

рованными датчиками "сенсор-актюатор" на силиконовых чипах открывают перспективы для управления потоком с целью снижения турбулентного сопротивления

Судя по полученным результатам, поразительные возможности, которые еще до конца не изучены, обеспечивают полимерные добавки и различные комбинации такого метода управления с другими способами воздействия на турбулентный пограничный слой. Пристального внимания заслуживают устройства разрушения вихрей и риблеты, совместное использование которых является одним из наиболее перспективных, относительно простых и дешевых способов управления турбулентностью.

УДК 621.12

## **ПОТЕРИ ЭНЕРГИИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЯХ ТЕЛА В ВЯЗКОЙ СРЕДЕ**

*Петров Денис Андреевич, Бишара Ахмад Акрам  
Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Веренич И.А.  
(Белорусский национальный технический университет)*

В работе исследуются колебания тел в вязкой жидкости. Показано, что момент сил трения на диске при вращательном колебательном движении возрастает с увеличением частоты колебаний.

Движение, возникающее в вязкой жидкости при колебаниях, погруженных в нее твердых тел, обладает рядом характерных особенностей. Изучением этих особенностей занимались Г.Г. Стокс, Л.Д. Ландау, Дж. Бэтчелор и другие видные учёные. При колебаниях плоской поверхности с частотой  $\omega$  несжимаемой вязкой жидкости сила трения на твёрдой поверхности отнесённая к единице площади равна [1]:

$$\sigma_{xy} = \eta \left. \frac{\partial v_y}{\partial y} \right|_{x=0} = \sqrt{\frac{\omega \eta \rho}{2}} (i-1)u. \quad (1)$$

Скорость  $u$  колеблющейся поверхности представляют функцией времени вида  $A \cos(\omega t + \alpha)$ , которую записывают в виде вещественной части от комплексной скорости  $u_\omega = \left\{ u_0 e^{-i\omega t} \right\}$ , где  $u_0 = A e^{\alpha}$ . Предполагая  $u_0$  вещественным и отделив в (1) вещественную часть, получим

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\omega \eta \rho} u_0 \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{4}\right). \quad (2)$$

Таким образом, между скоростью и силой трения имеется сдвиг фаз  $\frac{\pi}{4}$ . Среднее (по времени) значение диссипации энергии при рассматриваемом движении можно вычислить как работу сил трения. Запишем диссипацию энергии в единицу времени, отнесенная к единице площади колеблющейся плоскости в следующем виде:

$$\overline{\sigma_{xy} u} = \frac{u_0^2}{2} \sqrt{\frac{\omega \eta \rho}{2}}. \quad (3)$$

Из формулы видно, что энергия диссипации пропорциональна корню из частоты колебаний и из вязкости жидкости. При движении плоской поверхности в жидкости с изменением скорости по произвольному закону  $u = u(t)$ , сила трения (отнесенная к единице площади) определяется формулой [1]:

$$\sigma = -\sqrt{\frac{\mu \rho}{\pi} \int_{-\infty}^t \frac{du(\tau)}{d\tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}}. \quad (4)$$

При колебаниях плоской поверхности на расстоянии  $\delta$  затухает не только  $\text{rot } v$ , но и сама скорость  $v$ . Это связано с тем, что плоскость при своих колебаниях не вытесняет жидкости и потому жидкость вдали от нее остается вообще неподвижной. При колебаниях же тел другой формы происходит вытеснение жидкости, в результате чего она приходит в движение, скорость которого заметно затухает лишь на расстояниях порядка размеров тела.

В пристеночном же слое величина  $v_y$  будет падать по направлению к поверхности по закону:

$$v_y = v_0 e^{-i\omega t} \left[ 1 - e^{-(1-i)x\sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}} \right]. \quad (5)$$

Полная диссипируемая в единицу времени энергия будет равна интегралу [1]:

$$\overline{E_{\text{кин}}} = -\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\rho\eta\omega}{2}} \int |v_0|^2 df, \quad (6),$$

взятому по всей поверхности колеблющегося тела. Написав скорость движения тела в комплексном виде  $u = u_0 e^{-i\omega t}$ , мы получаем в результате силу сопротивления  $F$ , пропорциональную скорости, в комплексном виде  $F = \beta u$ , где  $\beta = \beta_1 + i\beta_2$  — комплексная постоянная; это выражение можно написать как сумму двух членов [1]:

$$F = (\beta_1 + i\beta_2)u = \beta_1 u - \frac{\beta_2}{\omega} \dot{u}, \quad (7)$$

пропорциональных соответственно скорости  $u$  и ускорению  $\dot{u}$  с вещественными коэффициентами. Средняя (по времени) диссипация энергии определяется средним значением произведения силы сопротивления и скорости:

$$u = \frac{1}{2}(u_0\beta e^{i\omega t} + \dot{u}_0\beta e^{i\omega t}), \quad F = \frac{1}{2}(u_0\beta e^{i\omega t} + \dot{u}_0\beta e^{i\omega t}).$$

Замечая, что средние значения от  $e^{\pm 2i\omega t}$  равны нулю, получим [1]:

$$\overline{\dot{E}_{кин}} = \overline{FU} \frac{1}{4}(\beta + \beta^*)|u_0|^2 = \frac{\beta_1}{2}|u_0|^2. \quad (8)$$

Таким образом, мы видим, что диссипация энергии связана только с вещественной частью величины  $\beta$ , соответствующая (пропорциональная скорости) часть силы сопротивления (7) названа диссипативной. Вторая же часть этой силы, пропорциональная ускорению (определяемая мнимой частью  $\beta$ ) и не связанная с диссипацией энергии, названа инерционной. Аналогичные соображения относятся к моменту сил, действующих на тело, совершающее вращательные колебания в вязкой жидкости. Распределение скоростей (5) написано в системе отсчета, в которой твердое тело покоится ( $v_y = 0$  при  $x = 0$ ), Поэтому в качестве  $v_0$  надо брать решение задачи о потенциальном обтекании жидкостью неподвижного тела. В качестве примера исследовано колебательное движение диска в глицерине.

**Исходные данные:** радиус диска  $r = 0,2$  м, угол поворота  $\theta = 15^\circ$ , толщина слоя жидкости  $z = 0,0001$  м, плотность  $\rho = 1260$  кг/м<sup>3</sup>, динамическая вязкость среды  $\eta = 0,85$  Па·с, кинематическая вязкость среды  $\nu = 680$  мм<sup>2</sup>/с.

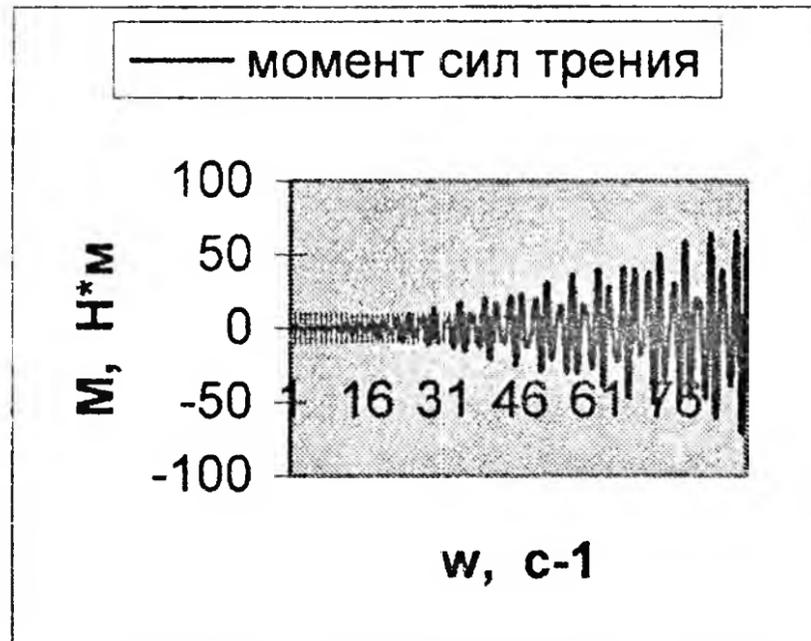


Рисунок 1 – Зависимость момента сил трения от частоты колебания жидкости

**Выводы:** Из приведенных результатов расчёта видно, что момент сил трения на диске, совершающем вращательное колебательное движение, возрастает с увеличением частоты колебаний, а также увеличивается скорость движения жидкости, вызываемая колебаниями диска.

Ландау, Л.Д. Теоретическая физика: учебное пособие в 10 т. Т. IV. Гидродинамика / Л.Д.Ландау, Е.М.Лившиц – 4-е изд., стер. – М.: Наука. гл. ред. физ. мат. лит., 1988. – 736 с.

УДК 621.81

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИБРИДНЫХ БЕНЗИНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ В АВТОМОБИЛЯХ

*Страузов Александр Владимирович  
Научный руководитель – канд. техн. наук, доц. Королькевич А.В.  
(Белорусский национальный технический университет)*

В данной статье будет рассмотрен пример преобразования и накопления преобразованной кинетической энергии движущегося автомобиля и дальнейшее ее использование для движения.