

*О. Андреев, Ю. Колесников*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ОБТЕКАНИЯ ПРОВОДЯЩЕГО ЦИЛИНДРА В ОСЕВОМ ОДНОРОДНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ**

*O. Andreev, Yu. Kolesnikov*

*Institute of Physics, University of Latvia, Salaspils-1, LV-2169, Latvia*

### **EXPERIMENTAL FLOW AROUND A CONDUCTING CYLINDER IN AN AXIAL HOMOGENEOUS MAGNETIC FIELD**

The results of an experimental study of transversal flow around conducting cylinder by liquid metal eutectic alloy InGaSn at the presence of homogeneous magnetic field up to 1.35 T directed along cylinder axis are presented. Velocity and spectrum measurements in the cylinder wake were used to define the flow around instability. It has been found that the critical Reynolds number (according to the breakdown of bound vortices behind cylinder) increases 40-fold at the strong field compared with the usual case without magnetic field. Measurements of cylinder drag force to a flow in a strong magnetic field have been shown that its drag coefficient decreases 3 fold at the MHD interaction parameter growth. Physical aspects of the phenomena are discussed.

**Введение.** Число работ, посвященных экспериментальному исследованию влияния поперечного магнитного поля на обтекание цилиндра конечной длины и, в частности, на нестационарные колебания в следе за ним, невелико [1–7]. Большая часть работ в основном относится к случаю ориентации оси цилиндра перпендикулярно направлению поля, поскольку такая ориентация обнаруживает ряд эффектов, связанных с тенденцией перехода течения вокруг цилиндра к двумерному в плоскости, перпендикулярной полю [4]. В этой работе показано, что наличие данной тенденции приводит с ростом магнитного поля к трехмерности обтекания цилиндра, которая выражается в формировании М-образной структуры течения в плоскости, перпендикулярной полю, имеющих максимальные скорости (из-за индуцированной течением разности потенциалов) в окрестности торцов цилиндра. В данном случае с ростом параметра МГД взаимодействия сопротивление цилиндра потоку жидкости значительно увеличивается [7]. В работе [5], выполненной на прозрачном электролите, изучалось подавление магнитным полем отрывающихся от цилиндра вихрей не только с поверхности, но и в следе.

Работы для ориентации магнитного поля параллельно оси цилиндра весьма малочисленны, так как предполагалось, что наличие поля такой ориентации не оказывает существенного влияния на свойства первоначально (в отсутствие поля) квазидвухмерного течения вокруг цилиндра. Однако, ранее [8] было экспериментально показано, что в достаточно сильном магнитном поле в следе за круглым цилиндром с осью, параллельной полю, обтекание становится существенно однородным вдоль магнитного поля и приобретает свойства, присущие течениям с двумерной структурой турбулентности. В частности, было показано, что образование тонких гартмановских слоев толщиной порядка  $Ha^{-1}$  на стенках, ограничивающих длину цилиндра, обеспечивает формирование двух-

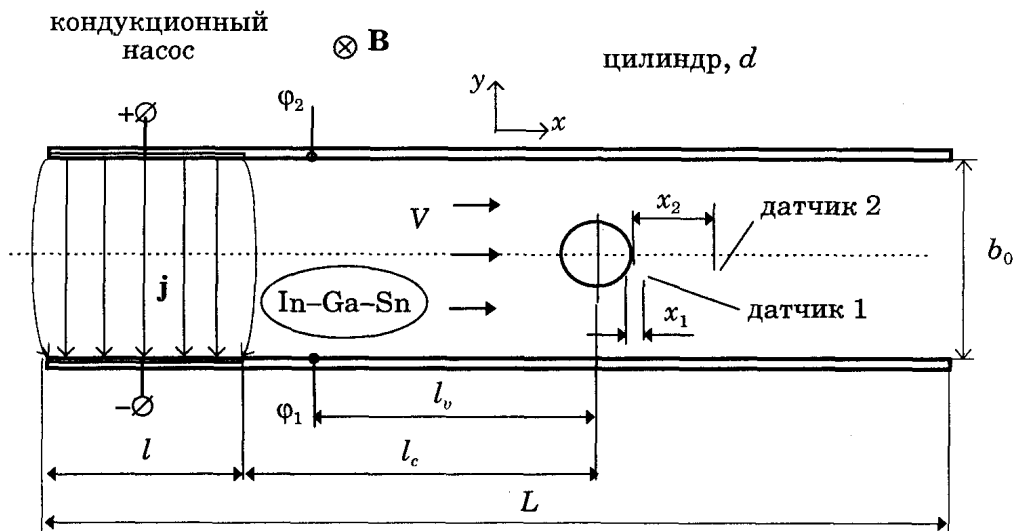


Рис. 1. Схема эксперимента.

мерных возмущений в потоке и их сохранение на значительных расстояниях от цилиндра. В более ранней работе [3] было обнаружено, что при фиксированном числе Рейнольдса и при достижении определенного значения числа Гартмана имеет место резкое увеличение интенсивности пульсаций скорости за цилиндром, связанное с упомянутой двухмеризацией его обтекания.

Приведенные ниже результаты исследований показывают, что при обтекании цилиндра, ориентированного вдоль магнитного поля, наличие на стенках, перпендикулярных полю, гартмановского трения влияет на характеристики обтекания цилиндра, в частности, задерживает отрыв присоединенных вихрей и не препятствует развитию неустойчивости параллельных полю сдвиговых слоев толщиной порядка  $Na^{-1/2}$ , охватывающих цилиндр и зону присоединенных вихрей. Сопротивление цилиндра потоку жидкости при этом значительно уменьшается.

**1. Экспериментальная установка и методы измерений.** Эксперименты проводили в прямолинейном непроводящем канале квадратного сечения  $h \times b_0 = 40 \times 40$  мм и длиной  $L = 550$  мм (рис. 1). В боковые стенки начального участка канала заподлицо были установлены медные электроды высотой 40 мм и длиной  $l = 90$  мм, с помощью которых через рабочую жидкость пропускали постоянный электрический ток  $I$  от стабилизированного источника питания. В качестве рабочей жидкости использовали эвтектический сплав In-Ga-Sn. Движение в канале создавали электромагнитной силой  $F_{эм} = \mathbf{j} \times \mathbf{B}$ , порождаемой взаимодействием вертикального магнитного поля  $B$  и поперечной компоненты электрического тока  $j_y$ .

Вниз по потоку на расстоянии  $l_c = 380$  мм от насоса помещали круглый медный цилиндр диаметром  $d = 10$  мм и длиной  $h = 40$  мм, ось которого параллельна магнитному полю (рис. 1). В ближнем следе за цилиндром

дром были установлены два двухэлектродных кондукционных датчика скорости, с помощью которых измеряли поперечную компоненту скорости и определяли наступление неустойчивости обтекания цилиндра. Один датчик располагался непосредственно в кормовой части цилиндра на расстоянии 1 мм от его поверхности, а другой – на расстоянии 15 мм вниз по потоку. Электроды датчиков длиной 2,5 мм, изготовленные из медной изолированной проволоки диаметром 0,3 мм, смонтированы на верхней крышке канала. Расстояние между электродами обоих датчиков  $\Delta x$  составляло 1 мм. Размеры датчиков были достаточно малы и не возмущали течение в следе за цилиндром. Измерения обоими датчиками производилось одновременно.

Среднерасходную скорость  $V$  в канале вычисляли как отношение измеренной разности потенциалов  $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$  между боковыми стенками канала к ширине канала  $b_0$  и значению индукции магнитного поля по формуле

$$V = \frac{1}{B} \frac{\Delta\phi}{b_0}.$$

Электроды для измерения  $\Delta\phi$ , изготовленные из медной проволоки диаметром 0,5 мм в лаковой изоляции, располагались на расстоянии  $l_v = 15$  мм вверх по потоку от цилиндра. Чувствительные концы электродов, имеющие электрический контакт с жидким металлом, размещали на полувысоте боковых стенок канала, параллельных полю (рис. 1). Сигнал датчика измеряли вольтметром постоянного тока В2-36. Погрешность измерения среднерасходной скорости указанным методом при  $Na > 25$  не превышала 3 %. Одновременно со среднерасходной скоростью  $V$  в той же плоскости измеряли максимальную скорость течения  $V_{\max}$  на середине ширины канала с помощью двухэлектродного кондукционного датчика (на рис. 1 не показан), измерительные электроды которого были расположены на одной линии с электродами, измеряющими среднерасходную скорость течения. Зависимость  $V_{\max}$  от среднерасходной скорости для различных значений индукции магнитного поля приведена на рис. 2. Как видно из графика  $V_{\max}/V = 1,4$  сохраняется в широком диапазоне значений индукции магнитного поля, а его среднеквадратическое отклонение не превышает 0,6 %. В дальнейшем в качестве характерной принималась среднерасходная скорость  $V$ .

При анализе экспериментальных данных использовали следующие основные параметры: число Рейнольдса  $Re = Vd/\nu$ , число Гартмана  $Na = Bd(\sigma/\rho\nu)^{1/2}$  и параметр МГД взаимодействия  $N = d(\sigma B^2/\rho V)^{1/2}$ , где  $\sigma$ ,  $\rho$  и  $\nu$  – электрическая проводимость, плотность и кинематическая вязкость жидкости, соответственно.

**2. Результаты и обсуждение.** При обтекании цилиндра, ось которого ориентирована вдоль однородного магнитного поля, возникают два масштаба неоднородности поля скорости в плоскости, перпендикулярной полю. Один масштаб определяется диаметром цилиндра  $d$  (поперечным размером пространственной неоднородности поля скорости и ближнего следа за ним), другой – толщиной сдвигового слоя  $l_s \sim Na^{-1/2}$ , параллельного полю. Этот слой образуется на поверхности цилиндра и охватывает

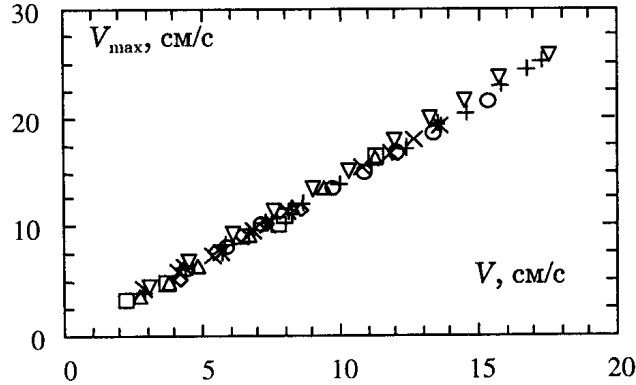


Рис. 2. Соотношение максимальной скорости набегающего потока на цилиндр (ось ординат) и среднерасходной скорости (ось абсцис), измеренных соответственно кондукционным датчиком и с помощью кондукционного расходомера при значениях индукции магнитного поля  $B$ , Тл:  $\diamond$  – 0,1;  $\square$  – 0,2;  $\Delta$  – 0,3;  $\times$  – 0,5;  $*$  – 0,7;  $\circ$  – 1,0;  $+$  – 1,2;  $\nabla$  – 1,4.

зону присоединенных вихрей вниз по потоку, поэтому неустойчивость сдвигового слоя  $l_s$  или отрыв присоединенных вихрей будет зависеть от соотношения инерционных и вязких сил в этих масштабах.

Так как при фиксированном размере течения  $h$  вдоль магнитного поля масштаб неоднородности поля скорости  $d$  в сильном поле много больше ширины сдвигового слоя  $l_s$ , диссипация энергии в присоединенных вихрях за счет их гартмановского трения на стенках, перпендикулярных полю, более значительна, чем вязкая диссипация в сдвиговом слое  $l_s$ . Это обстоятельство с ростом числа Рейнольдса в первую очередь приводит к неустойчивости сдвигового слоя  $l_s$ , а затем к неустойчивости зоны присоединенных вихрей за цилиндром и отрыву этих вихрей. Критерием устойчивости зоны присоединенных вихрей с характерным масштабом  $d$  является параметр  $Rh = (d/h)^2 Re/Na$  [9].

Интенсивности поперечных пульсаций скорости за цилиндром, измеренные при  $B = 0,7$  Тл на расстояниях  $x_1 = 1$  и  $x_2 = 15$  мм вниз по потоку от поверхности цилиндра, представлены в безразмерном виде на рис. 3. Действительно, в диапазоне значений числа  $Re < Re_{cr1} = 831$  обтекание цилиндра является устойчивым и оба датчика как вблизи, так и вдали от него показывают нулевое значение интенсивности пульсаций скорости. В диапазоне  $Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$  дальний датчик регистрирует переменную составляющую скорости, интенсивность которой возрастает с увеличением числа Рейнольдса, тогда как датчик, расположенный непосредственно за цилиндром, по-прежнему показывает нулевое значение интенсивности пульсаций скорости. Отсутствие сигнала на первом датчике и наличие сигнала на втором датчике свидетельствует об отсутствии отрыва присоединенных вихрей за цилиндром и появлении возмущений, вызванных неустойчивостью сдвигового слоя  $l_s$ . Такая картина течения сохраняется вплоть до значения  $Re = Re_{cr2}$ . При  $Re \geq Re_{cr2} = 1005$

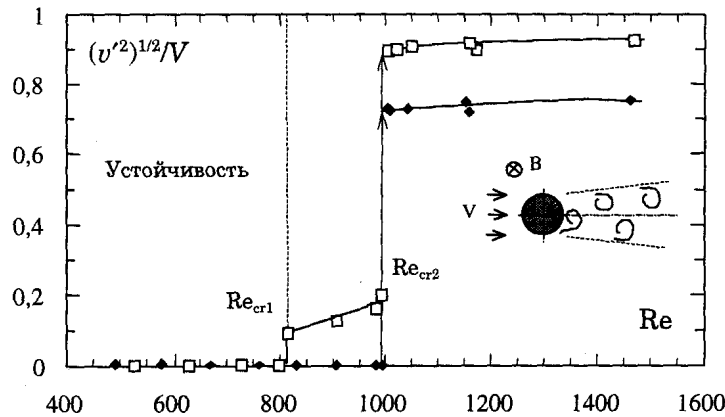


Рис. 3. Интенсивность поперечных пульсаций скорости в следе за цилиндром при индукции магнитного поля  $B = 0,7$  Тл;  $\square$  – датчик 1;  $\blacklozenge$  – датчик 2.  $Re_{cr1} = 831$ ,  $Re_{cr2} = 1005$ .

оба датчика регистрируют резкий рост интенсивности пульсаций скорости, что свидетельствует о наступлении отрыва присоединенных вихрей за цилиндром. Обращает на себя внимание тот факт, что значение  $Re_{cr2}$  при  $B = 0,7$  Тл в 20 раз превышает критическое число Рейнольдса, соответствующее отрыву присоединенных вихрей за цилиндром в обычной гидродинамике. Такая значительная “задержка” отрыва присоединенных вихрей является результатом действия гартмановского трения в этих вихрях на стенках канала, перпендикулярных магнитному полю. Аналогичные измерения были выполнены также при  $B = 1,4$  Тл. В этом случае  $Re_{cr2}$  достигал значения 2193, что приблизительно в 40 раз превышает критическое число Рейнольдса в обычной гидродинамике. Параметр  $Rh_{cr2} = (d/h)^2 Re_{cr2} / Na$  принимает значения 0,23 при  $B = 0,7$  Тл и 0,24 при  $B = 1,35$  Тл.

При дальнейшем увеличении числа Рейнольдса,  $Re_{cr2} < Re < 1500$ , оба датчика регистрируют слабое возрастание относительной интенсивности пульсации скорости (рис. 3), однако отношение их среднеквадратичных значений, измеренных датчиками 2 и 1, выходит на постоянное значение  $v'_2/v'_1 = 1,4$  вплоть до значения  $Re = 3500$  (рис. 4).

Описанный сценарий развития неустойчивости согласуется с изменением частоты  $f$  пульсаций скорости, измеренной датчиком 2. На рис. 5 представлены зависимости числа Струхала

$$S = \frac{fd}{V}$$

от числа Рейнольдса для трех значений числа Гартмана ( $B = 0,7, 1,0$  и  $1,4$  Тл).

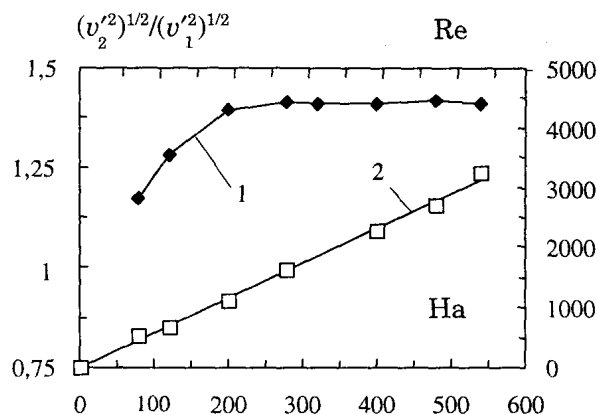


Рис. 4. Отношение интенсивностей поперечных пульсаций скорости, измеренных двумя датчиками на расстояниях 15 и 1 мм от цилиндра (кривая 1), и зависимость числа Рейнольдса, определенного по осредненной скорости набегающего потока и диаметру цилиндра (кривая 2) от числа Гартмана ( $Re = 5,78Ha$ ) при  $I/B = 25$  А/Тл.

В диапазоне  $Re_{cr1} < Re < Re_{cr2}$  для каждого значения  $Ha$  наблюдается резкое уменьшение числа Струхала. Начальные участки кривых со значениями  $S > 0,2$  свидетельствуют о мелкомасштабности вихрей за цилиндром. При  $Re \geq Re_{cr2}$  число Струхала принимает постоянное значение 0,19, что несколько меньше его предельного значения  $S = 0,21$ , типичного для отрыва присоединенных вихрей при обтекания цилиндра в отсутствие магнитного поля [10]. Такое различие объясняется дополнительным влиянием гартмановского трения на размер и скорость распространения оторвавшихся вихрей, что согласуется с упомянутым выше увеличением значения  $Re_{cr2}$  с ростом числа Гартмана.

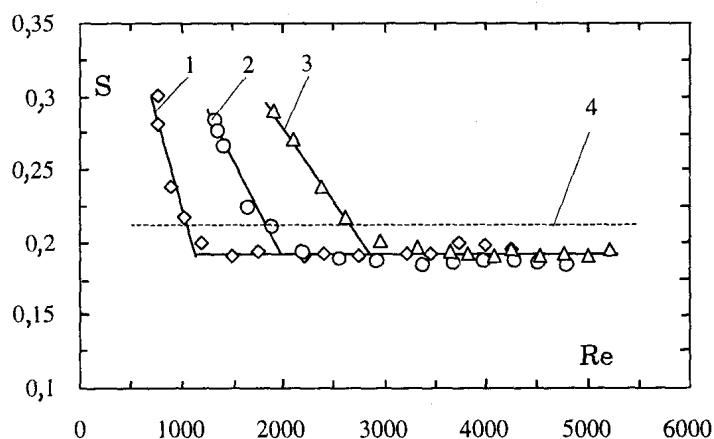


Рис. 5. Зависимость чисел Струхала в следе за цилиндром от числа Рейнольдса при трех значениях магнитного поля. 1 -  $Ha = 280$ , 2 - 400, 3 - 560; 4 - асимптотическое значение числа Струхала в отсутствие магнитного поля [10].

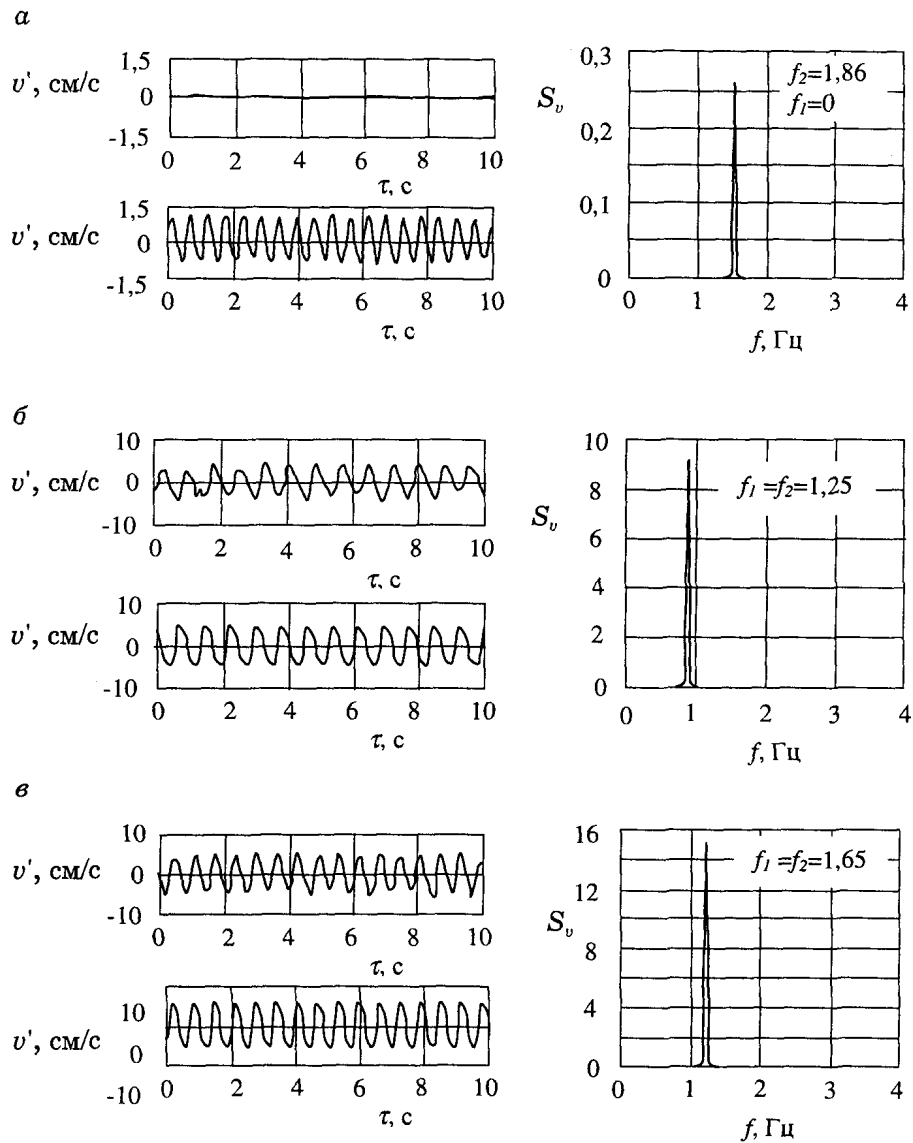


Рис. 6. Осциллограммы и спектральные плотности энергии поперечных пульсаций скорости, измеренные за цилиндр датчиками 1 и 2 при  $Na = 280$ . а -  $Re = 0,98 Re_{cr2}$ , б -  $Re = Re_{cr2}$ , в -  $Re = 1,2 Re_{cr2}$ .

Осциллограммы пульсаций скорости на обоих датчиках и соответствующие им спектральные плотности энергии при  $B = 0,7$  Тл показаны на рис. 6. Если вначале (рис. 6, а)  $Re = 0,98 Re_{cr2}$ , частота пульсаций скорости  $v'_2$  на втором датчике равна  $f_2 = 1,86$  Гц ( $v'_1 = 0$ ,  $f_1 = 0$ ), что соответствует неустойчивости сдвигового слоя  $l_s$ , то при увеличении числа Рейнольдса на 2 % (рис. 6, б)  $Re = Re_{cr2}$ , оба датчика регистрируют в полтора раза меньшую частоту пульсаций скорости  $f_1 = f_2 = 1,25$  Гц, что соответствует отрыву присоединенных вихрей от цилиндра. Дальнейшее увеличение  $Re$  ведет к росту значения частоты пропорционально скорости набегающего потока на цилиндр (рис. 6, в).

Чтобы выяснить причины этого явления рассмотрим результаты эксперимента по измерению коэффициента сопротивления цилиндра потоку жидкости. При обтекании проводящего цилиндра, торцы которого расположены на перпендикулярных полю стенках, и ориентированного вдоль магнитного поля, течение вокруг цилиндра в сильном поле имеет двухмерный характер за исключением гартмановских слоев на упомянутых стенках. В этом случае отсутствуют условия для перетекания жидкости вдоль поля и условия для замыкания индуцированного электрического тока в плоскости, перпендикулярной полю. Замыкание электрических токов происходит лишь в плоскости сечения канала, параллельной магнитному полю, через пограничный слой на цилиндре (и частично через цилиндр), параллельный полю, и гартмановские слои. Интегральная электромагнитная сила, вызванная электрическими токами, протекающими через цилиндр, равна нулю и коэффициент сопротивления цилиндра можно определить из соотношения

$$C_x = \frac{F/hd}{\rho V^2/2},$$

где  $F$  – интегральная сила сопротивления цилиндра потоку жидкости.

В экспериментах силу  $F$  определяли по углу отклонения цилиндра потоком жидкости. Цилиндр крепили вертикально на жестком стержне диаметром 3 мм, изготовленном из нержавеющей стали, и погружали в канал через отверстие в его верхней крышке. Стержень крепили к упругой пластине из нержавеющей стали толщиной 0,3 мм. Под действием набегающего потока цилиндр отклонялся от вертикального положения на угол, ограниченный жесткостью пластины, которую подбирали таким образом, чтобы во всем диапазоне параметров эксперимента отклонение цилиндра от вертикали было мало, т. е. не изменяло гидродинамику поперечного обтекания цилиндра, и в то же время обеспечивало достаточную чувствительность измерения его угла отклонения. В экспериментах максимальное значение угла отклонения цилиндра  $\alpha$  не превышало  $0,86^\circ$ .

Угол  $\alpha$  измеряли преобразователем Холла с размерами  $3 \times 3 \times 0,6$  мм, прикрепленного к державке цилиндра. В нейтральном положении цилиндра плоскость чувствительного элемента преобразователя была расположена вертикально, т. е. вдоль линии магнитного поля. Преобразователь имел чувствительность  $k_H = 472$  мВ/Тл при номинальном токе управления  $j_H = 0,08$  А. При известных фиксированных значениях  $B$  и  $j_H$  малые значения угла отклонения цилиндра определялись как

$$\alpha \approx \sin \alpha = \frac{\varphi_H}{k_H B j_H},$$

где  $\varphi_H$  – значение разности электрического потенциала. Для определения зависимости между углом отклонения цилиндра от вертикали и приложенным к нему моментом силы  $F$  производили предварительную тарировку преобразователя Холла с помощью набора грузов массой от 1 до 10 г, которые располагали на конце специального горизонтального стержня, жестко связанного с осью крепления цилиндра. Под весом гру-



за цилиндр отклонялся от вертикального положения, приходя в статическое состояние. По правилу равновесия моментов вычисляли эквивалентную силу, действующую на цилиндр, которая могла вызвать такое же его отклонение потоком жидкости. В экспериментах разность потенциала  $\varphi_H$  изменяли в пределах от 56,6 до 793 мкВ при магнитных полях от 0,1 до 1,4 Тл и измеряли цифровым вольтметром В2-36 с разрешением 0,1 мкВ.

Для подавления колебаний цилиндра, возникающих при отрыве вихрей в режиме его неустойчивого обтекания, в экспериментах использовали МГД демпфер. Он представлял собой горизонтальную пластину размером  $20 \times 40$  мм, изготовленную из стеклотекстолита, покрытого медной фольгой толщиной 0,1 мм, и погруженную в прямоугольную емкость, расположенную на верхней крышке канала и наполненную эвтектическим сплавом In-Ga-Sn. Платину с помощью жесткого стержня крепили к державке цилиндра так, чтобы горизонтальным колебаниям цилиндра соответствовали вертикальные колебания пластины. Размеры емкости подбирали таким образом, чтобы горизонтальное перетекание металла в емкости, вызванное колебаниями пластины, подавлялось индуцированной в нем электромагнитной силой. С ростом магнитного поля индуцированный электрический ток в металле возрастал и эффективность демпфера увеличивалась. В экспериментах колебания цилиндра практически подавлялись в использованном диапазоне значений магнитного поля.

На рис. 7 представлены результаты измерений зависимости коэффициента сопротивления  $C_x$  от параметра МГД взаимодействия в диапазоне индукции магнитного поля от 0,2 до 1,35 Тл, отнесенные к его значению  $C_{x0}$  при поле  $B = 0,05$  Тл. При малых числах Гартмана и достаточно больших числах Рейнольдса ( $0,4 < N < 10$ ) коэффициент сопротивления близок к единице. В данном интервале значений  $N$  инерционные силы доминируют над гартмановскими силами трения в присоединенных

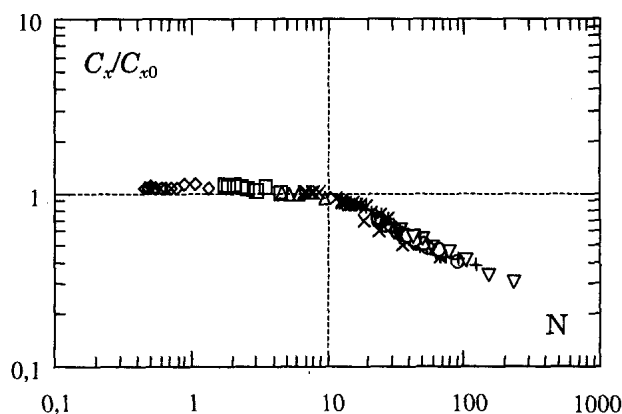


Рис. 7. Зависимость коэффициента сопротивления цилиндра от параметра МГД взаимодействия при числах На:  $\diamond$  - 40;  $\square$  - 80;  $\Delta$  - 120;  $\times$  - 200;  $\circ$  - 400;  $+$  - 480;  $\nabla$  - 560.

вихрях и не препятствуют их отрыву. По коэффициенту сопротивления в данном диапазоне значений  $N$  наблюдается аналогия с обычным обтеканием цилиндра в отсутствие магнитного поля.

С ростом числа Стюарта,  $N \geq 10$ , имеет место подавление отрыва присоединенных вихрей. Выше было показано, что магнитное поле за счет гартмановского трения существенно увеличивает значение  $Re_{cr2}$  (начало отрыва присоединенных вихрей за цилиндром). Наличие присоединенных вихрей при больших  $Re < Re_{cr2}$  образует с ростом параметра МГД взаимодействия  $N$  вытянутую вдоль течения удобообтекаемую комбинацию “цилиндр–присоединенные вихри”, обтекание которой может приводить к уменьшению силы сопротивления цилиндра  $F$ . Действительно, показанный на рис. 7 график демонстрирует снижение коэффициента сопротивления цилиндра в 3 раза при  $N = 200$ .

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б., Щербинин Э. В. Экспериментальное исследование магнитогидродинамического следа за круглым цилиндром // Магнит. гидродинамика. – 1968. – № 2. – С. 45–48. (*Kolesnikov Yu. B., Tsinober A. B., Shcherbinin E. V. Experimental study of the magnetohydrodynamic wake behind a circular cylinder // Magnetohydrodynamics. – 1968. – Vol. 4, No. 2. – P. 31–33.*)
2. Кит Л. Г., Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б., Штерн П. Г. Применение кондукционного анемометра при исследовании МГД-следа за телом // Магнит. гидродинамика. – 1969. – № 4. – С. 71–77. (*Kit L. G., Kolesnikov Yu. B., Tsinober A. B., Shtern P. G. Application of a conduction anemometer for the investigation of an MHD wake // Magnetohydrodynamics. – 1969. – Vol. 5, No. 4. – P. 71–77.*)
3. Кит Л. Г., Турунтаев С. В., Цинобер А. Б. Исследование воздействия магнитного поля на возмущения в следе за цилиндрами с помощью кондукционного анемометра // Магнит. гидродинамика. – 1970. – № 3. – С. 35–40. (*Kit L. G., Turuntaev S. V., Tsinober A. B., Shtern P. G. Investigation with a conduction anemometer of the effect of a magnetic field on disturbances in the wake of a cylinder // Magnetohydrodynamics. – 1970. – Vol. 6, No. 3. – P. 331–335.*)
4. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б. О трехмерности течения при МГД обтекании цилиндра конечной длины // Магнит. гидродинамика. – 1971. – № 2. – С. 144–146. (*Kolesnikov Yu. B., Tsinober A. B. Three-dimensional magnetohydrodynamics flow past a cylinder of finite length // Magnetohydrodynamics. – 1971. – Vol. 7, No. 2. – P. 271–273.*)
5. Брановер Г. Г., Гельфгат Ю. М., Турунтаев С. В., Цинобер А. Б. Влияние поперечного магнитного поля на возмущения скорости за круглым цилиндром, обтекаемым электролитом // Магнит. гидродинамика. – 1969. – № 3. – С. 63–68. (*Branover G. G., Gel'fgat Yu. M., Turuntaev S. V., Tsinober A. B. Effect of a transverse magnetic field on velocity perturbations behind a circular cylinder swept by a electrolyte // Magnetohydrodynamics. – 1969. – Vol. 5, No. 3. – P. 41–46.*)
6. Hunt J. C. R., Shercliff J. A. Magnetohydrodynamics at high Hartmann number // Annual Rev. of Fluid Mech. – 1971. – Vol. 3. – P. 37–62.
7. Брановер Г. Г., Цинобер А. Б. Магнитная гидродинамика несжимаемых сред. – М., 1970. – 380 с.
8. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б. Двухмерное турбулентное течение за круглым цилиндром // Магнит. гидродинамика. – 1972. – № 3. – С. 23–31. (*Kolesnikov Yu. B., Tsinober A. B. A two-dimensional turbulent behind a round cylinder // Magnetohydrodynamics. – 1972. – Vol. 8, No. 3. – P. 223–231.*)
9. Andreev O., Kolesnikov Yu. Instability of vortical structures with external MHD friction // Proceed. 2nd Intern. Conf.: Energy Transfer in Magnetohydrodynamic Flow, Aussois, France, 1994. – Vol. 1. – P. 289–295.
10. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. – М., 1969. – 742 с.