

УДК 532.52

Мамедов Асиман Низами Оглы, аспірант
КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Нестабилизованное течение электропроводной жидкости при наличии поперечного магнитного поля

Аннотация. В настоящей работе исследовано влияние поперечного магнитного поля на поток электропроводной жидкости на гидродинамическом начальном участке. Были получены зависимости влияния магнитного поля на гидродинамические характеристики потока электропроводной жидкости. Даны рекомендации по определению гидродинамического начального участка.

Ключевые слова: электропроводная жидкость, магнитная индукция, гидродинамический начальный участок, силы инерции.

Одним из актуальных вопросов магнитной гидродинамики является вопрос течения вязких и аномально – вязких электропроводных жидкостей на гидродинамическом начальном участке [1], [2], [3], [5]. Как известно, особенностью такого течения является то, что существенное влияние на поток, в данном случае, оказывают не только силы инерции от конвективного ускорения, но и массовые силы, имеющие магнитную природу [4], [6], [7], [8]. В зависимости от соотношения между этими силами происходит деформация эпюры скоростей и напряжений на начальном участке, и, если силы инерции от конвективного ускорения способствуют развитию ускоренного движения жидкости, то силы с магнитной природой способствуют торможению потока. В общем случае для рассматриваемого вида движения уравнения имеют следующий вид

$$\begin{cases} \rho(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla p + \mu\Delta\vec{v} + \frac{1}{c}[\vec{j} \times \vec{B}], \operatorname{div} \vec{v} = 0 \\ \vec{j} = \sigma\left(-\nabla\varphi + \frac{1}{c}[\vec{v} \times \vec{B}]\right), \operatorname{div} \vec{j} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{j}, \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\vec{F}_{\text{сум}} = \vec{F}_{\text{ин}} + \vec{F}_{\text{пм}} = \rho V_0 \vec{a} + \frac{1}{\sigma}[\vec{j} \times \vec{B}], \quad (2)$$

$$\vec{F}_{\text{м}} = [\vec{j} \times \vec{B}] - \frac{1}{2}\vec{H}^2 \operatorname{grad} \mu^* + \frac{1}{2} \operatorname{grad} \left(\vec{H}^2 \rho \frac{\partial \mu^*}{\partial \rho} \right), \quad (3)$$

$$\vec{F}_{\text{эл}} = \rho_e \vec{E} - \frac{1}{2}\vec{E}^2 \operatorname{grad} \varepsilon + \frac{1}{2} \operatorname{grad} \left(\vec{E}^2 \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} \right) \quad (4)$$

$$\rho(\vec{u} \operatorname{grad})\vec{u} \gg \frac{1}{\sigma}[\vec{j} \times \vec{B}], \quad (5)$$

$$\rho(\vec{u} \operatorname{grad})\vec{u} \approx \frac{1}{\sigma}[\vec{j} \times \vec{B}], \quad (6)$$

$$\frac{\text{силы инерции}}{\text{магнитная сила}} \approx \frac{\rho \vec{u}^2 / d}{\vec{B}^2 / \mu^*} = \left(\frac{u}{b}\right)^2 = Re_{\text{м}} \cdot S, \quad (7)$$

где \vec{B} – индукция магнитного поля, σ – плотность тока, \vec{H} – напряженность электромагнитного поля, μ^* , ε , ρ – магнитная, диэлектрическая проницаемость и плотность среды, Re_M – магнитное число Рейнольдса.

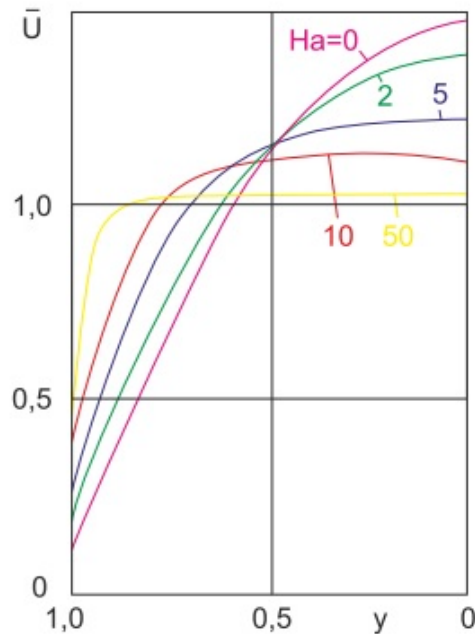
При анализе данных уравнений применительно к гидродинамическому начальному участку рассмотрено три случая:

1. Когда течение представляет собой течение Гартмана, то есть, отсутствуют силы инерции;
2. Когда влиянием магнитного поля можно пренебречь;
3. Когда силы инерции соизмеримы с силами, характеризующими силы с магнитной природой.

Для каждого из данных случаев определены рекомендации по расчету длины гидродинамического начального участка и поля скоростей. Так, например, для течения Гартмана, описываемого уравнением

$$\begin{cases} 0 = -\frac{df}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} - \frac{\sigma |B^2|}{c^2} u_x \\ \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

эпюры скоростей имеют вид



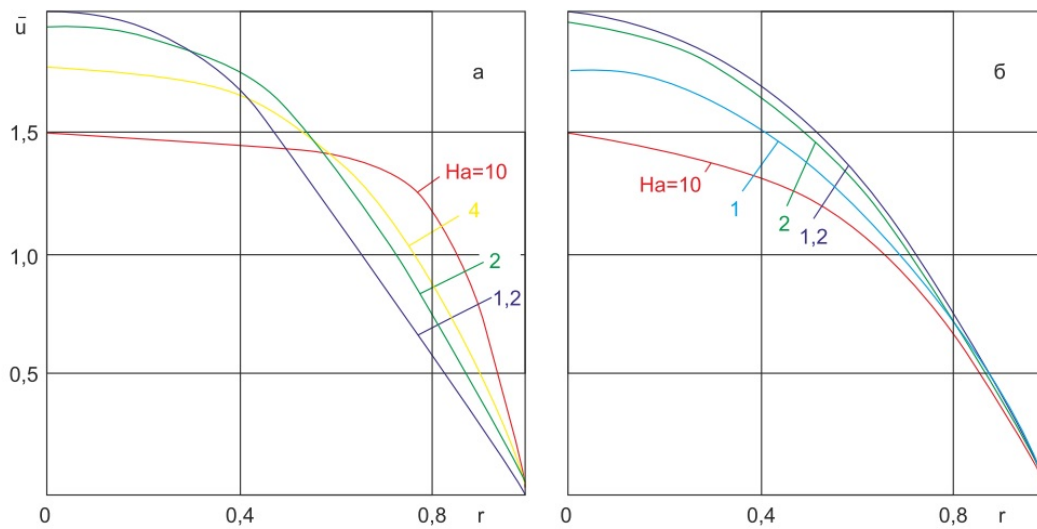


Рис. 1. Распределение скоростей при различных значениях числа Гартмана

Для начального участка при отсутствии действия магнитных сил эпюры скоростей представлены на Рис. 2.

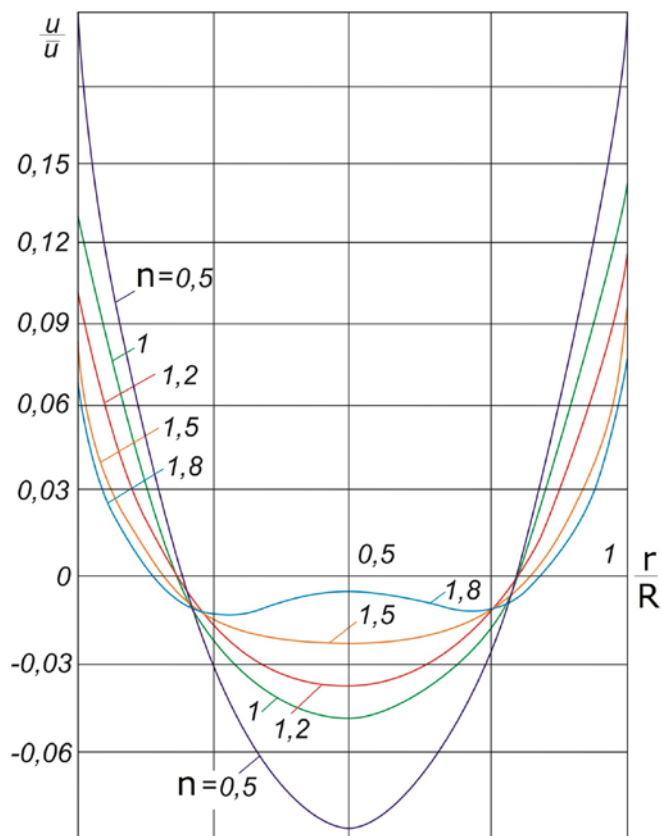


Рис. 2. Профили возмущенной скорости

Сопоставления поля скоростей при наличии и отсутствии магнитного поля дает возможность сделать оценку влияния магнитного поля на течение жидкости на Рис. 3

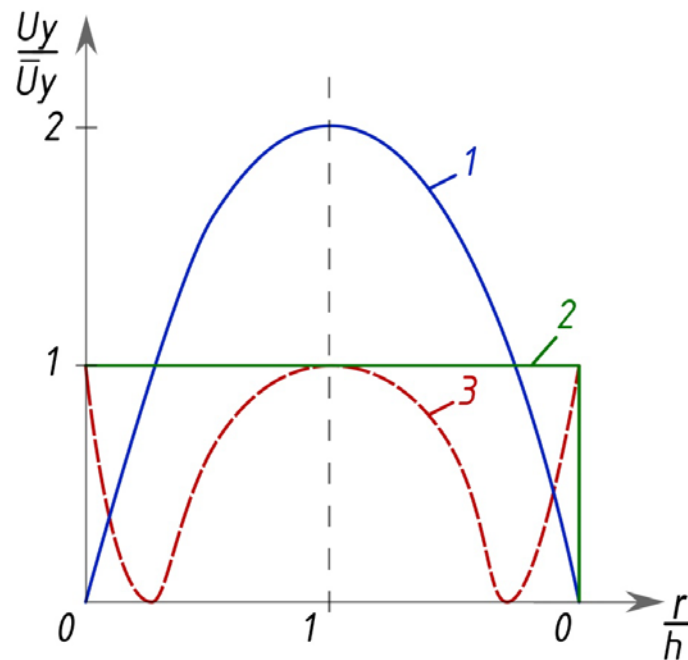


Рис. 3. Разница эюр скоростей на входе в начальный участок и на его выходе, где 1 – эюра на выходе, 2 – эюра на входе, 3 – разница эюр.

Таким образом, в результате исследований рассмотрены три случая соотношения сил инерции конвективного ускорения от магнитных сил:

$$1. \quad \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \ll \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y}; \quad (9)$$

$$2. \quad \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \approx \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y}; \quad (10)$$

$$3. \quad \rho \left(u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \gg \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u_x}{\partial y}. \quad (11)$$

На основе экспериментальных исследований, посвященных изучению тормозящего эффекта, связанных с проявлением сил магнитного поля и гашением вихреобразования были получены результаты, характеризующие влияние магнитного поля на расход протекающей жидкости и гидравлическое сопротивление, что показано на Рис. 4, 5, 6. Эффект “торможения” определялся по величине изменения расхода и средней скорости жидкости в зависимости от величины магнитной индукции \vec{B}_M .

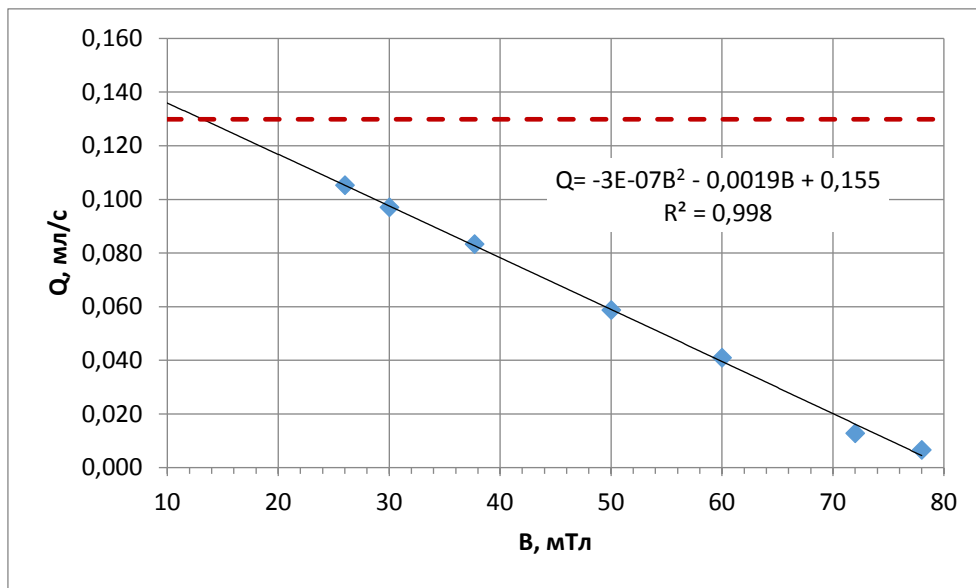


Рис. 4. Графік залежності $Q = f(V)$

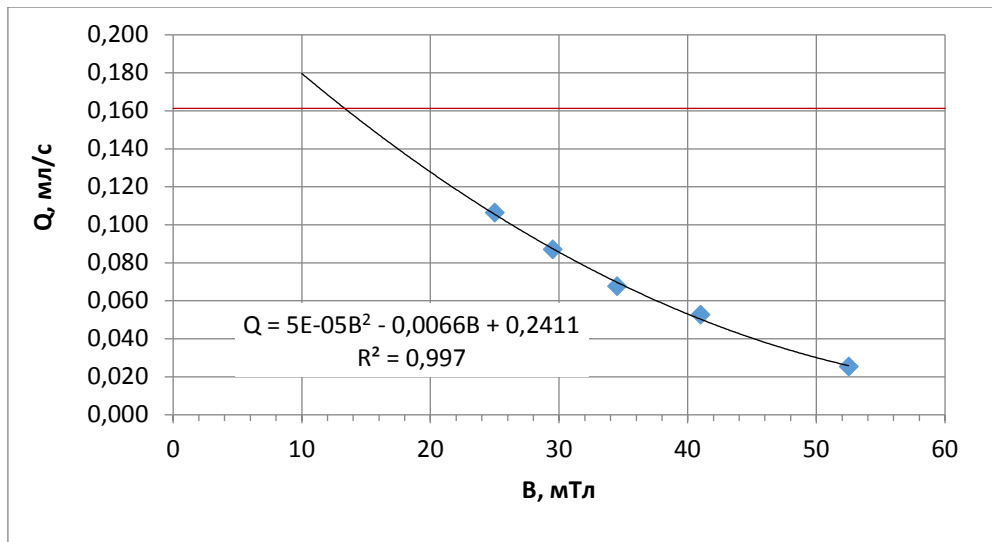


Рис. 5. Графік залежності $Q = f(V)$

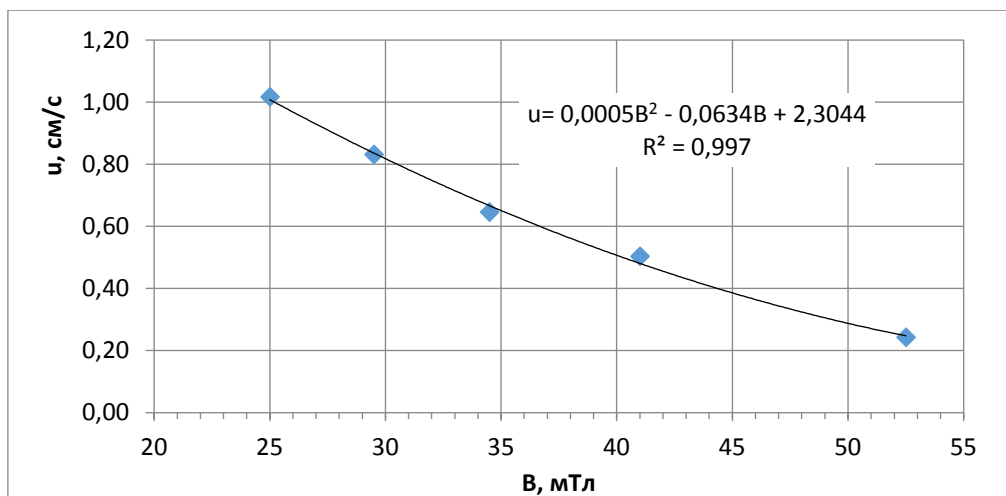


Рис. 6. Графік залежності $v = f(V)$

Изменение скорости под действием магнитного поля связано с ростом коэффициента трения.

$$\xi = 2 \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot \frac{d}{\rho u^2} = 2 \frac{\Delta p}{\Delta l} \cdot \frac{d}{\rho} (aB^2 - bB + c)^{-1}, \quad (12)$$

где Δp – перепад давления, d – внутренний диаметр, u – средняя скорость, a, b, c – размерные параметры, имеющие следующую размерность:

$$[a] \equiv \left[\frac{\text{М}}{\text{мТл}^2 \cdot \text{сек}} \right], [b] \equiv \left[\frac{\text{М}}{\text{мТл} \cdot \text{сек}} \right].$$

Влияние критерия Гартмана на изменение числа Рейнольдса представлено на следующем рисунке:

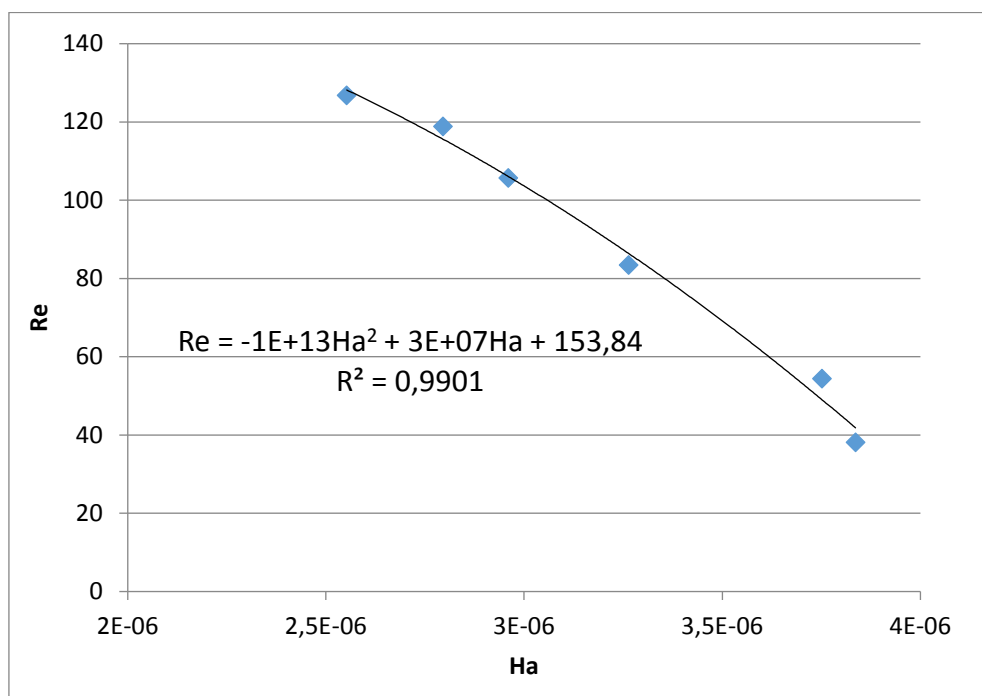


Рис. 7. График зависимости $Re = f(Ha)$.

В заключении следует отметить, что на основе теоретических и экспериментальных исследований были получены выражения, характеризующие длину гидродинамического начального участка в следующем виде:

$$L_{\text{Hy}} = 0,16 Re \cdot d + 3,8 Ha \cdot d \quad (13)$$

Таким образом, показано, что в случае ламинарного течения электропроводной жидкости рассматриваемого типа (масло моторное 15W40) поперечное магнитное поле может оказывать существенное влияние на гидродинамические характеристики потока, в том числе, и на его параметры в зоне гидродинамического начального участка.

Список использованной литературы

1. Ватажин А. Б., Любимов Г. А., Регирер С. А. Магнитогидродинамические течения в каналах, М., Наука, 1970. 672 с.
2. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики, М., Мир, 1967. 320 с.
3. Каулинг Т. Магнитная гидродинамика, перевод с англ., М., ИЛ, 1959, 132 с.
4. Паллабазер З. Эффект магнитной пластичности в неньютоновских жидкостях. “Ракетная техника и космонавтика”, 1966, №11
5. Яхно О. М., Матиуга В. М., Кривошеев В. С. Гидродинамический начальный участок, Черновцы, “Зелена Буковина”, 2004. 141 с.
6. Kevin D. Seibert, Mark A. Burns, Effect of Hydrodynamic and Magnetic Stabilization on Fluidized-Bed Adsorption, Biotechnology Progress, 1998
7. Molenkamp L., Molenkamp L., de Jong M., Hydrodynamic electron flow in high-mobility wires. Phys Rev B Condens Matter 51 (19): 13389-1340, 1995
8. Principi A., Vignale G, Violation of the Wiedemann-Franz law in hydrodynamic electron liquids. Phys Rev Lett 115 (5): 056603, 2015