

---

## ТЕПЛООБМЕН В КУЭТТОВСКОМ ТЕЧЕНИИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

**Лабкович О.Н.<sup>1</sup>, Рекс А.Г., Чернобай В.А.,**  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь,  
E-mail: olji@tut.by<sup>1</sup>

**Аннотация:** В работе экспериментально исследован теплообмен магнитной жидкостью в зазоре между цилиндрами, при вращении внутреннего цилиндра. Обнаружено, что введение углеродных нанотрубок в магнитную жидкость и использование конструкции с вращающимся магнитным полем изменяет структуру течения в слое магнитной жидкости и существенно улучшает теплообмен.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, вязкая диссипация, интенсивность теплоотдачи, углеродные нанотрубки, вращающееся магнитное поле, тепловой поток, структура течения, вихри Тейлора.

## THE HEAT EXCHANGE OF MAGNETIC FLUID IN THE COUETTE FLOW

**Chernobai V.A., Reks A.G., Labkovich O.N.<sup>1</sup>**  
Belarusian National Technical University,  
Minsk, Belarus, E-mail: olji@tut.by<sup>1</sup>

**Abstract:** In work heat exchange of magnetic fluid in a gap between cylinders is experimentally investigated, at rotation of the internal cylinder. It is revealed that introduction of carbon nanotubes to magnetic fluid and use of a design with the rotating magnetic field change the flow structure in the magnetic fluid layer and significantly improve heat exchange.

**Key words:** magnetic fluid, viscous dissipation, intensity of a heat exchange, carbon nanotubes, the rotating magnetic field, a thermal stream, the flow structure, Taylor's vortices.



РЕКС Александр Георгиевич, доктор физико-математических наук, - профессор кафедры ЮНЕСКО "Энергосбережение и возобновляемые источники энергии". Защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по теме "Механика магнитоуправляемых магнитожидкостных систем со свободной поверхностью" в 2007 г. Имеет 160 научных публикаций, в том числе 11 авторских свидетельств и патентов на изобретения, 2 монографии, одна из которых издана в США.

ЧЕРНОБАЙ Владимир Алексеевич. В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по теме: «Тепловые и гидродинамические процессы в высокоскоростных магнитожидкостных уплотнениях, разработка их кон-

струкций». Имеет более 130 научных публикаций, в том числе 22 авторских свидетельств и патентов на изобретения.



Лабкович Ольга Николаевна окончила Белорусский политехнический институт в 1991 году. Имеет 30 научных публикаций, в том числе 3 статьи. В настоящее время является старшим преподавателем Белорусского национального технического университета.

С увеличением скорости вращения в куэтовском течении магнитной жидкости наблюдается рост температуры, вызванной вязкой диссипацией. С целью выявления условий теплоотвода от кольцевого слоя магнитной жидкости экспериментально изучалась теплоотдача в зазоре между цилиндрами, внутренний из которых вращался. Использовалась магнитная жидкость на основе трансформаторного масла и магнетита с намагниченностью насыщения  $70 \text{ кА/м}$  (ММт - 70). Ее теплофизические свойства при  $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и в отсутствии магнитного поля ( $H = 0$ ) соответствовали: динамический коэффициент вязкости  $\eta = 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ , плотность  $\rho = 1,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Величина радиального зазора ( $r$ ) изменялась от  $0,3$  до  $1 \text{ мм}$ , осевой размер слоя магнитной жидкости ( $l$ ) составлял  $20 \text{ мм}$ . Исследования проводились на установке, представленной на рис. 1.

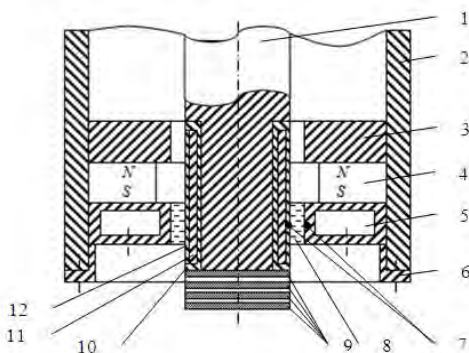


Рис. 1. Схема измерительного узла: 1 – вал, 2 – корпус, 3 – магнитопровод, 4 – постоянный магнит, 5 – наружный термостатируемый цилиндр, 6 – втулка, 7 – термопары, 8 – магнитная жидкость, 9 – токосъемники, 10 – теплоизоляционная втулка, 11 – электронагреватель, 12 – внутренний цилиндр.

Тепловой поток создавался электронагревателем 11 на теплоизолированном внутреннем вращающемся цилиндре 12 и отводился в радиальном направлении через слой магнитной жидкости 8 на внешний

термостатируемый цилиндр 5. Методика эксперимента была следующей: поддерживалась определенная разность температур поверхностей цилиндров  $T_1 - T_2$ , измеряемых термопарами 7 и изменялась скорость вращения. Одновременно с тепловыми измерениями, проводились измерения момента трения для выявления характера течения магнитной жидкости в зазоре. Передача теплоты между цилиндрами, характеризовалась суммарным коэффициентом теплоотдачи  $\alpha$ :

$$\alpha = Q/F(T_1 - T_2) \quad (1),$$

где  $Q$  – задаваемый тепловой поток,  $F$  – среднелогарифмическая поверхность, определяемая выражением:

$$F = \frac{2\pi r l}{\ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

Интенсивность теплоотдачи оценивалась числом Нуссельта (Nu):

$$Nu = 2r\alpha/\lambda \quad (3)$$

Исследовалось влияние структуры течения магнитной жидкости на теплообмен в ее слое. На рис. 2 приведена зависимость числа Нуссельта от безразмерной скорости вращения внутреннего цилиндра числа Тейлора:

$$Ta = Re(r/R_1)^{0,5}, \quad (4)$$

где  $Re = \frac{rV}{\nu}$  – число Рейнольдса,  $\nu = \eta/\rho$  – коэффициент кинематической вязкости.

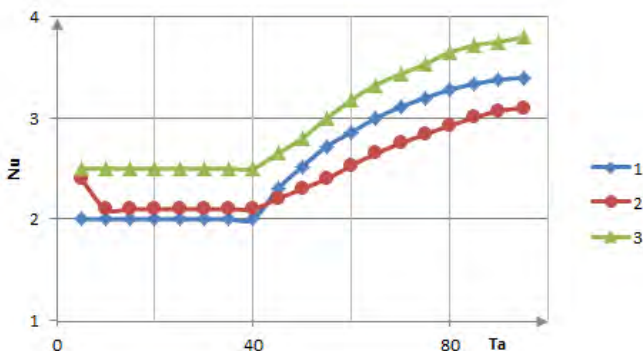


Рис. 2. Влияние скорости ( $Ta$ ) на интенсивность теплоотдачи ( $Nu$ ):

1 -  $H = 400$  кА/м ( $\vec{H} \perp \vec{v}$ ), ММТ -70;

2 -  $H = 400$  кА/м ( $\vec{H} \perp \vec{v}$ ), ММТ -70 + 0,01 % ОУНТ

3 -  $H = 120 \div 90$  кА/м ( $\vec{H} \parallel \vec{v}$ ), ММТ -70

Для однородного радиального магнитного поля в зазоре ( $\vec{H} \perp \vec{v}$ ) величиной  $H = 400$  кА/м в области течения магнитной жидкости с

---

сильным структурообразованием ( $Ta < 8$ ) и при ламинарном течении ( $8 < Ta < 41,2$ ) интенсивность теплообмена не изменялась. Основным механизмом переноса тепла являлась теплопроводность. Число Нуссельта было близким к 2 (кривая 1). После достижения критической точки перехода ламинарного течения в вихревое ( $Ta = 41,2$ ) наблюдалось резкое уменьшение разности температур  $T_1 - T_2$  в зазоре, т.е. перенос тепла в слое магнитной жидкости интенсифицировался. Возможны два механизма резкого увеличения числа Нуссельта: свободная конвекция и вынужденная конвекция. Число Рэлея не превышало значения 900 во всех экспериментах, поэтому влиянием свободной конвекции можно пренебречь [1]. Следовательно, механизмом улучшения теплообмена в зазоре является вынужденная конвекция, вызванная появлением в ламинарном течении магнитной жидкости вихрей Тейлора, что может подтверждаться резким ростом измеряемого момента трения в этой области течения.

В области вихревого течения опытные данные удовлетворительно обобщались уравнением:

$$Nu = 0,45 \cdot Ta^{0,5}$$

При определении безразмерных критериев подобия  $Nu$ ,  $Ta$  в качестве определяющей принималась средняя температура в рабочем зазоре  $T_{cp}$ .

С целью улучшения теплоотдачи в радиальном зазоре в магнитную жидкость вводились однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ), представляющие собой полые немагнитные цилиндры диаметром  $\sim 5$  нанометров и длиной  $\sim 0,1$  мм с коэффициентом теплопроводности  $\lambda$  свыше 500 Вт/м·К. При совпадении направлений теплового потока и магнитного поля ( $\vec{H} \parallel \text{grad } T$ ) максимальный рост числа Нуссельта ( $\sim 40$  %) наблюдался при небольших скоростях вращения (рис. 2, кривая 2). ОУНТ образовывали цепочки в радиальном направлении, интенсифицируя радиальный перенос тепла. С увеличением скорости цепочки ОУНТ разрушались и эффект снижался до 15 %. В области вихревого течения упругие свойства ОУНТ в потоке уменьшали теплообмен в зазоре за счет снижения интенсивности вихрей Тейлора. Исследовалось влияние магнитного поля, синхронно вращающегося с внутренним цилиндром, на теплообмен в слое магнитной жидкости. Магнитное поле создавалось постоянными магнитами, закрепленными на немагнитном внутреннем цилиндре (рис. 3).

Тангенциальное магнитное поле периодически изменялось по окружности от 120 до 90 кА/м.

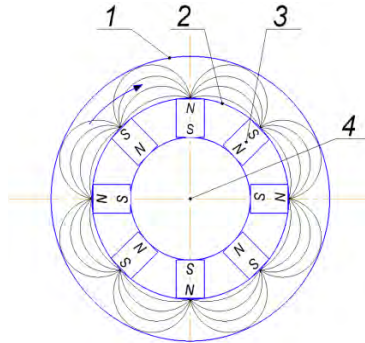


Рис.3. Схема вращающегося магнитного поля в слое магнитной жидкости  
 (1 – наружный немагнитный цилиндр, 2 – внутренний немагнитный цилиндр,  
 3 – постоянный магнит, 4 - вал)

Как видно из рис. 2 (кривая 3) интенсивность теплообмена в этом случае возрастала во всем исследуемом интервале скоростей. По-видимому, этот эффект является следствием изменения структуры течения в слое магнитной жидкости: прямолинейный профиль скорости становится более наполненным, образуется ядро потока. Кроме того, в потоке при ламинарном течении образуются микровихревые структуры, улучшающие радиальный перенос тепла [2 - 4].

Исследовался теплообмен в магнитной жидкости в постоянном магнитном поле при его радиальном градиенте ( $\text{grad}H \sim 10^5$  кА/м), направленном к центру вращения и периодически изменяющимся в тангенциальном направлении от 120 до 90 кА/м. Наличие радиального градиента магнитного поля стабилизирует ламинарное течение и в пределах эксперимента резкого роста момента трения не наблюдалось, т.е. течение оставалось ламинарным. В этом случае, теплообмен в зазоре осуществлялся за счет теплопроводности магнитной жидкости, т.е. число  $Nu$  не изменяется и его значение близкое к 2. Однако, из экспериментальных данных (рис. 4, кривая 1) видно, что с увеличением скорости число  $Nu$  растет и достигает значения 3 при  $Ta = 80$ . Вероятно, дополнительным механизмом радиального переноса тепла являлись циркуляционные зоны, возникающие в слое магнитной жидкости в областях, где магнитное поле ( $\vec{H}$ ) направлено к вектору скорости ( $\vec{V}$ ) под углом  $< 90^\circ$  [5].

Для однородного радиального магнитного поля в зазоре ( $H = 400$  кА/м) изменялось отношение осевого размера слоя магнитной жидкости  $l$  к ее радиальному размеру  $r - l/r$ .

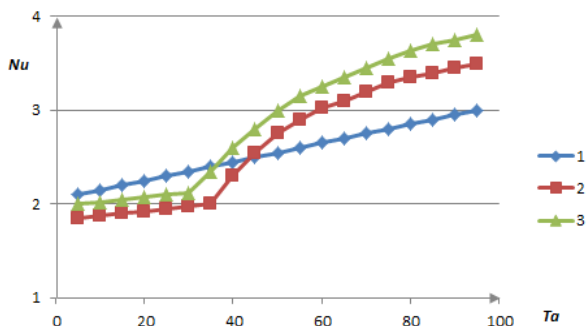


Рис. 4. Зависимость теплообмена от градиента магнитного поля и геометрических параметров зазора: 1 –  $\text{grad} \vec{H}, (\vec{H} \parallel \vec{V})$ ; 2 –  $\frac{i}{r} = 10, (\vec{H} \perp \vec{V})$ ; 3 –  $\frac{i}{r} = 5, (\vec{H} \perp \vec{V})$

Как следует из рис. 4 (кривые 2, 3) концевые эффекты существенно влияют на структуру течения и теплообмен в слое магнитной жидкости. Так при  $\frac{i}{r} = 5$  образование вихрей Тейлора происходит при  $Ta = 30$ , что приводит к резкому росту числа  $Nu$ . Существенное влияние на теплообмен в этом случае может оказать термомангнитная конвекция, так как возникают благоприятные условия для ее возникновения: наличие градиентов магнитного поля и температуры, усиливается влияние на поток свободных поверхностей магнитной жидкости [6].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Щукин В.К.** Теплообмен и гидродинамика внутренних потоков в полях массовых сил. // М.: Машиностроение, 1980. – 240.
2. **Дворчик С.Е., Рыков В.Г., Абрамович В.У.** О поведении магнитных жидкостей в однородном вращающемся магнитном поле. // Магнитная гидродинамика, 1981, № 1. – с. 137 -139.
3. **Кашевский Б.Э.** Динамика и диссипация энергии в магнитном кластере при воздействии вращающегося поля. // Магнитная гидродинамика. 1990, № 4. – с. 36 – 42.
4. **Диканский Ю.И., Гладких Д.В., Колесникова А.А.** Процессы структурообразования в магнитных коллоидах с намагниченными агрегатами во вращающемся магнитном поле. // Сборник научных трудов 16-ой Международной Плесской конференции по нанодисперсным магнитным жидкостям, ИвГЭУ, 2014, ISBN 978-5-00062-004-5. – с. 193 – 198.
5. **Баштовой В.Г., Берковский Б.М., Вислович А.Н.** Введение в термомеханику магнитных жидкостей. // М.: ИВТАН СССР, 1985. – 188.
6. **Краков М.С., Никифоров И.В.** Влияние меридионального течения и термомангнитной конвекции на характеристики магнитожидкостного уплотнения. // Журнал технической физики, 2011, том 81, вып. 12 – с. 47 – 55.