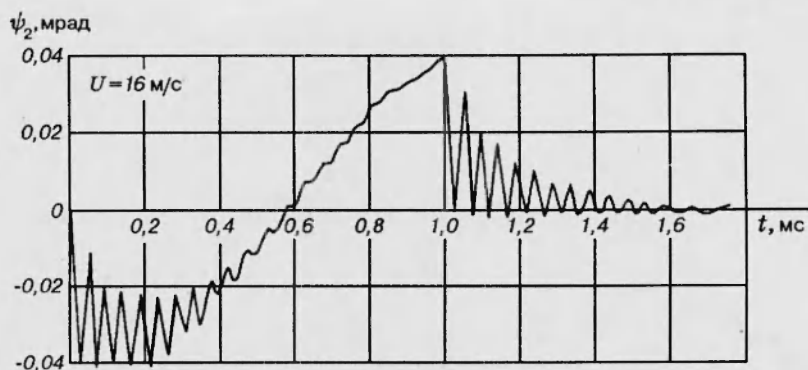


Рис. 8

скорости 16 м/с, которой соответствует $h = 0,42$ мкм, $\psi_1 = 0,17$ мрад, $\psi_2 = 0$, $\psi_3 = 0$. За счет ударного импульса слайдер получает начальные скорости $\dot{h} = 10$ мм/с, $\dot{\psi}_1 = 5$ рад/с, $\dot{\psi}_2 = 10$ рад/с. Вследствие диссипации энергии в вязком газе амплитуда колебаний слайдера со временем затухает. Длительность переходного этапа, в конце которого амплитуда уменьшается на порядок относительно максимальной, составляет около 1 мс. Эта важная величина характеризует время, которое необходимо для возврата головки к нормальной работе. Отметим также высокочастотную вибрацию слайдера с периодом $\tau = 55$ мкс, который не зависит от интенсивности начального возмущения и является периодом собственных колебаний системы подвеска — слайдер — воздушный слой-диск. Несмотря на достаточно мощный удар, столкновений головки и диска не происходит, так как скорость полета достаточно велика. Но при малых скоростях, которые имеют место на взлете или посадке слайдера, жесткость воздушной подушки существенно уменьшается, что приводит к столкновениям слайдера и диска.

На рис. 8 представлены колебания угла крена $\psi_2(t)$, вызываемые переходом слайдера между дорожками. Здесь просчитан частный случай, когда точка прижима совпадает с центром тяжести головки ($x_F = x_C$, угол поворота $\psi_3 = 0$). Изменение поперечной скорости принято в виде $V = 0,157 \sin(\pi t)$ м/с, что соответствует времени перехода 1 мс и расстоянию между дорожками 100 мкм. Скачки ускорения в начальный и конечный моменты ($50g$) возбуждают затухающие свободные колебания слайдера, амплитуда которых уменьшается на порядок за 0,5 мс (декремент равен примерно 0,8).

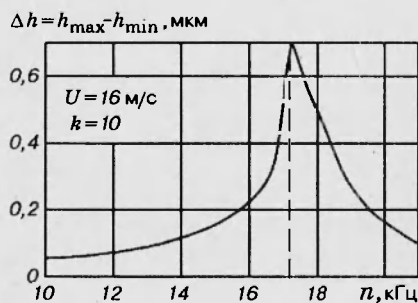


Рис. 9

Рис. 9 отражает влияние периодических возмущений (вертикальная вибрация всей системы) на величину зазора головки. Здесь представлена зависимость размаха колебаний от частоты вибрации (максимальная перегрузка $10g$). Как и следовало ожидать, максимум размаха отвечает указанной выше частоте свободных колебаний системы (18000 Гц). Вынужденные колебания такой частоты (в том числе и звукового происхождения) являются наиболее опасными для нормальной работы головки.

Представленные здесь результаты не дают, конечно, полного анализа поведения слайдера в различных условиях, а являются всего лишь иллюстрацией возможностей теории и программ, которые предлагаются заинтересованным организациям и лицам.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Garsia-Suarez C., Bogy D. E., Talke F. E.** Use of an unwind finite element scheme for air-bearing calculation // Tribology and Mechanics of Magnetic Storage Systems, SP-16. 1984. P. 390–396.
2. **Yamaguchi Y., Takashi K., Fujita H., Kuwachara K.** Flow Induced Vibration of Magnetic Recording Disks // IEEE Trans. Magn. 1986. V. 22, N 5. P. 1022–1024.
3. **Benson R., Chiang C., Talke F.** The dynamics of slider bearings during contacts between slider and disk // IBM J. Res. Develop. 1989. V. 33, N 1.
4. **Шейнберг С. А.** Опоры скольжения с газовой смазкой. М.: Машиностроение, 1979.
5. **Слезкин Н. А.** Уравнения Рейнольдса для течения газовой смазки с учетом скольжения первого и второго порядков // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1981. Вып. 6. С. 95–99.
6. **Марчук Г. И.** Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1989.

*Поступила в редакцию 21/VII 1993 г.,
в окончательном варианте — 25/VII 1994 г.*
