

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРОРЕОЛОГИЧЕСКИХ ЖИДКОСТЕЙ ДЛЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА В КАНАЛАХ ПЛОСКОЙ И ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ

Е. В. Коробко<sup>1</sup>, А. А. Маханек<sup>1</sup>, Н. А. Бедик<sup>1</sup>, Л. С. Ещенко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Лаборатория реофизики и макрокинетики, ГНУ “Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова”, Минск, Беларусь

<sup>2</sup> УО Белорусский государственный технологический университет, Минск, Беларусь

*Представлены результаты исследования реофизических свойств термостойкого диэлектрического управляемого теплоносителя – электрореологической жидкости на основе гидратированного оксида алюминия в форме псевдобемита. С учетом полученных экспериментальных данных, получено и обсуждается численное решение сопряженной задачи гидродинамики и теплообмена в канале плоской и цилиндрической формы теплоносителя (ЭРЖ) с кривой течения, описываемой модифицированной моделью Балкли-Гершеля. Показано, что электрореологический эффект приводит к увеличению среднего по длине канала числа Нуссельта до 17%.*

### Ключевые слова

ЭРЖ, гидродинамика, теплообмен, диссипация механической энергии в тепловую, неньютоновость, вязкость, предел текучести.

### Условные обозначения

$a$  – температуропроводность ЭРЖ,  $C_p$  – теплоемкость ЭРЖ,  $E$  – напряженность электрического поля,  $H$  – ширина канала,  $K$  – параметр консистентности,  $L$  – длина канала,  $n$  – индекс течения (параметр нелинейности в модели Балкли-Гершеля),  $P$  – давление,  $T$  – температура,  $U$  – средняя скорость на входе в канал,  $q$  – тепловой поток,  $u$ ,  $v$  – продольная (вдоль канала) и поперечная компоненты скорости,  $x$ ,  $y$  – продольная и поперечная координаты,  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи,  $\zeta$  – относительная толщина квазитвердого ядра течения ЭРЖ,  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига,  $\lambda$  – теплопроводность ЭРЖ,  $\mu$ ,  $\nu$  – кажущаяся и кинематическая вязкость ЭРЖ,  $\rho$  – плотность ЭРЖ,  $\tau$  – напряжение сдвига,  $\Theta = (T - T_0)/(T_{ст} - T_0)$  – безразмерная температура; индексы – 0 – значение параметра на входе в канал,  $w$ ,  $ст$  – значение параметра на стенке канала, или при температуре стенки, ' (штрих) – относительное (безразмерное) значение параметра.

Безразмерные комплексы:  $Re = \frac{\rho U H}{\mu_0}$ ,  $C_f = \frac{\tau_w}{\rho U^2 / 2}$ ,  $Fo = \frac{a_0 t}{H^2}$ ,  $Pe = \frac{U_0 H}{a_0}$ ,

$\Pi = \frac{\nu_0 U_0^2}{a_0 (T_{ст} - T_0)}$ ,  $Nu = \frac{2 H q_w}{\lambda_0 |\Delta T_p|}$ ,  $\Delta T_p$  – температурный напор.

### Введение

Имеющиеся модели гидродинамики [1-4] и теплообмена в узких плоских и кольцевых каналах таких сложных в реологическом отношении систем, как электрореологические жидкости (ЭРЖ), основаны на существенных допущениях относительно реологических [5-6] и теплофизических свойств этих жидкостей в

отношении зависимости этих свойств от температуры и напряженности поля. Одним из основных допущений подобных рассмотрений было пренебрежение температурной зависимостью теплофизических и реологических параметров, входящих в уравнения энергии и движения, а также пренебрежение диссипацией энергии в тепло вследствие внутреннего трения. Целью данной работы являлась разработка физико-математической модели теплообмена ЭРЖ в узком плоском и кольцевом каналах и проведение соответствующего численного моделирования влияния напряженности электрического поля на безразмерный коэффициент теплообмена. Подобное моделирование может быть полезным для оценки целесообразности применения и выработки наиболее оптимальных условий использования ЭРЖ в теплообменниках для охлаждения силового и выделяющего значительные количества тепла энергетического оборудования. Отличительной особенностью данного исследования является учет диссипации гидравлической энергии в тепло при решении тепловой задачи, а также неньютоновости ЭРЖ и зависимости коэффициентов реологической модели ЭРЖ от напряженности электрического поля и уровня температуры.

### **Экспериментальное исследование реологических свойств термостабильной ЭРЖ**

Были разработаны и исследованы образцы ЭРЖ с различными типами наполнителей на основе гидратированных оксидов алюминия переменного состава  $Al_2O_3 \cdot nH_2O$  ( $n=2.0-2.8$ ). Наполнители получали химическим осаждением из алюминий-содержащих растворов и термически обрабатывали при заданных температурах. ЭРЖ отличались количеством воды в составе наполнителя (слабо окристаллизованный псевдобемит, псевдобемит, бемит). Концентрация дисперсной фазы во всех суспензиях была 40 мас. %. Дисперсионной средой служило трансформаторное масло.

Величина предельного напряжения сдвига  $\tau_0$  принята в качестве критерия, характеризующего интенсивность электрореологического эффекта в исследуемых средах. Измерение  $\tau_0$  заключалось в создании линейно изменяющейся во времени деформации и измерении напряжения сдвига в образце, возникающего при деформации в условиях воздействия на него внешним электрическим полем при разных температурах [7]. Исследования выполнялись в режиме непрерывного деформирования при постоянной скорости изменения деформации и температуре 18 – 140 °С. Зазор в ячейке составлял 0,9 мм. Диапазон прикладываемого электрического напряжения 0 – 2500 В. Термостат состоял из двух эллиптических поверхностей, в фокусе которых находился измерительный узел прибора.

На рис. 1 показаны кривые течения одного из образцов разработанной термостабильной ЭРЖ, измеренные на ротационном вискозиметре "Реотест" при температуре 20°С и разных напряженностях электрического поля. Реологическое поведение термически стойкой ЭРЖ неплохо описывается моделью Балкли-Гершеля

$$\tau(E, T, \dot{\gamma}) = \tau_0(E, T) + K(E) \dot{\gamma}^{n(E)} \quad (1)$$

при скоростях сдвига, превышающих некоторое пороговое значение  $\dot{\gamma}_p(E)$ . Характерно заметное снижение величины касательного напряжения с ростом скорости сдвига до определенного критического значения последней и для удобства анализа кривая течения разбита на два диапазона: диапазон "низких" и "высоких" сдвиговых скоростей. Предельное напряжение сдвига для каждого значения напряженности электрического поля может быть определено классическим способом – линейной экстраполяцией кривой течения (в данном случае в полулогарифмической системе координат) до пересечения с осью ординат. Обработка полученных данных показала,

что при скоростях сдвига, меньших некоторого порогового значения  $\dot{\gamma}_{кр}(E)$ , зависимость касательного напряжения от скорости сдвига имеет вид (см. рис. 1а):

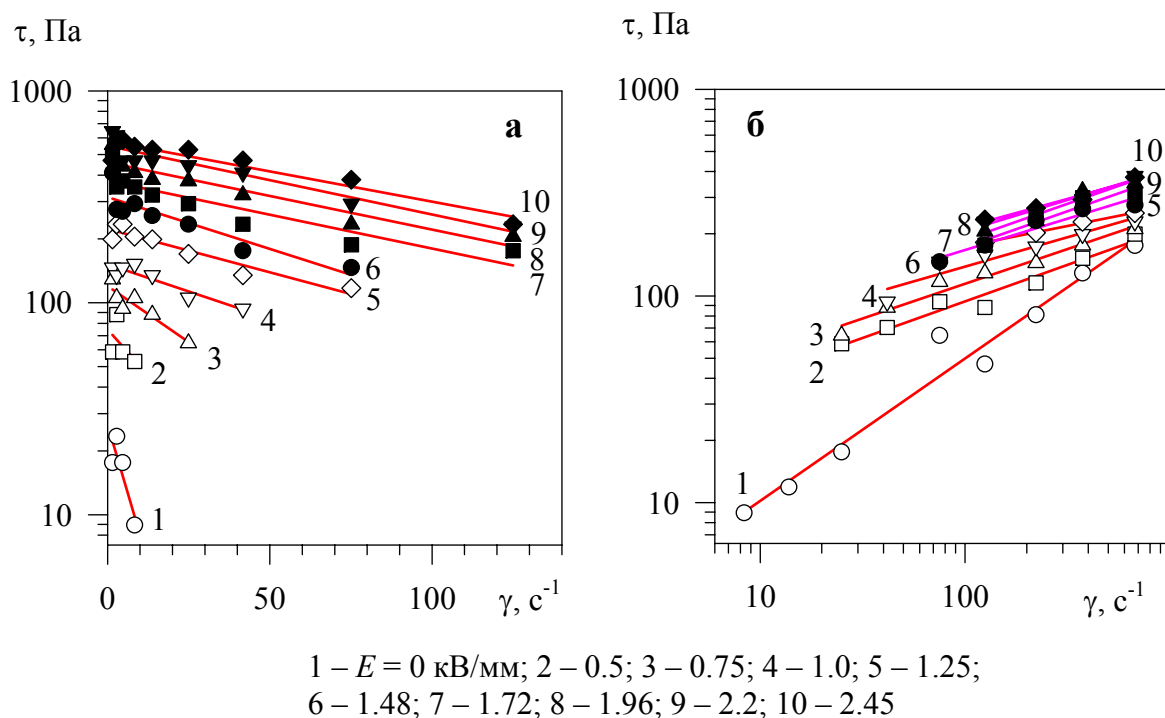


Рис. 1 – Кривые течения ЭРЖ 40% Al(OH)<sub>3</sub> в трансформаторном масле ( $T_{т.о.}=105^{\circ}\text{C}$ )

$$\tau(E, \dot{\gamma}) = \tau_0(E) e^{-\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_p(E)}, \quad (2)$$

а при скоростях сдвига, превышающих это пороговое значение, наблюдается степенная зависимость напряжения сдвига от скорости сдвига (см. рис. 1а):

$$\tau(E, \dot{\gamma}) = K(E) \dot{\gamma}^{n(E)}. \quad (3)$$

На рис. 2 – 4 показано влияние напряженности электрического поля на параметры моделей (2)-(3).

Можно констатировать наличие некоей особенности реологического поведения ЭРЖ вблизи напряженности электрического поля 1.25 кВ/мм.

Анализ результатов реологических исследований различных образцов термостойкой ЭРЖ, показывает, что нагрев изменяет предельное напряжение сдвига тех из них, в которых в качестве дисперсной фазы использовались гидратированные оксиды алюминия переменного состава. Существует оптимальное количество воды - 2,2 моль - в составе гидратированного оксида алюминия, которое обеспечивало максимальное увеличение  $\tau_0$  в поле при различных температурах. С ростом температуры также увеличивались значения токов проводимости всех исследуемых образцов. Установлено, что при повышении температуры до  $100^{\circ}\text{C}$ , электрореологический эффект при одинаковых значениях напряженности электрического поля существенно усиливался по сравнению с комнатной температурой. При этом также наблюдалось увеличение величины электрического тока, что может быть связано с ростом поверхностной проводимости частиц при повышении температуры. При увеличении температуры свыше  $140^{\circ}\text{C}$ , данный эффект в основном пропал, что связано с чрезмерным увеличением тока проводимости, препятствующего проявлению электрореологического эффекта.

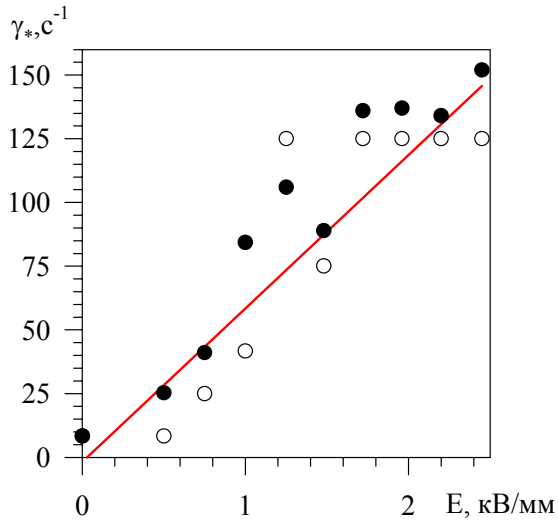


Рис. 2 – Влияние поля на критическое (полые символы) и релаксационное (сплошные символы) значения скорости сдвига

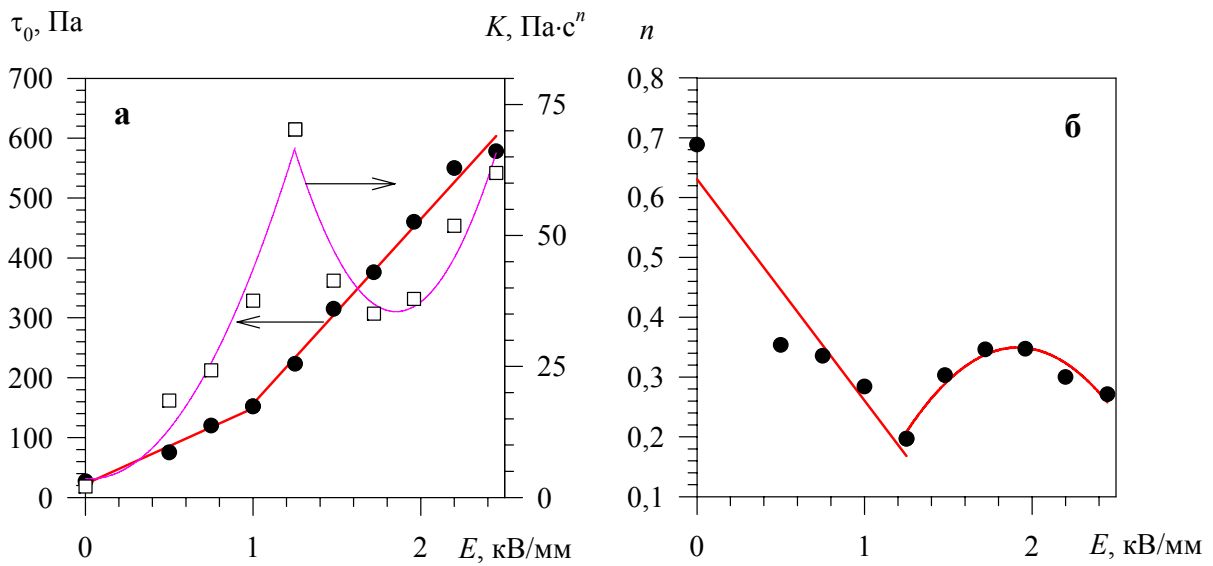
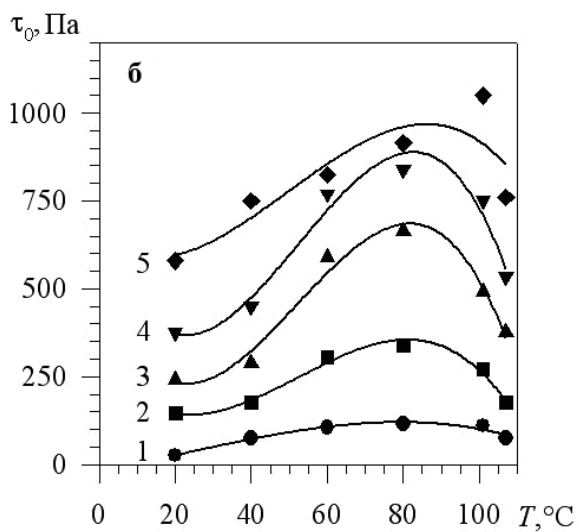


Рис. 3 – Влияние поля на параметры модели (69)



1 –  $E = 0.5$  кВ/мм, 2 – 1.0,  
3 – 1.5, 4 – 2.0, 5 – 2.5

Рис. 4 – Влияние поля и температуры на параметры модели Балкли-Гершеля (1)

## 1. Постановка задачи численного моделирования гидродинамики и теплообмена ЭРЖ в узком канале

Узость канала течения и значительное превышение длины канала над шириной его зазора позволяют существенно упростить систему уравнений движения за счет отбрасывания слагаемых, содержащих вторые пространственные производные от поперечной составляющей скорости. Практически приемлемым допущением является также предположение о не сжимаемости ЭРЖ и ограничение рассмотрением лишь ламинарного режима течения этой жидкости. В результате уравнения движения сводятся к одному уравнению, аналогичному уравнению пограничного слоя. В данном приближении давление оказывается зависящим лишь от продольной координаты, оставаясь постоянным вдоль поперечного сечения канала.

В декартовой и цилиндрической системе координат система безразмерных уравнений сохранения массы и импульса, а также уравнения реологического состояния принимают вид:

$$\frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{1}{y'^q} \frac{\partial}{\partial y'} (y'^q v') = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\text{Re}}{v'} \left( u'^* \frac{\partial u'}{\partial x'} + v'^* \frac{\partial u'}{\partial y'} \right) \approx -\frac{1}{\mu'} \frac{\partial P'}{\partial x'} + \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2} \quad (5)$$

$$u'^* = u' - \frac{2}{\text{Re}} \frac{\partial v'}{\partial x'}, \quad v'^* = v' - \frac{1}{\text{Re}} \left( \frac{\partial v'}{\partial y'} + \frac{v' q}{y'^q} \right) \quad (6)$$

$$\mu' = \frac{\tau_{00}}{\tau_{0ref}} \frac{\tau'_0}{\dot{\gamma}'} + K' \dot{\gamma}'^n. \quad (7)$$

$$\dot{\gamma}' = \frac{H}{U_0} \dot{\gamma} = \sqrt{\left[ \left( \frac{\partial u'}{\partial x'} \right)^2 + \left( \frac{\partial v'}{\partial y'} \right)^2 + \left( \frac{\partial u'}{\partial y'} + \frac{\partial v'}{\partial x'} \right)^2 \right]} \quad (8)$$

$$\tau'_0 = \frac{\tau_0}{\tau_{00}}, \quad K' = (\tau_{0ref}^*)^{n-1} \delta^n \mu'_p, \quad \tau_{0ref} = \frac{\mu_0 U_0}{H}, \quad \mu'_p = \frac{\mu_p}{\mu_0}, \quad (9)$$

$$u' = \frac{u}{U_0}, \quad v' = \frac{v}{U_0}, \quad x' = \frac{x}{H}, \quad y' = \frac{y}{H}, \quad P' = \frac{P \text{Re}}{\rho U_0^2}, \quad v' = \frac{v}{v_0}, \quad \rho' = \frac{\rho}{\rho_0}$$

В (9) параметр  $\delta$  - величина, численно равная 1, но имеющая размерность  $\text{Па}^{1/n-1}$ , введенная с целью соблюдения правила размерностей. Для жидкости Шведова-Бингама и ньютоновской жидкости  $n=1$ . В последнем случае имеем также  $\tau'_0 = 0$ .

Обезразмерное уравнение энергии, учитывающее конвективный теплоперенос вдоль канала и диссипацию гидравлической энергии в тепло имеет вид

$$\frac{\partial \Theta}{\partial \text{Fo}} + \text{Pe} \frac{\partial \Theta}{\partial x'} u' = \frac{\partial}{\partial x'} \left( a \frac{\partial \Theta}{\partial x'} \right) + \frac{1}{y'^q} \frac{\partial}{\partial y'} \left( y'^q a \frac{\partial \Theta}{\partial y'} \right) + \Phi.$$

Данное выражение записано в приближении равенства нулю производной плотности ЭРЖ по пространственным координатам. Входящая в него безразмерные функция диссипативных источников тепла описывается следующим выражением:

$$\Phi = \Pi v \dot{\gamma}'^2.$$

Хотя нас в конечном итоге интересует стационарное решение уравнений гидродинамики и теплообмена, мы записываем уравнение энергии в нестационарном виде в связи с тем, что поиск стационарного решения в рамках данной работы осуществлялся методом установления.

В качестве начального условия выбираем условие однородности температуры в канале и ее равенства температуре жидкости на входе в канал. На границе отвода тепла от его источника задаемся условием первого или второго рода. Таким образом, постановку краевой задачи теплообмена в канале с ЭРЖ завершает следующее множество выражений:

$$\Theta(Fo = 0, x', y') = 0,$$

$$\Theta(Fo > 0, x' = 0, y') = 0,$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial x'} \right|_{x'=L/H} = 0,$$

$$\Theta(Fo > 0, x' > 0, y' = 0) = 1,$$

$$\left. \frac{\partial \Theta}{\partial y'} \right|_{y'=1} = 0.$$

Локальное и интегральное значения числа Нуссельта определяем согласно выражениям

$$Nu = -2 \left. \frac{\partial \Theta}{\partial y'} \right|_{y'=0}, \quad \langle Nu \rangle = -\frac{2H}{L} \int_0^{L/H} Nu(x') dx'$$

## 2. Численное моделирование и его результаты

Ниже представлены результаты теплогидравлического расчета теплообменника с ЭРЖ в качестве теплоносителя при задании граничных условий первого и второго рода на охлаждаемой стенке канала, когда вторая стенка теплоизолирована (условия T1 и N1, соответственно), а также результаты моделирования для случая охлаждения обеих стенок с одинаковой интенсивностью и при одинаковых условиях теплообмена (T2 и N2). Ширина зазора принималась равной 1 мм. Ширина пластины составляла 100 мм (эквивалентный срединный диаметр кольцевого зазора примерно 30 мм). Длина канала варьировалась от 0.25 м до 1 м. Температура ЭРЖ на входе в канал принималась равной 20°C. Теплофизические свойства ЭРЖ задавались следующими. Коэффициент теплопроводности – 0.12 Вт/(м·К), теплоемкость – 2000 Дж/(кг·К), плотность – 1200

кг/м<sup>3</sup>. В качестве определяющего (задаваемого) был принят массовый расход ЭРЖ через канал. В результате решения гидродинамической задачи (совместно с решением тепловой) определялся перепад давления вдоль канала, необходимый для обеспечения заданной массовой скорости течения ЭРЖ.

Влияние напряженности электрического поля на коэффициент трения при течении ЭРЖ сквозь плоскую щель или кольцевой канал показано на рис.5, полученном при задании массового расхода 0.01 кг/с. Варианту Т соответствовала температура стенки 50°С, варианту Н – тепловой поток через стенку, равный 1 кВт/м<sup>2</sup>. Эффективную вязкость в выражении для числа Рейнольдса определяли как отношение среднего по длине канала касательного напряжения у стенки-источника тепла к средней скорости сдвига у этой стенки.

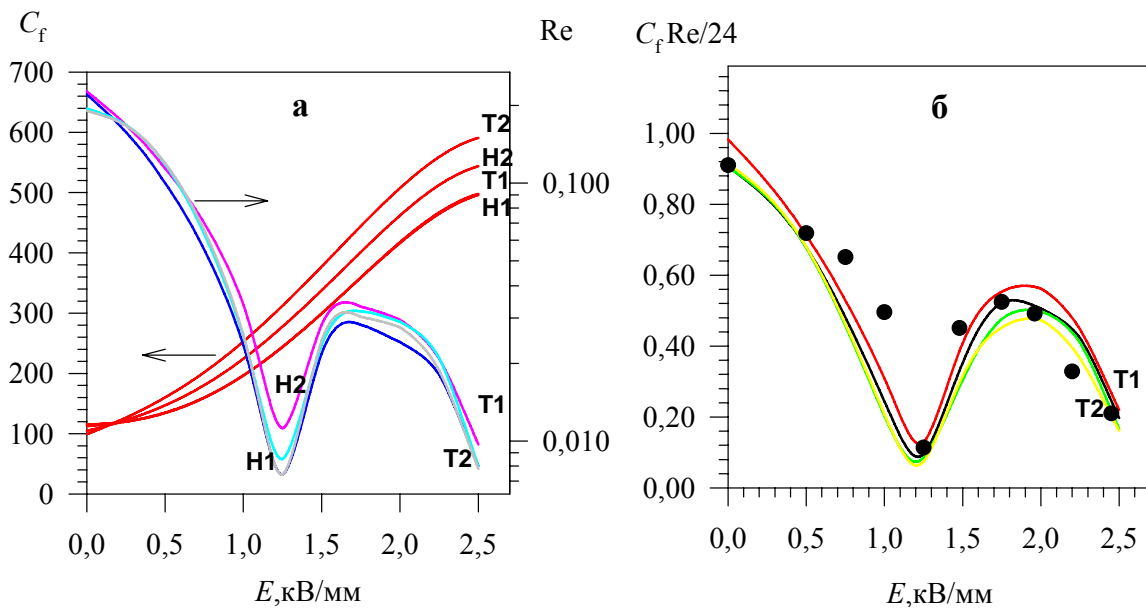


Рис. 5 – Влияние напряженности электрического поля на коэффициент трения

Символами на рис. 5б показана зависимость от напряженности электрического поля комплекса

$$f(E) = a \frac{K_{E=2.5} - K(E)}{K_{E=2.5} - K_{E=0}} + b,$$

где  $a = 0.7$ ,  $b = 0.21$ .

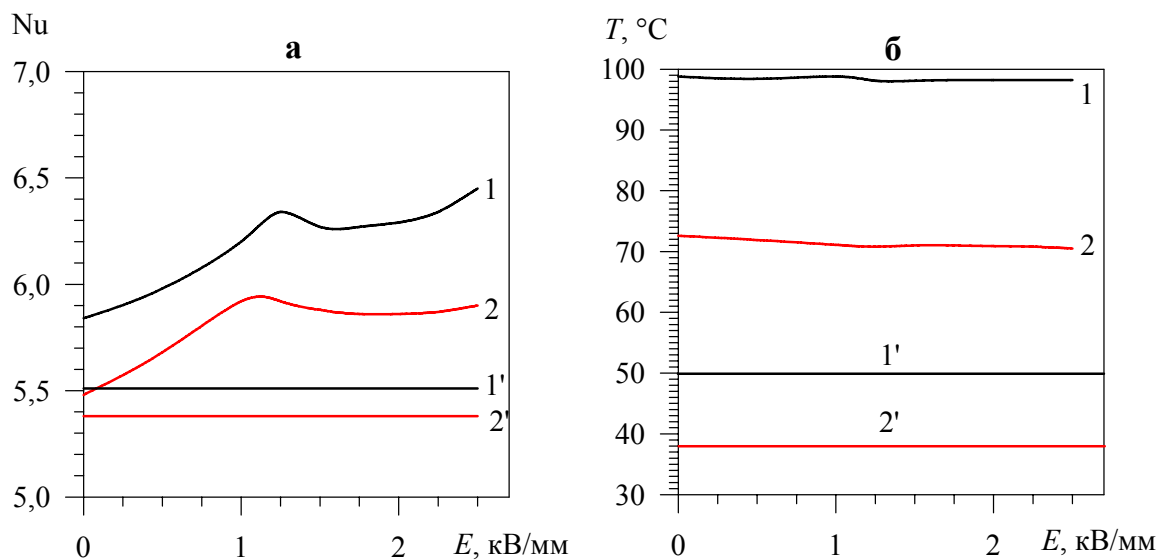
Несмотря на заметное влияние на величину коэффициента трения типа граничных условий на стенках канала, наблюдается неплохое соответствие между комплексами

$$\frac{C_f(E) \text{Re}(E)}{24} \text{ и } f(E), \text{ т.е.}$$

$$C_f(E) \approx \frac{24}{\text{Re}(E)} f(E).$$

Представляет интерес оценка влияния напряженности электрического поля на среднее и местное (на выходе из канала) значение числа Нуссельта, а также тепловой режим работы теплообменника в сравнении с наиболее распространенным

теплоносителем – водой. С этой целью был выполнен теплогидравлический расчет при граничном условии Н1, массовом расходе теплоносителя (ЭРЖ или воды) 0.01 кг/с и величине отводимого от стенки канала теплового потока 10 кВт/м<sup>2</sup>. Результат такой оценки показан на рис. 6.



1 – Среднее значение числа Нуссельта по длине канала (а), или максимальная температура стенки (б); 2 – локальное значение числа Нуссельта на выходе из канала (а), или средняя температура по длине канала. Без штриха – ЭРЖ, со штрихом вода

Рис. 6 – Влияние напряженности электрического поля на безразмерный коэффициент теплоотдачи (а) и температуру стенки (б)

Эффект от наложения электрического поля составляет 10,4% для среднего значения числа Нуссельта и 7,7% для местного числа Нуссельта на выходе из канала (в сторону увеличения по сравнению с коэффициентом теплоотдачи без поля). Относительно воды у ЭРЖ при напряженности поля 2.5 кВ/мм  $\langle Nu \rangle$  больше на 17,1%, а локальное число Нуссельта превышает значение соответствующего параметра в случае воды на 11,1%. Тем не менее, вследствие примерно вдвое более высокой теплоемкости и почти в пять раз большей теплопроводности вода показывает гораздо более эффективное охлаждение стенки канала. Отметим, что для условий моделирования в обоих случаях имела место тепловая стабилизация (местное значение числа Нуссельта устанавливалось постоянным на значительном удалении от выхода из канала, течение было стационарным и ламинарным. Для ЭРЖ при массовом расходе 0.01 кг/с характерен ползущий режим течения ( $Re \ll 1$ ). При этом скорость сдвига у стенки канала значительно изменялась в зависимости от величины напряженности электрического поля (от  $600 \text{ с}^{-1}$  в отсутствие поля, до  $2000 \text{ с}^{-1}$  при  $E=2.5$  кВ/мм). Диссипативный разогрев ЭРЖ был пренебрежимо мал.

Эффект диссипативного разогрева ЭРЖ заметно начал сказываться при массовых расходах более 0.1 кг/с и проявлялся в некотором снижении коэффициента теплоотдачи, а также увеличении средней по теплосодержанию температуры в выходном сечении канала. Таблица иллюстрирует этот эффект количественно.



Таблица – Относительное влияние диссипативного разогрева ЭРЖ на среднее по длине канала число Нуссельта

Массовый расход ЭРЖ, кг/с	Число Бринкмана	Степень уменьшения $\langle Nu \rangle$ при учете диссипативного разогрева ЭРЖ	Повышение средней температуры на выходе из канала, °С
0,01	$8,6 \cdot 10^{-4}$	0,99	0,1
0,1	$3,1 \cdot 10^{-2}$	0,92	0,6
0,2	$7,9 \cdot 10^{-2}$	0,87	2,4

### Выводы

Электрореологический эффект приводит к заметной интенсификации теплообмена, что должно непременно учитываться при проектировании устройств, работающих на его основе. Увеличение безразмерного коэффициента теплоотдачи, обусловленное увеличением скорости сдвига у стенок канала в результате образования квазитвердого ядра течения не достаточно велико, для того чтобы ЭРЖ оказалась более эффективным теплоносителем, нежели, например, вода. Интенсификация теплообмена в электрореологических системах при увеличении напряженности электрического поля имеет ограниченный и обратимый характер, сопровождается существенным увеличением величины гидравлического сопротивления и ростом внутренних тепловыделений, приводящих к уменьшению  $Nu$  по мере диссипативного разогрева ЭРЖ.

### Литература

1. Dietz P.W. and Melcher J.R. Interparticle electrical forces in packed and fluidized beds. // I&EC Fundamentals. 1978. Vol.17. Pp. 28-32.
2. Gavin H.P. Annular Poisuille flow of electrorheological and magnetorheological materials // J. Rheology. 2001. Vol. 45. No. 4. Pp. 983-994.
3. Shin Morishita and Tamaki Ura. ER fluid applicationa to vibration control devices and their adaptive neural-net controller. – Proc. of the recent advances in adaptive and sensory materials and their applications. Virginia Politechnic Institute and State University Blacksburg, Virginia. April 27-29, 1992. Pp.537-547.
4. Stevens N.G. et all. On the mechanical properties of electro-rheological fluids. – Transaction of the ASME. J. of Applied Mechanics. 1987. Vol.54, Pp.456-458.
5. Giu Z. Y.,Hu L., Korobko E. V. et all. // Proc. at the 5 Int. Conf. On ERF / Ed. N. Bullouph. 1996. Pp. 486-493.
6. Davis L.C. Polarization forces and conductivity effects in electrorheological fluids // J.Appl. Phys. 1992. Vol. 72. N4. Pp. 1334-1340
7. Bullough W. A., Wong P. L. Tribology of electrostructured fluids // Тепломассообмен ММФ-2000. IV Минский междунар. форум (22 – 26 мая 2000 г.). Минск: АНК ИТМО НАНБ. 2000. Т. 7. С. 145–154.