

УДК 532.5:537.5

**КОНКУРЕНЦИЯ МОД ПЛАЗМЕННОГО СЛЕДА
ЗА ПОПЕРЕЧНЫМ РЯДОМ ЦИЛИНДРОВ**

© 2011 г.

Г.В. Гембаржевский

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

gvgemb@ipmnet.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Представлены данные по исследованию течения плазмы азота за рядом из двух и трех параллельных цилиндров в условиях тлеющего разряда, типичного для применения в электроразрядных CO₂-лазерах. Определяющими параметрами в этом случае являются число Рейнольдса Re, относительный шаг расположения цилиндров в ряду и плотность тока. В зависимости от значения этих параметров в эксперименте наблюдается от одного до трех спектральных пиков в спектре пульсаций скорости в следе. Использован простейший способ идентификации этих «глобальных мод» следа – применение разрабатываемой одномерной модели течения (в форме связанных осцилляторов Ван-дер-Поля). Помимо идентификации мод удалось восстановить два параметра одномерной модели течения по расположению спектральных пиков стационарных мод следа. Оценены области притяжения стационарных мод. В рамках исследования одновременно развивается двухмерная модель параллельных стационарных дорожек Кармана в невязкой жидкости наряду с упомянутой выше одномерной моделью.

Ключевые слова: глобальная мода, область притяжения, идентификация мод, одномерная модель, нарушение симметрии.

Экспериментальное исследование плазменного следа за двумя и тремя цилиндрами было проведено с помощью одноточечного датчика пульсационной скорости плазмы; подробности постановки эксперимента можно найти в [1]. В зависимости от условий опыта в спектре пульсаций скорости обнаружено от одного до трех максимумов, отождествляемых с квазигармоническими осцилляциями глобальных мод течения. Эти данные записаны в форме зависимостей чисел Струхала от числа Рейнольдса $Sh_i = Sh_i(Re)$. Соответственно первый возникающий вопрос – это идентификация указанных мод течения. В отсутствие прямых измерений наиболее просто этот вопрос решается с помощью разрабатываемой простейшей одномерной модели течения в форме связанных слабо-нелинейных осцилляторов типа Ван-дер-Поля. Тогда для случая следа за тремя цилиндрами имеем следующую систему уравнений для медленно меняющихся амплитуд и фаз глобальных мод в низшем приближении по малому параметру нелинейности ε :

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\varepsilon p}{2(1+\sqrt{2}C)} \left[1 - \frac{3+4\lambda}{128} p^2 - \frac{3+4\lambda}{64} r^2 - \frac{1+2\lambda}{16} q^2 \right], \quad (1)$$

$$\frac{\partial r}{\partial t} = \frac{\varepsilon r}{2(1-\sqrt{2}C)} \left[1 - \frac{3+4\lambda}{128} r^2 - \frac{3+4\lambda}{64} p^2 - \frac{1+2\lambda}{16} q^2 \right], \quad (2)$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{\varepsilon q}{2} \left[1 - \frac{1+2\lambda}{32} p^2 - \frac{1+2\lambda}{32} r^2 - \frac{1}{16} q^2 \right], \quad (3)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial \varphi}{\partial t} = 0. \quad (4)$$

Здесь медленные амплитуды и фазы глобальных мод синфазной и противофазной синхронизации соседних кармановских дорожек-осцилляторов и зеркально-симметричной моды течения соответственно введены согласно соотношениям:

$$X_0 = p \cos(\theta + \omega_0 t), \quad X_\pi = r \cos(\psi + \omega_\pi t), \quad (5)$$

$$X_{m-s} = q \cos(\varphi + t).$$

Наблюдаемые в эксперименте со следом за тремя цилиндрами два спектральных пика в спектре пульсаций отождествлены следующим образом. Относительно низкочастотный пик представляет собой осцилляции зеркально симметричной моды ввиду совпадения его центральной частоты с частотой осцилляций в следе за уединенным цилиндром:

$$Sh_{m-s} = 0.17 \approx Sh_\infty = 0.16. \quad (6)$$

Второй (сравнительно высокочастотный) макси-

мум в спектре $Sh = 0.227$ был отождествлен с синфазной модой осцилляций на основе некоторых косвенных соображений. (В различных режимах течения устойчиво наблюдалось явление захвата частоты высокочастотного пика обертоном частоты вращения вентиляторов, прокачивающих газ по контуру установки.) Аналогично идентифицированы спектральные пики синфазной и противофазной моды синхронизации дорожек-осцилляторов в спектре следа за двумя цилиндрами: $Sh_0 = 0.224$; $Sh_\pi = 0.156$. По распределению отмеченных четырех чисел Струхала однозначно восстанавливается параметр C модели (1)–(4): $C = -0.25$.

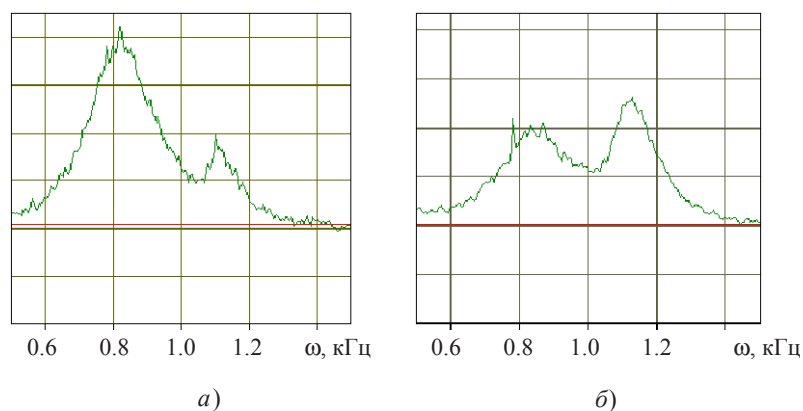


Рис. 1

Следует отметить, что при изменении интенсивности взаимодействия осцилляторов (то есть при изменении расстояния между дорожками Кармана) области притяжения стационарных мод могут меняться. В модели этому изменению соответствует вариация параметров C , λ .

В рамках этого исследования, помимо нестационарной одномерной модели следа, развивается двумерная стационарная модель течения, базирующаяся на рассмотрении устойчивости конфигурации дорожек Кармана в невязкой несжимаемой жидкости [2].

Экспериментально обнаружена область параметров: $Re \sim 1500\text{--}2000$; безразмерное расстояние между осями цилиндров $T \sim 2.2$; погонная плотность тока на катоде $j \sim 1\text{--}2$ А/м, где следовое течение малоустойчиво, и, соответственно удается наблюдать эффект перестройки следа от моды

к моде под действием тлеющего разряда.

Для течения за двумя цилиндрами с ростом тока разряда ранее была обнаружена перестройка от относительно высокочастотной моды синфазной синхронизации к низкочастотной моде противофазной синхронизации дорожек Кармана [1]. Для случая трех цилиндров впервые обнаружена «обратная» перестройка от относительно низкочастотной зеркально-симметричной моды к высокочастотной моде синфазной синхронизации дорожек Кармана.

На рис. 1 представлены спектры пульсаций скорости в нейтральном азоте (а) и в плазме с плотностью тока 2 А/м (б).

В обоих случаях (два и три цилиндра) перестройки мод следового течения эффект разряда объясняется нарушением однородности распределения плотности тока («эффект спонтанного нарушения симметрии») при повышенных значениях тока [3], и симметрией гидродинамических мод течения вблизи цилиндров.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 09-01-00845-а.

Список литературы

1. Гембаржевский Г.В. // Письма в ЖТФ. 2009. Т. 35, вып. 5. С. 95–102.
2. Гембаржевский Г.В. // Письма в ЖТФ. 2011. Т. 37, вып. 1. С. 40–47.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, Физматлит, 1987. 592 с.

**CONCURRENCE OF HYDRODYNAMIC MODES
IN PLASMA WAKE BEHIND THE TRANSVERSE ROW OF CYLINDERS**

G.V. Gembarzhevskii

This presentation is devoted to studying the nitrogen plasma wake beneath a row of two or three parallel cylinders at glow electrical discharge as commonly applied in the electric-discharge CO₂-lasers. In this case, the basic governing parameters are the Reynolds number, the row non-dimensional pitch and the current density. Depending on the values of these parameters, from one to three maxima in the velocity spectra of the wake have been observed. The simplest way of identification of these global modes was used, namely, the employment of one-dimensional flow model developed (in the form of coupled van-der-Pole oscillators). In addition to the mode identification, the values of two parameters of this flow model have been found from the disposition of the velocity spectral peaks. Within the framework of this analysis the two-dimensional model of such wake flows (the model of interacting Karman streets in non-viscid fluid) is developed, as well as the one-dimensional model mentioned above.

Keywords: global mode, attraction domain, mode identification, one-dimensional model, symmetry break.