

О. В. Андреев, Ю. Б. Колесников

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА С ПОМОЩЬЮ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

O. Andreev, Yu. Kolesnikov

Institute of Physics, Latvian Academy of Sciences, Salaspils-1, LV-2169, Latvia

HEAT TRANSFER PROMOTED BY CYLINDRICAL OBSTACLES IN MAGNETIC FIELD

Heat transfer in a circular closed channel with conducting cylinders placed on the inner hot wall parallel to an axial uniform strong magnetic field has been studied experimentally. The stagnant zones stretched along the magnetic field above and below the cylinders arose. Intensive large scale two-dimensional vortical structures parallel to the magnetic field were generated due to flow around these zones. It has been shown that vortical structures provided the 5–6 times increase of transverse heat transfer as compared with a case of simple channel flow. The hot wall temperature decreased more than 3 times. Local characteristics measured have been used in order to provide analysis of flow structure and redistribution of velocity and temperature fields.

Введение. Решение ряда проблем, связанных с МГД приложениями, базируется на концепции интенсификации теплопереноса за счет естественной турбулентности при больших числах Рейнольдса либо искусственной генерации возмущений вблизи нагретой стенки [1 – 4]. Одним из наиболее эффективных методов интенсификации является возбуждение крупномасштабных двухмерных вихрей с помощью проводящих вставок, расположенных в стенке канала, перпендикулярной магнитному полю [4, 5]. Над границами вставок вследствие скачка проводимости на стенке в жидкости возникает вихревая электромагнитная сила, порождающая завихренность вдоль магнитного поля. Эта завихренность в свою очередь формирует над вставками застойные зоны, которые создают в канале сильно неустойчивый неоднородный в плоскости, перпендикулярной полю, профиль средней азимутальной скорости [6]. При этом число Нуссельта становится в 4–5 раз больше, чем в случае канала без вставок.

Как показывают исследования [7], в достаточно сильном магнитном поле обтекание непроводящего цилиндра конечной длины, ориентированного перпендикулярно магнитному полю, имеет тенденцию стать двухмерным в плоскости, перпендикулярной полю. В результате в областях, примыкающих к цилиндру, вдоль магнитного поля формируются застойные зоны. Таким образом, проводящие цилиндрические тела конечной длины, находящиеся в МГД потоке, обеспечивают аналогичный механизм формирования вихревой электромагнитной силы, как и в случае проводящих вставок.

1. Экспериментальная установка и параметры эксперимента. Установка представляет собой замкнутый кольцевой канал (рис. 1а). Диаметр наружной стенки 12 см, внутренней – 5,5 см, высота канала 4,6 см. Дно и верхняя крышка канала, перпендикулярные однородному магнитному полю, были сделаны из оргстекла. Медные боковые стенки служили электродами, к ним от стабилизированного источника подводился постоянный электрический ток I в пределах 0 – 70 А. Движение

* Пер. с англ. авторов.

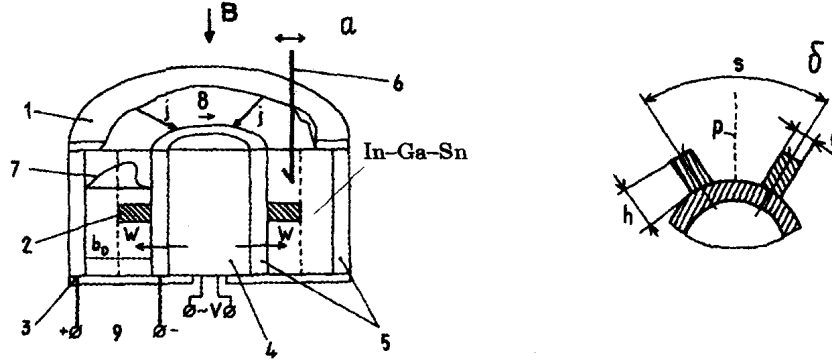


Рис. 1. Экспериментальная установка. *a*: 1 – крышка; 2 – цилиндр на нагреваемой стенке; 3 – дно; 4 – электрический нагреватель; 5 – медные стенки-электроды; 6 – датчик; 7 – профиль скорости; 8 – направление течения; 9 – к стабилизированному источнику постоянного тока; *B* – однородное магнитное поле; In-Ga-Sn – рабочая жидкость; *b*: *d* и *h* – диаметр и длина цилиндра; *p* – линия перемещения датчика; *s* – расстояние между свободными концами цилиндра.

Fig. 1. Experimental operating channel for heat transfer study in the presence of a strong magnetic field. *a*: 1 – cover; 2 – cylinder; 3 – bottom; 4 – electrical heater; 5 – copper walls-electrodes; 6 – probe; 7 – velocity profile; 8 – flow direction; 9 – to current source; *B* – homogeneous magnetic field; In-Ga-Sn – working liquid; *b*: *d* and *h* – cylinders diameter and length; *p* – line of probe travel; *s* – distance between free ends of cylinders.

жидкости возникало за счет взаимодействия радиального электрического тока с осевым вертикальным магнитным полем. Индукция магнитного поля изменялась в пределах 0,6 – 1,4 Тл. В качестве рабочей жидкости использовался эвтектический сплав In-Ga-Sn. Тепловой поток плотностью $q = 0,59 \text{ Вт/см}^2$ на поверхности внутренней стенки обеспечивался вмонтированным в нее электрическим нагревателем. Температура внешней стенки установки поддерживалась постоянной, равной 20°C , с помощью водяного термостата. Медные цилиндры диаметром $d = 5 \text{ мм}$, длиной $h = 10 \text{ мм}$ крепились одним из торцов на внутренней нагреваемой стенке на полувысоте канала.

Для представления экспериментальных данных использовались безразмерные параметры: число Рейнольдса $Re = Vb_0/\nu$ (где $V = \Delta\phi/(b_0B)$ – среднерасходная скорость, рассчитанная по разности потенциалов $\Delta\phi$ между боковыми стенками канала, b_0 – ширина канала, ν – кинематическая вязкость жидкости); число Гартмана $Ha = b_0B(\sigma/\mu)^{1/2}$ (где σ , μ – электропроводимость и динамическая вязкость жидкости); параметр $Rh = (2a/b_0)Re/Ha$ (который характеризует отношение инерционных сил $F_{ин} = 2a\rho V^2/b_0$ столба жидкости высотой $2a$ и единичной площадью основания к вязкому напряжению $\tau = V\mu/\delta_\Gamma = HaV\mu/b_0$, действующему на основание столба за счет существования гартмановского пограничного слоя толщиной $\delta_\Gamma = B^{-1}(\sigma/\mu)^{-1/2}$); число Нуссельта $Nu = \alpha b_0 \ln(R/r_0)/\lambda$ (где R и r_0 – соответственно внешний и внутренний радиусы канала, $\lambda = 39 \text{ Вт/м}\cdot\text{град}$ – теплопроводность жидкости, $\alpha = q/(T_h - T_f)$ – коэффициент теплоотдачи нагретой стенки, имеющей температуру T_h , в поток, средняя температура которого $T_f = (T_h - T_c)/2$, где T_c – температура холодной стенки).

Скорость (азимутальная и радиальная составляющие) измерялась с помощью кондукционного анемометра с двухкомпонентным датчиком. Электроды датчика были изготовлены из медной проволоки диаметром 0,33 мм, расстояние между электродами 1,5 мм. Температура жидкости измерялась термопарой медь-константан. Ее чувствительный элемент диаметром 0,3 мм находился на 5 мм выше точки измерения скорости.

Такую конструкцию совмещенного датчика скорости и температуры правомерно использовать в квазидвухмерных потоках с незначительными изменениями характеристик вдоль магнитного поля. Датчик перемещается с помощью координатной системы по радиусу канала вдоль средней линии между двумя соседними цилиндрами (рис. 1б). Все характеристики течения измерялись на полувысоте канала. Температура стенок измерялась также с помощью термопар медь-константан, спаи которых размещались в отверстиях боковых стенок. Толщина стенки между спаями термопар и жидкостью не превышала 0,1 мм. Расстояние между цилиндрами определялось безразмерным параметром

$$S = (s - d)/(b_0 - h),$$

где s – расстояние по дуге радиуса $(r_0 + h)$ между свободными концами цилиндров.

2. Результаты измерений. Получены типичные профили осредненной азимутальной скорости и температуры для трех значений безразмерного шага расположения цилиндров S при фиксированном магнитном поле и параметре Rh (рис. 2). Из рисунка видно, что максимум скорости находится в середине канала, а у горячей стенки формируется сравнительно широкая зона с неустойчивым градиентным профилем скорости. Чем чаще расположены цилиндры, тем больше дефект скорости у внутренней стенки. При $S = 1,4$ между цилиндрами формируются присоединенные вихри, именно их существованием объясняется наличие отрицательных осредненных скоростей на участке $r = 0 - 0,2$ на кривой 1. Безразмерные профили осредненной температуры, пронормированные на температуру нагретой стенки в ламинарном режиме течения, когда теплопроводность течения определяется молекулярным теплопереносом, показывают влияние турбулентной теплопроводности на диффузию тепла от нагретой стенки в поток. Температура нагретой стенки уменьшается в 2–3 раза. При этом видно, что участок $r = 0,05 - 0,4$ имеет минимальный градиент температуры, именно здесь находится зона наибольшей интенсивности вихревых структур.

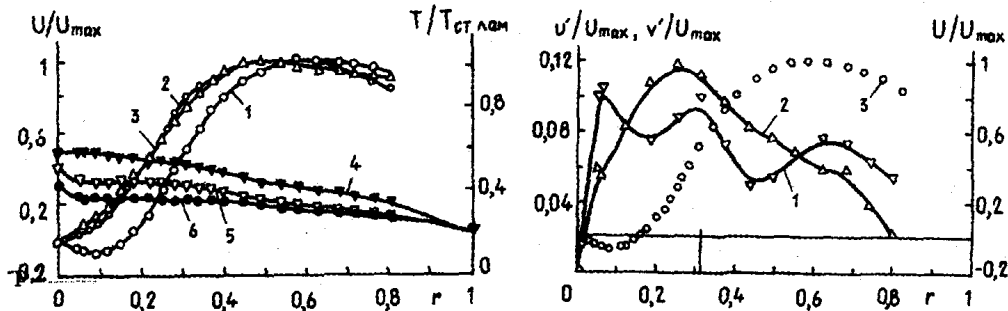


Рис. 2. Профили осредненной скорости (1 – 3) и температуры (4 – 6) при $B = 1,4$ Тл и $T_{ст.лам} = 27,3^\circ\text{C}$ (температура нагретой стенки при ламинарном режиме течения при $Rh = 42,7$): 1, 4 – $S = 1,4$; 2, 5 – $S = 4,66$; 3, 6 – $S = 9,56$; 1 – $U_{max} = 33,4$; 2 – $U_{max} = 32,6$; 3 – $U_{max} = 36,5$ см/с.

Fig. 2. Averaged velocity (1 – 3) and temperature (4 – 6) profiles at $B = 1.4$ T and $T_{ст.лам} = 27.3^\circ\text{C}$ (temperature of hot wall in laminar regime, $Rh = 42.7$): 1, 4 – $S = 1.4$; 2, 5 – $S = 4.66$; 3, 6 – $S = 9.56$; 1 – $U_{max} = 33.4$; 2 – $U_{max} = 32.6$; 3 – $U_{max} = 36.5$ cm/s.

Рис. 3. Распределение пульсаций скорости при $B = 1,4$ Тл, $S = 1,4$, $Rh = 42,7$: 1 – u'/U_{max} ; 2 – v'/U_{max} ; 3 – U/U_{max} – профиль осредненной скорости.

Fig. 3. Distributions of velocity pulsations at $B = 1.4$ T, $S = 1.4$, $Rh = 42.7$: 1 – u'/U_{max} ; 2 – v'/U_{max} ; 3 – U/U_{max} – averaged velocity profile.

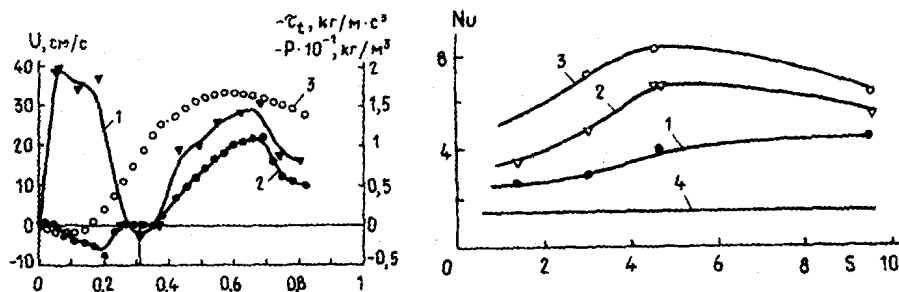


Рис. 4. Распределение: 1 - турбулентных напряжений τ_t ; 2 - порождения турбулентной энергии P ; 3 - осредненной скорости U . $B = 1,4$ Тл; $Rh = 42,7$; $S = 1,4$.

Fig. 4. Distributions of turbulent stress and energy production at $B = 1.4$ T and $Rh = 42.7$: 1 - turbulent stress τ_t ; 2 - energy production P ; 3 - averaged velocity U . $S = 1.4$.

Рис. 5. Зависимости числа Nu от параметра S при $B = 1,4$ Тл: 1 - $Rh = 42,7$; 2 - $Rh = 47,0$; 3 - $Rh = 51,5$; 4 - без цилиндров.

Fig. 5. Dependences of the Nusselt number on the step parameter S at $B = 1.4$ T: 1 - $Rh = 42.7$; 2 - $Rh = 47.0$; 3 - $Rh = 51.5$; 4 - without cylinders.

О вихревой структуре течения можно судить по распределениям интенсивностей пульсаций скорости, представленным на рис. 3. Интенсивность пульсаций достигает 12% от максимальной скорости. Судя по положению максимума интенсивности радиальной пульсации скорости, оси вихрей находятся на координате $r = 0,25 - 0,30$, а их размеры соизмеримы с шириной канала. Наличие таких крупномасштабных вихрей подтверждается наблюдениями свободной поверхности течения, выполненными при снятой верхней крышке установки. Аналогичные вихревые структуры возникают и в других двухмерных сдвиговых потоках [4, 5, 8, 9] при достаточно сильном магнитном поле.

Распределение турбулентных напряжений Рейнольдса $\tau_t = -\rho\langle u'v' \rangle$ соответствует характеру профиля осредненной скорости (рис. 4). Макси-

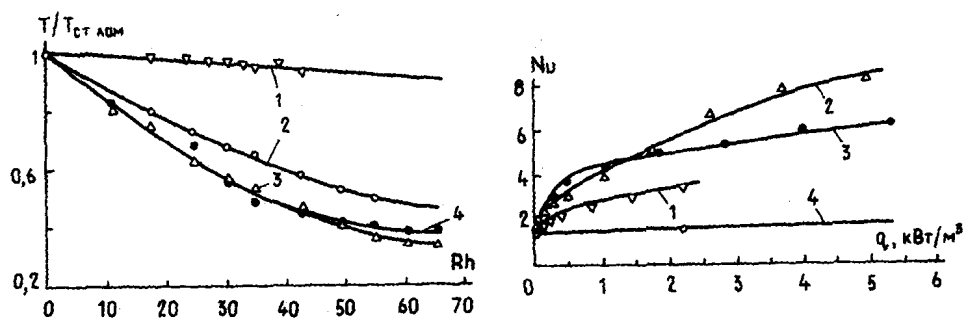


Рис. 6. Зависимости температуры нагретой стенки от параметра Rh при $B = 1,4$ Тл: 1 - без цилиндров; 2 - $S = 1,4$; 3 - $S = 4,66$; 4 - $S = 9,56$.

Fig. 6. Dependences of hot wall temperature on the Rh parameter at $B = 1.4$ T: 1 - without cylinders; 2 - $S = 1.4$; 3 - $S = 4.66$; 4 - $S = 9.56$.

Рис. 7. Зависимости числа Nu от энергии, затраченной на создание движения в экспериментальной установке при $B = 1,4$ Тл: 1 - $S = 1,4$; 2 - $S = 4,66$; 3 - $S = 9,56$; 4 - без цилиндров.

Fig. 7. Dependences of the Nusselt number on power spent to create fluid motion at $B = 1.4$ T: 1 - $S = 1.4$; 2 - $S = 4.66$; 3 - $S = 9.56$; 4 - without cylinders.

мумы турбулентных напряжений соответствуют координатам экстремумов профиля скорости, а нулевое значение – координате точки перегиба. Порождение турбулентной энергии $P = \tau_r \partial(U/r)/\partial r$, где $U(r)$ – профиль осредненной скорости, является отрицательным на участке $r = 0 - 0,25$. Именно в этой зоне крупные вихри деформируют основное течение. Воздействие этого вихревого механизма настолько существенно в данной ситуации, что профиль скорости у нагретой стенки имеет минимум или даже отрицательное значение, несмотря на то что электромагнитная сила, возникающая за счет подводимого электрического тока, в этой зоне максимальна.

На рис. 5 представлены зависимости числа Нуссельта от шага S при различных значениях Rh . Из графиков видно, что число Нуссельта достигает максимального значения при $S = 4,5 - 5$. Частое расположение цилиндров приводит, как упоминалось выше, к образованию присоединенных вихрей и, как следствие, к снижению теплопроводности. В отсутствие цилиндров мелкомасштабная турбулентность не обеспечивает достаточный теплоперенос, что подтверждает кривая 4, которая демонстрирует значение числа Нуссельта в свободном от цилиндров канале. Даже при максимальных скоростях число Nu не превышает 1,54.

Зависимости температуры нагретой стенки от параметра Rh при разных значениях S (рис. 6) свидетельствуют, что в свободном канале температура стенки уменьшается не более чем на 10% по сравнению с ее температурой при течении в ламинарном режиме (кривая 1), тогда как при оптимальном выборе количества цилиндров внутренняя стенка охлаждается на 65% (кривая 3). Уменьшение угла наклона кривых при больших значениях Rh , т. е. при больших скоростях движения, объясняется неустойчивостью крупных двухмерных вихрей и, следовательно, дроблением их масштаба. Этот эффект сильнее проявляется при более редком расположении цилиндров (кривая 4). Согласно представленной на рис. 7 зависимости числа Нуссельта от электрической мощности, затраченной на создание движения в канале, использование цилиндров позволяет получить пяти-шестикратное увеличение числа Нуссельта при фиксированном значении затрачиваемой мощности.

Заключение. Интенсивность теплопереноса существенно зависит от структуры потока и масштаба возмущений вблизи нагреваемой стенки. Без специальных мер турбулентность остается мелкомасштабной, особенно при больших числах Рейнольдса и Гартмана. Число Нуссельта при этом не превышает 1,5. Размещение вдоль течения на стенке, параллельной полю, небольших проводящих тел, занимающих от 0,04 до 0,23 % объема экспериментального канала, создает условия для генерации крупных вихрей, обеспечивающих увеличение числа Нуссельта до 8,24, что в 5,5 раз больше Nu в свободном канале при подводе одинаковой энергии, необходимой для поддержания движения жидкости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Malang S., Reinmann J., Barleon L., Müller U.* MHD work on self-cooled liquid metal blankets for fusion reactors under development in KFK // Abstr. Intern. Conf.: The 7th Beer-Sheva Seminar on MHD Flow and Turbulence. Jerusalem. – 1993. – P. 88.
2. *Barleon L., Casal V., Lenhart L.* MHD flow in liquid-metal-cooled blanket // Fusion Engng and Design. – 1991. – Vol. 14. – Aug. – P. 401 – 412.
3. *Picologlou B.F., Reed C. B.* Experimental investigation of 3-D MHD flows at high Hartmann number and interaction parameter // Proceed. IUTAM Simp.: Liquid metal MHD. – Riga, 1988. Liquid Metal Magnetohydrodynamics. – Netherlands, Kluwer Acad. Publ., 1989. – P. 71 – 77.
4. *Andreev O. V., Kolesnikov Yu. B.* Possibilities of heat transfer intensification to the MHD problems of liquid metal fusion blankets // Abstr. Intern. Conf.: The 7th Beer-Sheva Seminar on MHD Flow and Turbulence. Jerusalem. – 1993. – P. 3.

5. Андреев О. В., Колесников Ю. Б. Анизотропия процессов теплопереноса во вращающемся течении в однородном магнитном поле при неоднородной электропроводности границ // *Магнит. гидродинамика*. – 1993. – № 2. – С. 87 – 94.

6. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б. Магнитогидродинамическое течение в области скачка проводимости на стенке // *Магнит. гидродинамика*. – 1972. – № 1. – С. 70 – 74.

7. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б. О трехмерности течения при МГД обтекании цилиндра конечной длины // *Магнит. гидродинамика*. – 1971. – № 2. – С. 144 – 146.

8. Колесников Ю. Б., Цинобер А. Б. Двухмерное турбулентное течение за круглым цилиндром. 1. Осредненное течение и интенсивность пульсаций скорости // *Магнит. гидродинамика*. – 1983. – № 3. – С. 83 – 89.

9. Колесников Ю. Б. Экспериментальное исследование неустойчивости плоскопараллельного сдвигового течения в магнитном поле // *Магнит. гидродинамика*. – 1985. – № 1. – С. 60 – 66.

Поступила в редакцию 16.11.94