

УДК 621.836.2

ОПИСАНИЕ ГЕОМЕТРИИ ВОЗДУШНОГО ЗАЗОРА ПРИ МАТЕМАТИЧЕСКОМ МОДЕЛИРОВАНИИ АЭРОСТАТИЧЕСКИХ НАПРАВЛЯЮЩИХ

Никита Игоревич Майоров

магистрант

de100x@mail.ru

Тамбовский государственный технический университет

г. Тамбов, Россия

Аннотация. В данной работе представлена математическая модель течения воздуха в узком канале, предназначенная для расчёта технологических характеристик аэростатических направляющих. Разработан метод описания геометрии зазора в направляющей при угловом отклонении слайдера, заключающийся в определении функции высоты зазора, используемой в модифицированных уравнениях Рейнольдса. Метод позволяет оптимизировать вычисления возникающих крутящих моментов и вращательной жесткости.

Ключевые слова: аэростатические направляющие, вычислительная гидродинамика, математическое моделирование, метод конечных элементов.

Так как высота зазора в аэростатической направляющей значительно меньше его длины и ширины, для моделирования потока воздуха можно использовать уравнения Рейнольдса, описывающие поток жидкости или газа в тонкой плёнке между двумя плоскостями[1]. Это позволит значительно снизить вычислительные ресурсы, необходимые для численного решения.

Геометрия рабочей поверхности задаётся с помощью функции высоты:

$$h_{film} = h_{gap} + h_{recess} + h_{groove} + \tan(a_y) * x - \tan(a_x) * y \quad (1)$$

где: h_{film} — полная высота воздушной плёнки; h_{gap} — высота зазора; h_{recess} — глубина углублений; h_{groove} — глубина канавок; a_x — угол поворота вокруг оси x ; a_y — угол поворота вокруг оси y ;

Слагаемые $\tan(a_y) * x$ и $\tan(a_x) * y$ параметризуют наклон слайдера.

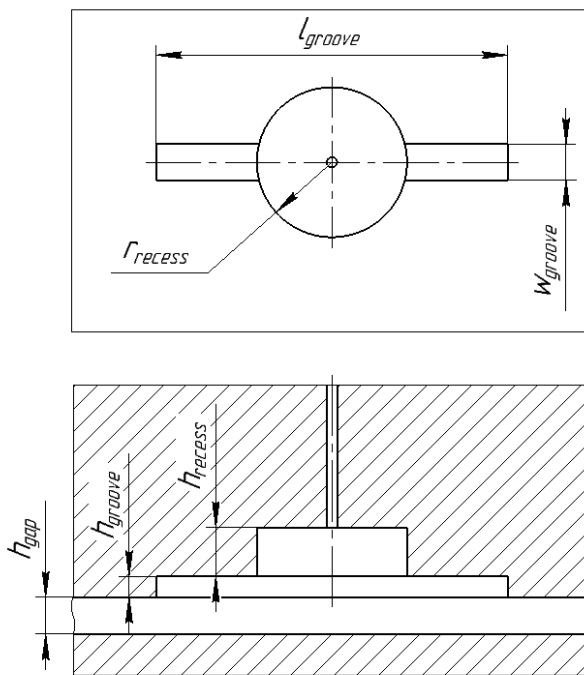


Рисунок 1 – Схема отверстия подачи воздуха

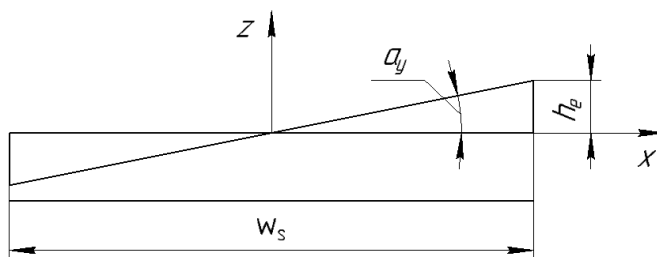


Рисунок 2 – Схема модели наклона слайдера.

Пределом варьирования угла α_y является максимальный угол поворота, при котором кромка слайдера касается направляющей:

$$\alpha_{y\max} = \arctan\left(\frac{2h_{gap}}{w_s}\right) \quad (2)$$

Для конфигурации аэростатической направляющей с шириной $w_s = 20$ мм, длиной $l_s = 80$ мм и средней высотой зазора $h_{gap} = 9$ мкм предельные значения углов $\alpha_{x\max} = 0,0009$ рад, $\alpha_{y\max} = 0,00023$ рад.

Далее метод параметризации высоты зазора был усовершенствован для описания направляющей закрытого типа.

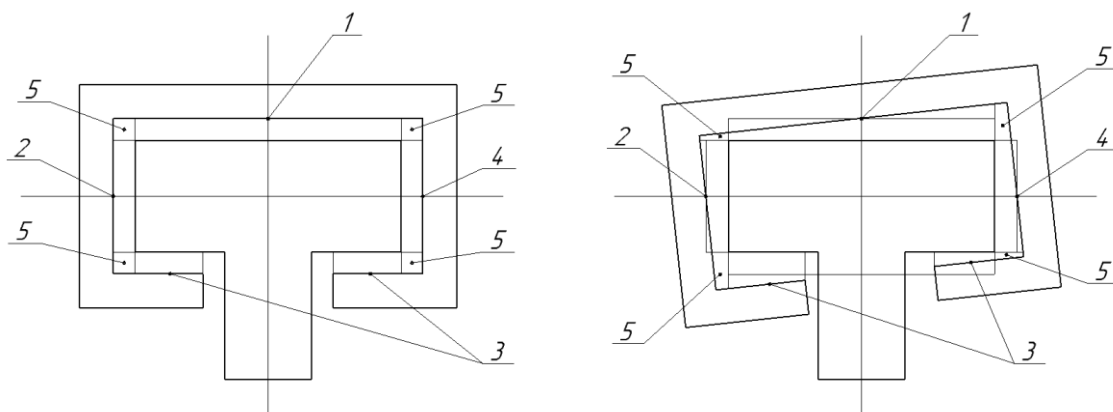


Рисунок 3 – Схема зазора в закрытой направляющей

Делаем допущение, что поворот происходит вокруг оси симметрии сечения направляющей. Размеры сечения направляющей и слайдера значительно превосходят высоту зазора, следовательно, объёмами 5 (см. рисунок 3), расположенными в углах зазора можно пренебречь. По геометрическому построению видно, что максимальный угол поворота зависит только от высоты зазора и величины его максимального габаритного размера в сечении перпендикулярном оси поворота.

Таким образом, функция высоты принимает следующий вид:

$$h_{film} = \begin{cases} h_{gap} + h_{recess} + h_{groove} + \tan(\alpha_y) * x - \tan(\alpha_x) * y; & S1 \\ h_{gap} + h_{recess} + h_{groove} + \tan(\alpha_y) * z - \tan(\alpha_z) * y; & S2 \\ h_{gap} + h_{recess} + h_{groove} - \tan(\alpha_y) * x + \tan(\alpha_x) * y; & S3 \\ h_{gap} + h_{recess} + h_{groove} - \tan(\alpha_y) * z + \tan(\alpha_z) * y; & S4 \end{cases} \quad (3)$$

где: S1, S2, S3, S4 – поверхности 1, 2, 3, 4 соответственно (см. рисунок 3).

Предположим, что при поворотах слайдера вокруг центра, максимальная величина смещения точки пересечения проекции кромки слайдера с осью x будет мала и ей можно пренебречь. Рассмотрим поворот прямоугольника и сравним порядок величины смещения и величины зазора в направляющей.

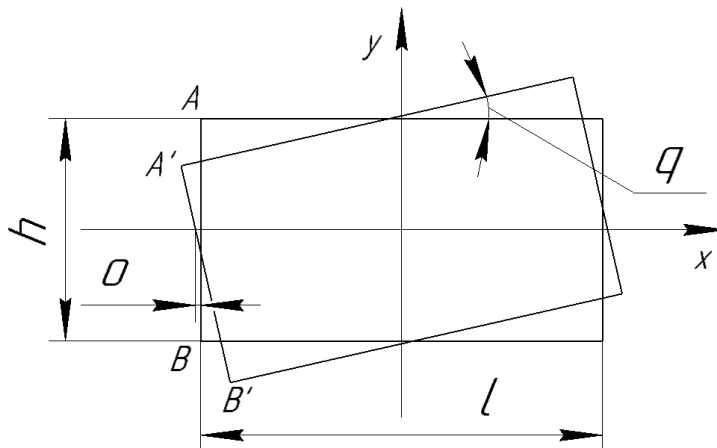


Рисунок 4 – Схема поворота прямоугольника вокруг центра

Координаты точек A' и B' выражаются как:

$$A' = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2} \cos q - \frac{h}{2} \sin q \\ -\frac{l}{2} \sin q + \frac{h}{2} \cos q \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B' = \begin{bmatrix} -\frac{l}{2} \cos q + \frac{h}{2} \sin q \\ -\frac{l}{2} \sin q - \frac{h}{2} \cos q \end{bmatrix} \quad (5)$$

Найдём смещение координаты x точки пересечения прямой, проходящей через A' и B' , и осью x . Выразим его через геометрические параметры сечения направляющей и угол поворота:

$$o = \frac{l}{2} \left(\frac{\sin^2 q}{\cos q} + \cos q - 1 \right) \quad (6)$$

Максимальный возможный поворот и смещение:

$$q_{max} = \arctan \frac{2h_{gap}}{l} \quad (7)$$

$$o_{max} = \frac{l}{2} \left(\frac{\sin^2(q_{max})}{\cos(q_{max})} + \cos(q_{max}) - 1 \right) \quad (8)$$

При $h_{gap} = 9$ мкм и $l = 20$ мм максимальное смещение будет $4,05 \cdot 10^{-6}$ мм, что более чем в 2000 раз меньше чем величина зазора h_{gap} , следовательно, им можно пренебречь.

Расчет распределения давления произведен численно с использованием метода конечных элементов и основан на приведенных ниже модифицированных уравнениях Рейнольдса [1, 2]:

$$\nabla_t \cdot (p_a \square_{film} \vec{v}_{ave}) = 0 \quad (9)$$

$$p_a = p_{ref} + p_{film} \quad (10)$$

$$\vec{v}_{ave} = \frac{1}{2}(I - nn^T)(\vec{v}_w + \vec{v}_b) - \frac{\square_{film}^2 + 6\square_{film}L_{sw}}{12\mu} \nabla_t p_{film} \quad (11)$$

$$L_{sw} = \frac{\sqrt{\pi}\lambda(2 - \alpha)}{2\alpha} \quad (12)$$

где: p_a — давление; h_{film} — высота воздушного зазора; p_{ref} — атмосферное давление; \vec{v}_w, \vec{v}_b — скорости на верхней и нижней стенке; μ — динамическая вязкость; L_{sw} — средняя длина проскальзывания частиц на стенке; λ — длина свободного пробега частицы; α — коэффициент аккомодации.

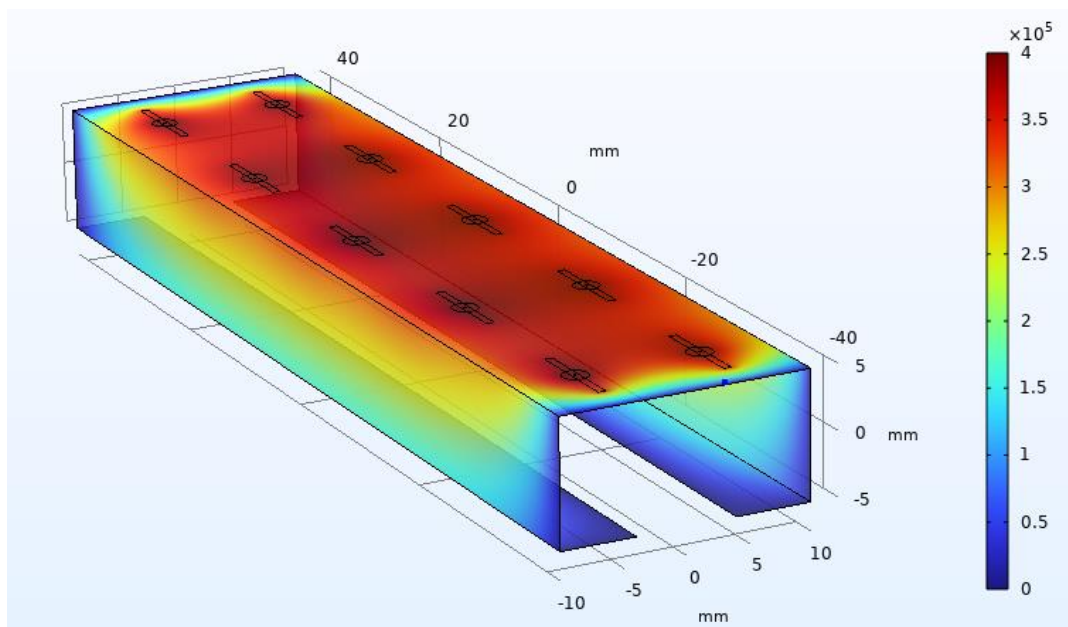


Рисунок 5 – Распределение давления в воздушном зазоре

Крутящий момент выражается интегралом произведения давления на плечо по поверхности плёнки, вращательная жесткость - отношением изменения момента к изменению угла поворота[3].

$$M = \int_A x * p_{film} dA \quad (13)$$

$$K_r = \frac{dM}{da_r} \quad (14)$$

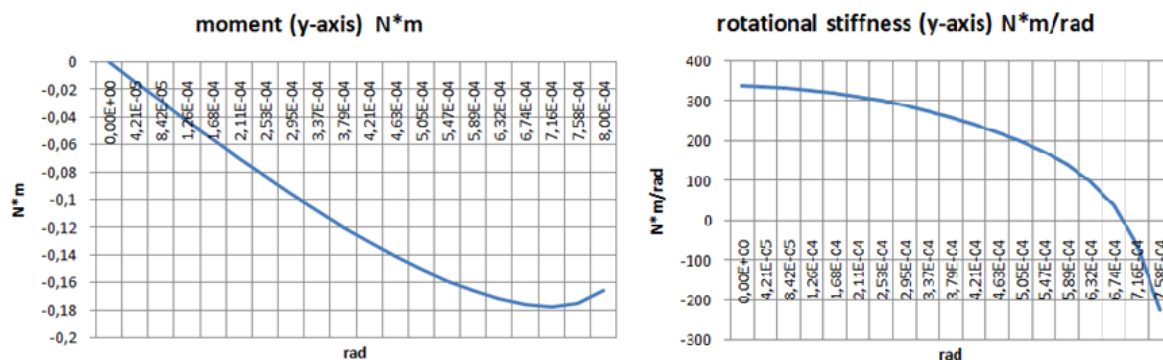


Рисунок 6 – Зависимость крутящего момента и вращательной жесткости вокруг оси у от угла поворота

Из результатов моделирования можно сделать вывод, что при угловом отклонении слайдера направляющей от положения равновесия, за счёт изменения профиля зазора давление в нём распределяется неравномерно относительно оси вращения, что создаёт крутящий момент, стремящийся вернуть слайдер в исходное положение. Зависимость крутящего момента и вращательной жесткости от угла отклонения представлена на рисунке 6.

Таким образом, данный метод имеет практическую значимость для исследования и обоснования рациональных конструкций аэростатических направляющих и режимов их функционирования.

Список литературы:

1. B.J. Hamrock, S.R. Schmid, and B.O. Jacobson, Fundamentals of Fluid Film Lubrication, Marcel Dekker, 2004.p. 209.
2. F. Sharipov, “Data on the Velocity Slip and Temperature Jump on a Gas-Solid Interface,” J. Phys. Chem. Ref. Data, vol. 40, no. 2, p. 023101, 2011. p. 4.
3. Z. Wen, J. Wu, K. Xing et al., Design of Microstructure Parameters on a Small Multi-Throttle Aerostatic Guideway in Photolithography, Engineering. p. 4.

UDC 621.836.2

DESCRIPTION OF THE GEOMETRY OF THE AIR GAP IN THE MATHEMATICAL MODELING OF AEROSTATIC GUIDEWAYS

Nikita Ig. Mayorov

master student

de100x@mail.ru

Tambov State Technical University

Tambov, Russia

Abstract. This paper presents a mathematical model of air flow in a narrow channel designed to calculate the technological characteristics of aerostatic guideways. A method has been developed to describe the geometry of the gap in the guideway at the angular deviation of the slider, which consists in determining the function of the gap height used in the modified Reynolds equations. The method makes it possible to optimize the calculations of the resulting torques and rotational stiffness.

Key words: Aerostatic guideways, computational fluid dynamics, mathematical modeling, finite element method.

Статья поступила в редакцию 03.05.2024; одобрена после рецензирования 13.06.2024; принята к публикации 27.06.2024.

The article was submitted 03.05.2024; approved after reviewing 13.06.2024; accepted for publication 27.06.2024.