

УДК 538.4

Яхно О.М., д.т.н., проф., **Мамедов А. Н.**, асп., **Коваль А.Д.**, к.т.н., доц., **Муращенко А.Н.**, к. т. н.
КПІ ім. Ігоря Сикорського, г. Київ, Україна

Особенности формирования гидродинамического начального участка в постоянном магнитном поле

***Аннотация.** Одними из актуальных задач гидромеханики являются задачи, связанные с дестабилизацией течения, вызванные различными факторами. Среди таких факторов можно выделить действия сил инерции от конвективного ускорения, влияние условий тепло-массообмена, а также действие массовых сил, имеющих магнитную природу. Влияние первых двух факторов сказывается на формировании гидродинамического и термического начальных участков и достаточно подробно, особенно для ньютоновских сред, описаны в литературе. В этом плане могут быть названы работы Тарга, Тябина, Лойцянского, Кристиансена, Шиллера, Петухова и многих других авторов, где сформированы условия течения в области как гидродинамического, так и термического начальных участков. Вместе с тем, дестабилизация потока, связанная с действием магнитного поля при условии электропроводности рассматриваемой среды, изучена слабо. К фундаментальным исследованиям данного направления следует отнести исследования Регирера, Шерклиффа, Повха и других авторов. Учитывая данные обстоятельства, в настоящей работе сделана попытка анализа влияния сил, имеющих магнитную природу, таких как пондеромоторные силы (силы Лоренца), на кинематические и динамические характеристики потока на начальном участке. Сделана попытка систематизации исследований, характеризующих потери энергии в потоке под влиянием магнитного поля и анализ метода расчета длины гидродинамического участка, как функции основных критериев, характеризующих подобного вида течения, которыми являются критерий Гартмана и магнитное число Рейнольдса.*

***Ключевые слова.** Гидродинамический начальный участок, магнитное поле, пондеромоторные силы, эпюра скоростей, число Гартмана.*

Исследованию течения вязких и аномально – вязких жидкостей на гидродинамическом начальном участке посвящен целый ряд работ [1], [2], [3], [4] и т.д. Особенностью подобного рода течения по сравнению со Стоксовским течением является то, что течение жидкости происходит не только под действием сил трения, но и сил инерции от конвективного ускорения. В связи с этим, действие конвективного ускорения проявляется в том, что эпюра скоростей деформируется по длине начального участка и перепад давления на его длине представляет собой сумму перепада давления соответствующее стабилизированному течению и добавки, связанные с действием сил от конвективного ускорения. Учитывая это, соответствующим образом определяется и длина гидродинамического начального участка с учетом реологических свойств рассматриваемой жидкости [5]. В случае движения электропроводной жидкости в поле действия магнитных сил на жидкость действует так называемая пондеромоторная сила (сила Лоренца), и в уравнение движения помимо сил инерции вводится соответствующие массовые силы с магнитной природой. В этом случае для начального участка уравнение движения принимает вид:

$$\begin{cases} \rho(\vec{v}\nabla)\vec{v} = -\nabla p + \mu\Delta\vec{v} + \frac{1}{c}[\vec{j} \times \vec{B}], \operatorname{div} \vec{v} \\ \vec{j} = \sigma \left(-\nabla\varphi + \frac{1}{c}[\vec{v} \times \vec{B}] \right), \operatorname{div} \vec{j} = 0 \\ \operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c}\vec{j}, \operatorname{div} \vec{B} = 0. \end{cases}, \quad (1)$$

В этом случае силы, действующие на жидкость, представляются двумя слагаемыми, одно из которых характеризует массовые силы неэлектрического происхождения (силы инерции,

силы тяжести, центробежные силы), второе слагаемое – силы электромагнитного происхождения (пондеромоторные силы):

$$\vec{F}_{\text{сум}} = \vec{F}_0 + \vec{F}_{\text{пм}} = \rho \vec{a} + \frac{1}{\sigma} [\vec{j} \times \vec{B}]. \quad (2)$$

Пондеромоторная сила представляет собой силу, равную:

$$[\vec{j} \times \vec{B}] = (\text{rot} \vec{B}) \times \frac{\vec{B}}{\mu^*} = \frac{(\vec{B} \text{ grad}) \vec{B}}{\mu^*} - \frac{\text{grad} \vec{B}}{2\mu}. \quad (3)$$

Пондеромоторные силы, представленные в уравнении движения, являются массовыми силами, и как показали исследования ряда авторов, наблюдается полная аналогия между силами инерции и магнитными силами. Данная аналогия позволяет проводить исследования при решении задач нестабилизированного течения в магнитном поле для начального участка в соответствии с существующими методиками [5]. В соответствии с исследованиями Шерклиффа для гидродинамического начального участка силы инерции соизмеримы с силами Лоренца, а в некоторых случаях пондеромоторные силы превышают силы инерции, что приводит к гашению инерции потока и соответствующим образом проявляется на эпюре скоростей. Влияние массовых сил, имеющее магнитную природу, и их соотношение с силами инерции может быть оценено критерием Альфвена, а именно:

$$\frac{\text{силы инерции}}{\text{магнитная сила}} \approx \frac{\rho \vec{u}^2 / d}{\vec{B}^2 / \mu^*} = \left(\frac{u}{b}\right)^2 = Re_m \cdot S. \quad (4)$$

В общем случае перепад давления при действии пондеромоторных сил может быть представлен следующим образом:

$$\Delta p = \mu \Delta \vec{u} + \frac{1}{\sigma} [\vec{j} \times \vec{B}] - \rho (\vec{u} \text{ grad}) \vec{u}. \quad (5)$$

Основываясь на приведенных рассуждениях была составлена математическая модель течения жидкости на начальном участке в магнитном поле и основываясь на данных, представленных в работе Регирера, получены результаты для перепада давления и длины гидродинамического начального участка, которые являются функцией не только числа Рейнольдса, но и числа Гартмана:

$$(\mathcal{L}_{\text{ну}})_{\text{МП}} = F(Re_{\text{и}}, Re_{\text{м}}, Ha), \quad (6)$$

где $Re_{\text{м}} = \frac{u_{\text{ср}} d}{\lambda}$, $Re_{\text{и}}$ – инерционное число Рейнольдса, $Ha = Bxh \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2$.

При определении длины начального участка и решении задачи формирования поля скоростей на нем использовалось предположение, что эпюра скоростей в конце начального участка зависит также не только от сил вязкого трения, но и от критерия Гартмана, причем с ростом числа Гартмана эпюра скоростей стремится к прямоугольной. Следует отметить, что такое поведение функции скорости в магнитном поле аналогично поведению усредненной скорости в турбулентном потоке при числе Рейнольдса, стремящимся к бесконечности. В

качестве примера на Рис. 1 представлены эпюры скоростей в конце гидродинамического начального участка, полученные в работе Шерклиффа.

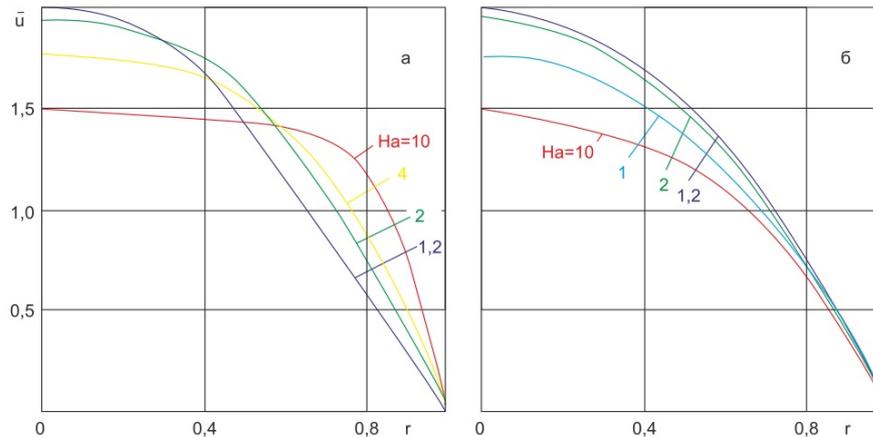


Рис. 1 – Распределение скоростей в круглой трубе при различных числах Гартмана

В заключении следует отметить, что при анализе и математическом моделировании течения жидкости на начальном участке возникла необходимость оценки действия пондеромоторной силы на кинематические и динамические характеристики потока. Так как силы инерции от конвективного ускорения могут иметь такие воздействия на поток, что и силы с магнитной природой, то становится актуальным проведение оценки воздействия данных сил на дестабилизацию потока.

Список использованной литературы

1. Тябин Н.В., Центовский Е.М. Труды хим.-техн. инс-та, вып. 32, Казань, 1964.
2. Регирер С.А. Вопросы магнитной гидродинамики, г. Рига, 1962, с. 125.
3. Тарг С.М. Основные задачи теории ламинарных течений, М-Л, 1951.
4. Christiansen E., Gordon E. Jensen, Fan – Sheng Tao Laminar Flow Heat Transfer, A. I. Ch. E. Journal, №6, 1966.
5. Яхно О.М., Матиега В.М., Кривошеев В.С. Гидродинамический начальный участок, г. Черновцы "Зелена Буковина", 2004 г., с. 143.