

ПОПЕРЕЧНОЕ ОБТЕКАНИЕ ЦИЛИНДРА ПРИ ПЕРИОДИЧЕСКОМ ВОЗМУЩЕНИИ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ЭЛЕКТРОЛИЗНЫМИ ПУЗЫРЬКАМИ

*Институт прикладной физики АНМ,
ул. Академией, 5, г. Кишинев, MD-2028, Республика Молдова*

Введение

В последнее время в механике жидкости все более интенсивными становятся исследования по управлению обтеканием тел с плавающей точкой отрыва пограничного слоя. Это направление перспективно, поскольку лишь путем управления течением зачастую возможно достигнуть необходимых характеристик подобных тел в различных технических приложениях, в частности для интенсификации теплообменных процессов, снижения гидродинамического сопротивления и вибраций в теплообменниках, повышения эффективности процессов горения и др.

Изменение обтекания плохообтекаемых тел, например цилиндра, можно осуществить, применяя пассивные или активные методы управления [1]. В первом случае с помощью генераторов турбулентности энергия, необходимая для преобразования режима течения в пограничном слое, направляется из свободного потока. Часть пассивных методов управления (шероховатость, турбулентность внешнего потока) стали классическими и широко применяются в различных энергетических установках. Из последних достижений в этой области следует отметить методы пассивного управления, основанные на создании на поверхности тел организованной системы вихревых структур, позволяющей с наименьшими энергетическими затратами существенно интенсифицировать конвективный теплообмен [1–3].

В случае активного управления потоком энергия, необходимая для преобразования гидродинамических и теплообменных параметров плохообтекаемых тел, прилагается извне. Эта энергия может быть использована для того, чтобы выдувать или отсасывать пограничный слой [4], нагревать или охлаждать поверхность тела [5], генерировать микропузырьки в пограничный слой [6, 7], создавать вращательное движение тела или его отдельных поверхностей [8]. Основной особенностью активных методов управления является возможность их применения как в статическом, так и в динамическом режиме. В статическом режиме параметры воздействия внешнего источника возмущений не изменяются во времени. Для повышения эффективности активных методов управления в статическом режиме необходимо подобрать оптимальные параметры управления. В этом контексте активные методы мало отличаются от пассивных.

При динамическом управлении воздействие периодических возмущений направлено непосредственно на процессы отрыва пограничного слоя и формирования вихревого следа за плохообтекаемым телом. Для динамического управления применяются системы с прямым воздействием или с обратной связью.

В случае поперечного обтекания цилиндра для управления гидродинамическими характеристиками с использованием систем активного динамического управления с открытым контуром применялись методы продольных или поперечных вынужденных колебаний цилиндра [9] или отдельных частей его поверхности [10]. Этот принцип управления реализован также на базе методов периодического возмущения набегающего потока [11], наложения акустических возмущений [12], периодического вдувания струй в пограничный слой [13], локализованного нагрева/охлаждения поверхности цилиндра в лобовой части [14], крутильных колебаний цилиндра [15].

Основное внимание в большинстве исследований было направлено на обнаружение явления синхронизированного отрыва вихрей f_N с частотой вынужденных возмущений потока вблизи цилиндра. В частности, об обнаружении явления синхронизации частот вблизи натуральной частоты отрыва вихрей $f_N = f_E$ сообщается в [9–15]. В [11] выявлено аналогичное явление при $f_N = f_E/2$, а в [9] –

при $f_N = f_E/3$. Тем не менее в ряде работ выделяется лишь плавное установление резонансного режима при $f_N = f_E$ [16]. Более существенно отличаются результаты исследований влияния частоты и амплитуды вынужденных возмущений на течение вблизи цилиндра за пределами режима синхронизации частот или резонансного режима. Например, несмотря на применение для управления течением вокруг цилиндра аналогичного метода, в [12] отмечается увеличение гидродинамического сопротивления, а в [17] – его уменьшение.

Динамическое управление обтекания цилиндра с обратной связью было предметом теоретических и экспериментальных исследований [16, 18–19]. Применяя этот принцип управления, воплощенный в методе акустических возмущений, в [18] получили снижение уровня пульсаций скорости более 30 dB. В [16] выявлено значительное уменьшение сопротивления цилиндра при внедрении этого принципа в методе активного управления крутильными колебаниями цилиндра. Некоторые особенности применения принципа управления с обратной связью получены путем численного моделирования обтекания цилиндра [19].

В настоящей работе основное внимание уделяется развитию активного метода управления обтеканием цилиндра, основанного на способе возмущения пограничного слоя электролизными пузырьками. Некоторые особенности статического управления течением вокруг цилиндра с применением этого метода представлены в [20]. Целью работы является экспериментальное исследование влияния периодического возмущения пограничного слоя электролизными пузырьками на развитие вихревой дорожки в следе обтекаемого цилиндра.

Экспериментальная установка и методика исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовалась гидродинамическая труба замкнутого типа и рабочая камера с поперечным сечением $150 \times 70 \text{ мм}^2$. Число Рейнольдса изменялось в пределах $Re = (0,3 - 1,2) \cdot 10^5$. Принципиальная схема рабочего канала и установленного в ней исследованного цилиндра представлена на рис. 1, а. На поверхности цилиндра из органического стекла с диаметром 22 мм смонтированы 6 электродов длиной 70 мм и шириной 1,2 мм с шагом 60 градусов. Вращением цилиндра вокруг своей оси можно установить необходимый угол расположения электродов и пьезоотверстия для измерения давления по отношению к передней критической точке. Электроды, размещенные по образующей цилиндра, а также на поверхности стенок рабочего канала, подключались к генератору прямоугольных импульсов. Активное динамическое управление течением вокруг цилиндра осуществлялось путем последовательной подачи прямоугольных импульсов отрицательной полярности на один электрод или на пару электродов, расположенных симметрично относительно лобовой критической точки. В последнем случае импульсы подавались поочередно на первый и второй электроды с равными промежутками времени.

Плотность электрического тока в импульсах изменялась до 200 мА/см^2 , а частота импульсов – в пределах (0,2–150) Гц.

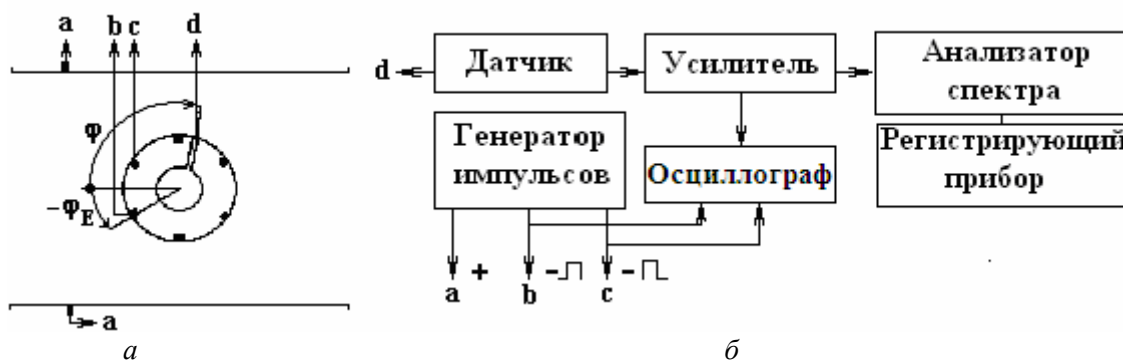


Рис. 1. Схема рабочей камеры (а) и блок-схема цепи управления (б)

На рис. 1, б представлена блок-схема управления течением и измерительной аппаратурой, включающей генератор прямоугольных импульсов, датчики давления и регистрирующие приборы. Для измерения пульсаций давления использовался датчик ЛХ-610А. Спектральный анализ осуществлялся анализатором спектра СК4-56.

Для визуализации течения использовались метод электролизных пузырьков и стробоскопическое освещение. Сопротивление цилиндра и его подъемная сила рассчитывались путем интегрирования распределения давления по его периметру.

Полученные результаты исследований и их обсуждение

Электролизные водородные пузырьки, генерированные в пограничный слой по всей поверхности цилиндра, могут существенно увеличить тепло- и массоперенос в случае свободной конвекции [21] или при поперечном обтекании цилиндра в области критических чисел Рейнольдса [22]. В частности, в [21] показано, что при возмущении течения около поверхности цилиндра электролизными пузырьками достигается трехкратное увеличение коэффициента теплоотдачи. В случае вынужденной конвекции ($Re=10^4-10^5$) влияние микропузырьков на теплоотдачу цилиндра слабее (около 40%), однако существенно (до 50%) уменьшается гидродинамическое сопротивление [20]. В обоих случаях результаты объясняются явлением генерирования турбулентности микропузырьками при росте, отрыве и перемещении их в пограничном слое цилиндра.

Возможности активного метода воздействия на обтекание цилиндра путем непрерывного генерирования микропузырьков в пограничный слой существенно расширяются при локализации процесса на его передней части. Как следует из анализа рис. 2, при локализации места ввода микропузырьков в пограничный слой ($\varphi=\pm 30^\circ$) возможно плавное уменьшение сопротивления цилиндра в области изменения плотности тока от 3 до 100 mA/cm^2 , тогда как при генерации микропузырьков по всей поверхности цилиндра это изменение происходит скачком при $J = 11 \text{ mA}/\text{cm}^2$.

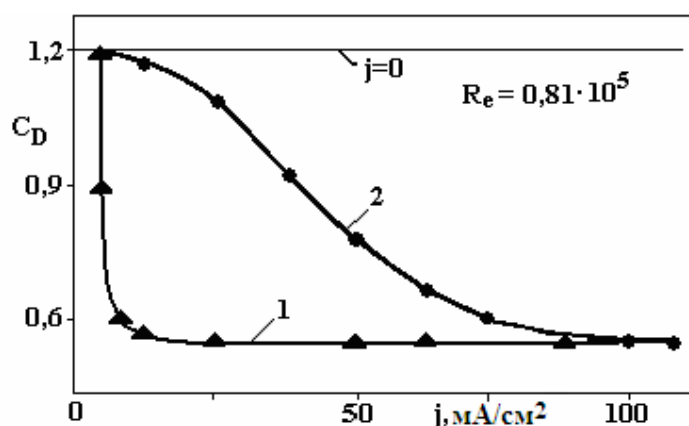


Рис. 2. Влияние микропузырьков на сопротивление цилиндра. 1 – непрерывный ввод микропузырьков по всей поверхности цилиндра; 2 – локализованный симметричный ввод ($\varphi=\pm 30^\circ$)

В [22] метод локального возмущения пограничного слоя микропузырьками использован для моделирования асимметричного поперечного обтекания цилиндра. При изменении режима течения в пограничном слое электролизными пузырьками только с одной стороны цилиндра на нем устанавливается асимметричный профиль давления с различными положениями точек отрыва пограничных слоев. Это приводит к снижению сопротивления цилиндра, однако резко возрастает подъемная сила. При этом чем больше плотность тока, тем резче проявляются изменения гидродинамических характеристик цилиндра.

При локальном периодическом генерировании микропузырьков с одной стороны цилиндра переход ламинарного режима течения в пограничном слое в турбулентный на этой стороне происходит во время подачи импульса тока на соответствующий электрод. Ламинарный режим восстанавливается полностью в момент отключения импульса. Однако следует отметить, что такое явление наблюдается только при частотах импульсов тока, которые намного меньше натуральной частоты отрыва вихрей ($f_E < 0,07 f_N$).

В области $f_E/f_N < 0,07$ на поверхности цилиндра через определенные интервалы возникают симметричный ($J=0,0$) и асимметричный ($J \neq 0,0$) профили распределения давления. Из анализа эпюры изменения во времени коэффициента давления на поверхности цилиндра, представленной на рис. 3 для точки, расположенной под углом $\varphi=140^\circ$, следует, что на стороне цилиндра с возмущенным пограничным слоем восстановление давления после отключения импульса тока происходит после некоторого запаздывания.

При более высоких частотах f_E распределение давления на поверхности цилиндра становится асимметричным и в фазе нулевого импульса электрического тока. С увеличением f_E положение точки отрыва пограничного слоя смещается вниз по потоку, приближаясь к точке, соответствующей отрыву пограничного слоя при непрерывном асимметричном генерировании микропузырьков в пограничный слой (рис. 4). В этом случае практически исчезает фаза восстановления симметричного профиля

давления, несмотря на то, что отсутствует влияние микропузырьков ($J=0,0 \text{ мА/см}^2$) на пограничный слой.

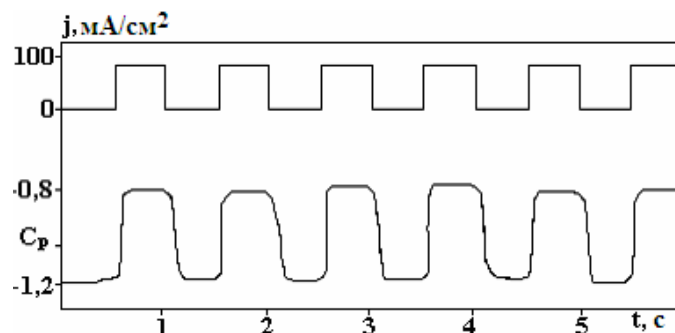


Рис. 3. Изменения коэффициента давления на поверхности цилиндра ($\varphi_2=140^\circ$) во времени при $f_E/f_N < 0,07$, $J=100,0 \text{ мА/см}^2$, $\varphi_E=+30^\circ$

Наблюдаемое явление объясняется замедленной реакцией (эффект гистерезиса) пограничного слоя на исчезновение импульса возмущения, проявляющейся в виде запаздывания перемещения вверх по потоку точки отрыва пограничного слоя относительно момента завершения процесса генерирования турбулентности в этом слое. Это явление можно сравнивать с гистерезисным эффектом, связанным с возникновением/исчезновением отрывного пузыря в пограничном слое на одной или другой стороне цилиндра при увеличении/уменьшении скорости потока [23]. Однако в случае управления течением около цилиндра путем генерирования электролизных пузырьков отрывные пузыри не наблюдались. Возмущение пограничного слоя настолько сильно, что происходит прямой переход к сверхкритическому режиму обтекания, минуя критический, при котором течение нестабильно и сопровождается нерегулярной частотой отрыва вихрей. Замедленную реакцию пограничного слоя на исчезновение возмущений можно представить как «явление запоминания» этих возмущений. Независимо от природы этого явления оно открывает широкие возможности для развития методов динамического управления потоком, так как тот же самый конечный результат (снижение сопротивления, увеличение подъемной силы, интенсификация тепло- и массообменных процессов) возможно получить при существенно меньших затратах энергии, чем при применении статических методов.

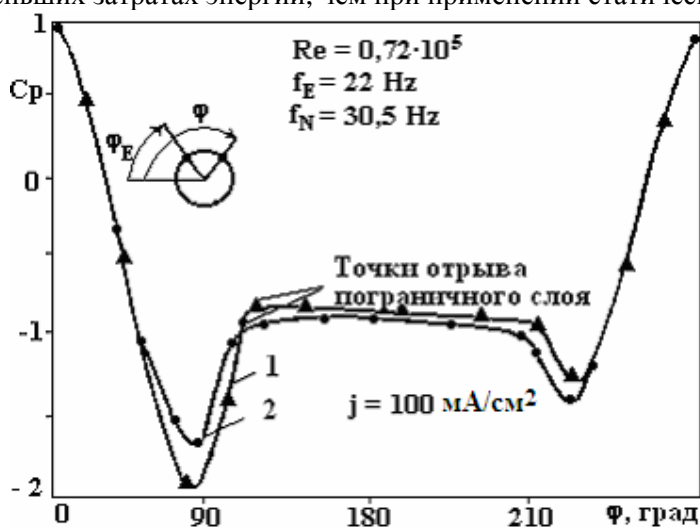


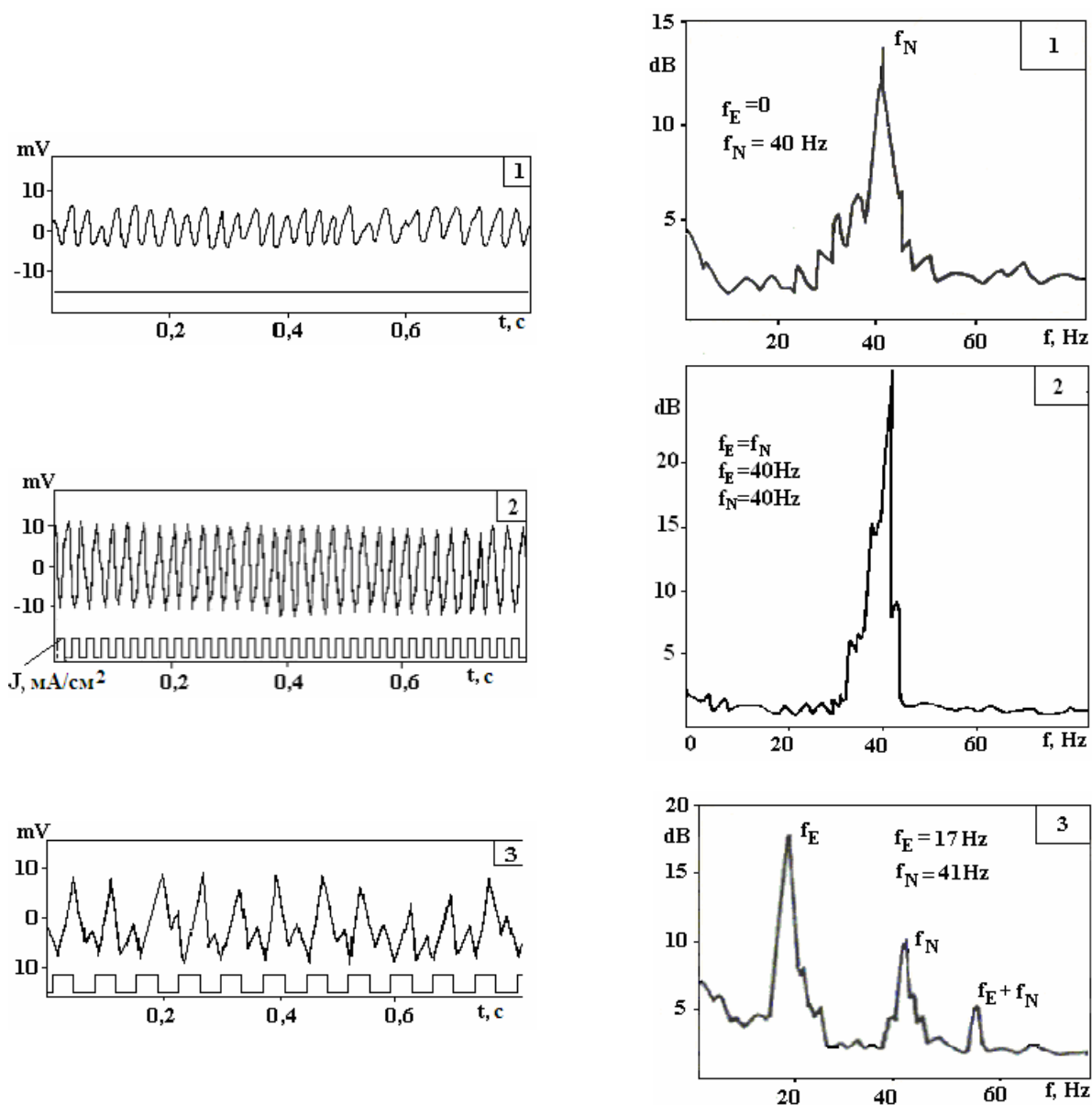
Рис. 4. Влияние периодического генерирования электролизных пузырьков на распределение коэффициента давления на поверхности цилиндра: 1 — непрерывное, 2 — периодическое генерирование микропузырьков ($\varphi_E=+30^\circ$)

При локальном периодическом возмущении пограничных слоев с обеих сторон цилиндра путем поочередной подачи электрических импульсов на электроды, расположенные симметрично в его передней части, наблюдаются различные режимы влияния внешних возмущений на процессы формирования и отрыва вихрей за цилиндром. На рис. 5 представлены в виде примеров диаграммы изменения во времени давления на поверхности цилиндра (рис. 5,а) и соответствующие им амплитудно-частотные спектры (рис. 5,б). В диаграммах выделяется режим синхронизации частоты отрыва вихрей с частотой вынужденных возмущений пограничного слоя. В сравнении с поперечным обтеканием цилиндра без наложения возмущений (рис. 5,а, диаграмма 1, рис. 5,б, спектр 1) при установлении ре-

жима синхронизации наблюдается устойчивая частота отрыва вихрей, а амплитуда колебания давления резко увеличивается и практически не изменяется во времени (рис. 5,а, диаграмма 2, рис. 5,б, спектр 2). В режиме синхронизации максимальное значение амплитуды колебания давления обнаружено при равенстве частоты вынужденных возмущений и натуральной частоты отрыва вихрей ($f_E=f_N$).

При частотах генерирования электролизных пузырьков в пограничные слои цилиндра, отличающихся от частот f_S режима синхронизации, в диаграммах $p(t)$ (рис. 5,а, диаграммы 3, 4) и спектрах (рис. 5,б, спектры 3, 4) выделяются как натуральная частота отрыва вихрей f_N , так и частота вынужденных возмущений f_E . При этом, как следует из анализа диаграмм 3 и 4, происходит наложение этих пульсаций с той лишь разницей, что для $f_E < f_S$ (диаграмма 3) доминирующей является частота f_E , а для $f_E > f_S$ (диаграмма 4) – колебания с частотой f_N . Одновременно в спектре пульсаций при $f_E < f_S$ (рис. 5,б, спектр 3) можно заметить колебания с частотой f_E+f_N . Аналогичные пульсации выделены и в [24] при применении для динамического управления метода крутильных колебаний цилиндра.

На рис. 6 представлено влияние плотности тока на пределы области, при которых устанавливается режим синхронизации частот отрыва вихрей и вынужденных возмущений пограничного слоя. Возникновение режима синхронизации происходит при достижении критического значения плотности $J=J_C$, которое зависит от числа Рейнольдса, диаметра цилиндра, шероховатости и других факторов. В частности, для принятых в работе условий ($d=22$ мм, $Re=0,72 \cdot 10^5$, полированная поверхность электродов) критическая плотность электрического тока равна 11 мА/см². При увеличении плотности тока область синхронизации расширяется, а при $J > 73$ мА/см² стабилизируется между значениями частот $f_{\min}=f_E/f_N=0,68$ и $f_{\max}=f_E/f_N=1/43$.



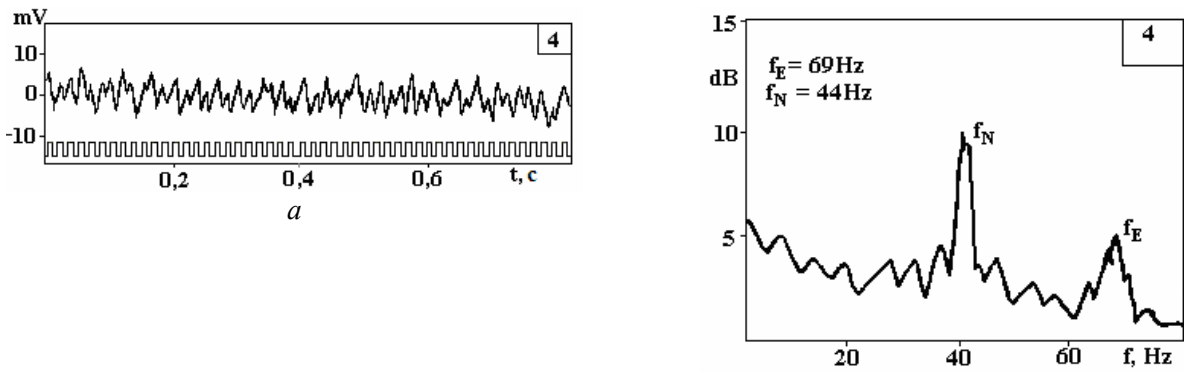


Рис. 5. Диаграммы изменения во времени давления на поверхности цилиндра (а) и соответствующие амплитудно-частотные спектры (б). $\varphi_2=140^\circ$. По ординате – произвольный масштаб

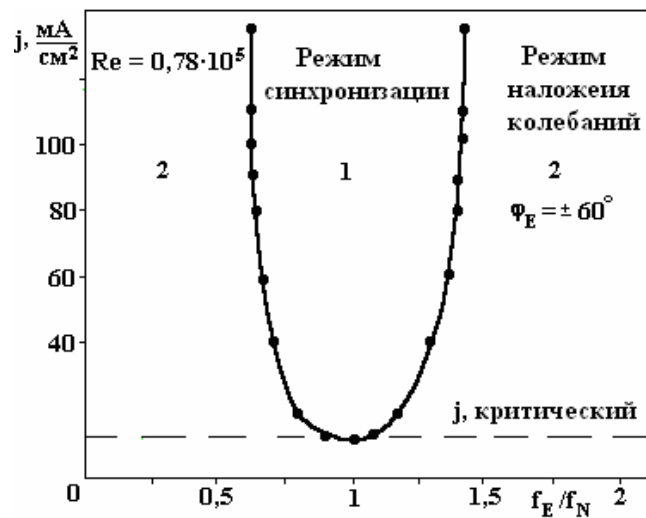


Рис. 6. Влияние плотности электрического тока на область синхронизации частот. $\varphi_E=\pm 60^\circ$

Влияние периодического возмущения пограничного слоя цилиндра электролизными пузырьками на его гидродинамическое сопротивление можно оценить из анализа зависимости среднего значения коэффициента донного давления C_{Pb} от частоты прямоугольных импульсов электрического тока f_E , представленной на рис. 7. В функции $C_{Pb}(f_E/f_N)$ выделяются четыре зоны изменения давления в донной части цилиндра под воздействием микропузырьков. В первой зоне ($0 < f_E/f_N < 0,07$) сопротивление цилиндра практически не отличается от значения, наблюдаемого в режиме с непрерывным асимметричным возмущением пограничного слоя при одинаковой плотности тока. В интервалах $0,15 < f_E/f_N < f_{min}$ и $f_E/f_N > f_{max}$, из-за замедленной реакции восстановления точки отрыва ламинарного пограничного слоя на исчезновение возмущения, C_{Pb} соответственно возрастает до 0,62 и 0,58 при плотности тока $J=100 \text{ mA/cm}^2$.

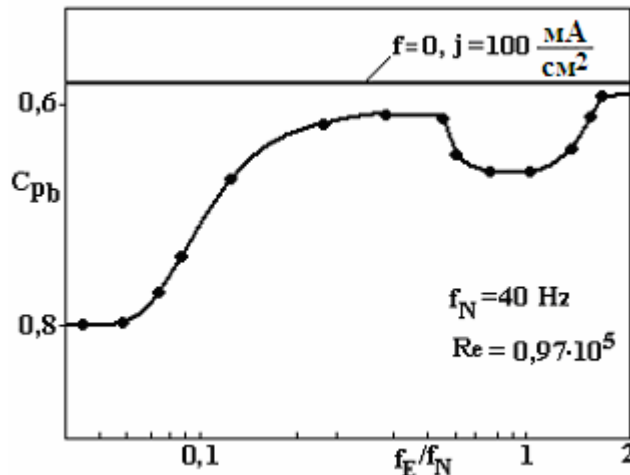


Рис. 7. Влияние частоты генерирования электролизных пузырей на коэффициент донного давления. $\varphi_2=180^\circ$

Отдельный случай в зависимости $C_{Pb}(f_E/f_N)$ представляет зона $f_{min} < f_E/f_N < f_{max}$, которая соответствует режиму синхронизации. В этой зоне сопротивление цилиндра увеличивается и достигает максимального значения при $f_E/f_N=1$. Однако следует заметить, что, несмотря на явное снижение C_{PB} в режиме синхронизации, его значение существенно выше, чем для обтекания цилиндра с ламинарным пограничным слоем (невозмущенный режим). Из-за явления запаздывания восстановления давления на поверхности цилиндра при исчезновении возмущения точка отрыва пограничного слоя смещается вниз по потоку. И это смещение тем больше, чем выше частота возмущений. Этим можно объяснить увеличение донного давления при возрастании частоты импульсов электрического тока в областях вне режима синхронизации. В области режима синхронизации за цилиндром восстанавливается устойчивый отрыв вихрей с ярко выраженной частотой и одновременно увеличивается интенсивность этих вихрей. Это приводит к увеличению ширины вихревой дорожки и к некоторому смещению вверх по потоку точки отрыва пограничного слоя. Такое поведение точки отрыва пограничного слоя явно влияет и на сопротивление цилиндра в данной области изменения частоты импульсов электрического тока. В этом контексте метод управления течением около цилиндра периодическим генерированием микропузырьков в его пограничный слой имеет некоторые общие черты с методом крутильных колебаний цилиндра [9].

Эффект динамического управления течением около цилиндра микропузырьками на подъемную силу цилиндра является существенным в области низких частот ($f_E/f_N < 0,07$), когда смена ламинарного и турбулентного режимов на разных сторонах цилиндра происходит с частотой вынужденных возмущений и при максимальной амплитуде смещения точки отрыва пограничного слоя. В этой области частот амплитуда колебания подъемной силы может в 2–3 раза превысить сопротивление цилиндра.

Выводы

Приводится анализ некоторых особенностей метода динамического управления течением около цилиндра путем периодического генерирования электролизных пузырей в его пограничный слой. Получены следующие основные результаты:

- в области низких частот ($f_E/f_N < 0,07$) периодическое локальное генерирование микропузырьков как на одной, так и на обеих сторонах цилиндра приводит к переходу режима течения в пограничном слое из ламинарного в турбулентный режим в фазе приложения импульса и восстановлению ламинарного режима при исчезновении возмущения. Обнаружено явление замедленной реакции пограничного слоя на исчезновение возмущения;
- в области частот $f_E/f_N < 0,07$ при генерировании микропузырьков на одной стороне цилиндра асимметричный профиль распределения давления сохраняется и в фазе исчезновения возмущений;
- выявлен режим синхронизации частоты генерирования электролизных пузырей с частотой отрыва вихрей. С увеличением плотности тока расширяется область частот установления этого режима;
- в режиме синхронизации сопротивление цилиндра увеличивается и достигает максимального значения при $f_E/f_N=1$;
- в области $f_E/f_N < 0,07$ амплитуда колебаний подъемной силы в 2–3 раза выше, чем сопротивление цилиндра.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Gad-el-Hak M.* Flow control, Applied Mechanics Review. 1989. V. 42. P. 261–293.
2. *Wetzel T.G., Simpson R.* Effects of fin and jet vortex generators on the cross flow // Journal of Aircraft, 1998. V. 35. No. 3. P. 370–379.
3. *Березентьев М.Ю., Гувернюк С.В., Зубин М.А., Зубков А.Ф., Мосин А.Ф.* Визуализация дозвукового обтекания цилиндрических тел с вихревыми ячейками // Аэромеханика и газовая динамика. 2001. №.1. С. 11–17.
4. *Sun M., Hamadani H.* Separation control by alternating tangential blowing/suction at multiple slots, AIAA // Journal, 2001. V. 39. No. 4. P. 735–737.
5. *Waka R., Yoshino F.* The forced reattachment of the separated shear laser of a circular cylinder with tangential blowing, Trans. JASME, 1994. B. V. 53. No. 490. P. 1704–1708.
6. *Bologa M.K., Paukov Ju.N., Kuchuk F.V.* The effect of the electric current on the cavitation flow a system of bodies, Modelling, Simulation and Control, B, AMSE Press. 1986. V. 6. No. 4. P. 37–50.
7. *Watanabe H., Hara A., Onuma S.* Effects of a few small air bubbles on the performance of circular cylinder at critical flow range in water // Journal Fluid Engineering. 1990. V. 112. P. 67–73.

8. Kimura T., Tsutahara M., Wang Z. Wake of rotating circular cylinder. AIAA Journal. 1991. V. 30. No. 2. P. 555–556.
9. Stansby P.K. The locking – on of vortex shedding due to the cross-stream vibration of circular cylinders in uniform and shear flows // Journal of Fluid Mechanics. 1976. V. 74. P. 641–665.
10. Bar-Saver A. Separation control on an airfoil by periodic forcing. AIAA Journal. 1989. V. 27. P. 820–821.
11. Ito S., Tanaka E., Yamashita S., Experiments on vortex shedding of circular cylinder in oscillating flows (sinusoidally oscillating flows). Trans. JSME. 1994. V. 60. No. 572. P. 1118–1124.
12. Hasio F.B., Shyu J.Y. Influence of internal acoustic excitation upon flow passing a circular cylinder // Journal of Fluids and Structures. 1991. V. 5. P. 427–442.
13. Biringen S. Active control of transition by periodic suction-blowing // Physics of Fluids. 1984. V. 27. No. 6. P. 1345–1347.
14. Ladd D.M., Hedricks E.W. Active control of 2-D instability wakes on an axisymmetric body // Experimental Fluids. 1988.
15. Fujisawa N., Kawaji Y. Active control of vortex shedding from circular cylinder by rotary cylinder oscillations, Trans. JSME. 1995. C. V.61. No. 585. P. 1832–1836.
16. Khan M.J., Ahmed A. Subharmonic and harmonic forced response of the wake of a circular cylinder // AIAA Journal. V. 31. No.1. P. 208–209.
17. Bera J-C., Comite-Bellot G., Sunyach M. Controle par jet pulse du decollement d'une couche limite turbulente, C.R. Acad. Sci.Paris, t. 326, Serie II b, 1998. P. 859–865.
18. Frowcs Williams J.E. The active control of vortex shedding, Journal of Fluids and Structures. 1989. No. 3. P. 115–122.
19. Park D.S., Ladd D.M., Hendricks. Feedback control of von Karman vortex shedding behind a circular cylinder at low Reynolds numbers // Phys. Fluids. 1994. V. 6. No. 7. P. 2390–2405.
20. Болога М.К., Кучук Т.В., Пауков Ю. Гидродинамика и теплоотдача тандема цилиндров при турбулизации пограничного слоя цилиндра, установленного выше по потоку. Энергетика, Литва, 1992. В. 1. С. 44–56.
21. Zhan-Geng G. Warmeuberung bei freier Konvektion unter Einfluss von elektrolitisch erzeugten Wasserstoffblsen, Dis. Dok. Ing., Fak. Verfahrenstreden Univ., Stuttgart, 1992, P. 114.
22. Cuciuc T., Bologa M. Influența perturbării asimetrice a stratului limită asupra curgerii în jurul unui cilindru, Lucrările conferinței naționale de termotehnică, Ediția X, Sibiu, 2000. P. 13–18.
23. Kamiya N., Susuki S., Nakamura M., Yoshinaga T. Some practical aspects of the burst of laminar separation bubbles, ICAS Proc., 1980, 12th Congres Intern.Counc. Aeron. Sci., Munich, 1980, S1., P. 417–428.
24. Williams D.R. Symmetry relations for nonlinear pressure interactions on oscillating cylinders // Physics of Fluids. 1998. V. 10. No. 6. P. 1243–1245.

Поступила 05.09.06

Summary

Peculiarities of dynamical control in a open loop system with the boundary layer by means of periodical generation of microbubbles of flow around cylinder are presented. Experiments were carried out in the range $Re = (0,3-1,2)10^5$. It is shown that at this method the results remain the same as in the case of continuous microbubbles generation but energy consumption is two times smaller. Results can be accounted for delayed reaction of boundary layer separation on perturbances stopping. Lock-in modes of shedding separation frequency f_N and frequency of forced oscillations f_E and imposition of these frequencies are discovered. Maximum values of amplitude of resistance oscillation and lift are located in the range of low frequencies ($f_E/f_N < 0,07$).