

Особенности течения вязкой жидкости под действием поперечного магнитного поля

А. Н. Мамедов¹ • С. В. Стась² • Е. В. Лаврухин¹

¹ КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина;

² Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины, г. Черкассы, Украина

Received: 22 January 2020 / Accepted: 24 February 2020

Аннотация. Рассмотрено течение вязких электропроводных жидкостей в поле действия сил, имеющих магнитную природу. Проведен анализ случая, когда течение является нестабилизированным, по своим характеристикам близким к потоку на гидродинамическом начальном участке. В данном случае, помимо сил вязкого трения, существенное влияние на поток имеют силы инерции от конвективного ускорения и массовые силы, связанные с действием пондеромоторных сил, возникающих при наличии магнитного поля. В этом случае в уравнениях движения, характерных для описания гидродинамического начального участка, появляется слагаемое, характеризующее действие сил с магнитной природой, то есть, величина $\frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{du}{dy}$ указывает на эффект проявления пондеромоторных сил на гидродинамическом начальном участке и связана с величиной соотношения между силами инерции и силами вязкого трения. В этом случае, когда силы инерции незначительны, рассматриваемая система уравнений характеризует течение Гартмана. Тогда, когда силы инерции от конвективного ускорения значительно больше пондеромоторных сил, рассматриваемое течение характерно для гидродинамического начального участка и описано в литературе достаточно полно. Наконец, данные уравнения могут быть использованы для описания движения Пуайзеля, когда пренебрежимо малы пондеромоторные силы и силы инерции. Таким образом, в общем случае при наличии всех видов сил, представленных в уравнении движения, мы имеем дело с гидродинамическим начальным участком, величина которого зависит как от критерия Рейнольдса, так и от критерия Гартмана. Характер такой зависимости представлен в статье в виде рисунка, где перепад давления в общем случае можно представить как сумму перепада давления для стабилизированного течения и дополнительного, связанного с действием сил инерции и пондеромоторных сил. Как показали проведенные эксперименты, действие пондеромоторных сил проявляется в виде тормозящего потока эффекта. В то же время, силы инерции от конвективного ускорения способствуют ускоренному движению жидкости в ядре потока в гидродинамическом начальном участке и торможению в пределах формирующегося пограничного слоя. Таким образом, от соотношения между этими силами зависит процесс формирования потока на гидродинамическом начальном участке. В работе этот процесс характеризуется соотношением между критерием Рейнольдса и критерием Гартмана.

Ключевые слова: гидродинамический начальный участок, силы инерции, пондеромоторные силы, критерий Рейнольдса, критерий Гартмана, перепад давления.

Введение

Одной из актуальных задач магнитной гидродинамики является задача, связанная с нестабилизированным течением вязких жидкостей при наличии поперечного магнитного поля. Как известно, в этом случае, помимо сил инерции от конвективного ускорения действуют пондеромоторные силы, что способствуют проявлению целого ряда гидродинамических эффектов, торможению потока, перераспределению гидродинамических характеристик на начальном участке, изменению его длины, гашению вихрей, если таковые возникают на входе в канал.

Для электропроводящих жидкостных сред А. В. Перминов др. [1–3] указывают, что магнитно-гидродинамическое взаимодействие может порождать конвективное движение в жидкости, оказывать влияние на структуру и устойчивость такого движения. Для случаев, когда число Прандтля почти нулевое $Pr \rightarrow 0$, поперечное магнитное поле (составляющая) в отличие от горизонтального существенным образом влияет на стабилизацию потока.

В работе А. Малекзаде и соавт. [4] исследовано влияние магнитного поля на коэффициент поверхностного трения устойчивого полностью развитого ламинарного потока в трубе. Установлено, что поперечное магнитное поле изменяет профиль осевой скорости с параболического на относительно плоскую форму. При этом сначала

✉ А. Н. Мамедов
asy_m@yahoo.com

радиальная составляющая скорости возрастает быстрее, а затем постепенно уменьшается вдоль трубы, до тех пор, пока не снижается до нуля.

В работе М. Г. Тагери [5] исследуются вопросы действия магнитного поля на течение жидкости во входной области каналов. Для ньютоновской несжимаемой электропроводящей жидкости в плоском канале, подверженной действию магнитного поля, предложено использовать некий вспомогательный параметр, зависящий от величины магнитной интенсивности и градиента давления. Сделана попытка исследования магнитогидродинамического начального участка. Эль-Шахед [6] исследовал влияние поперечного магнитного поля на нестационарное течение жидкости сквозь пористую среду в круглой трубе, описал поля скорости и напряжений потока.

В работе Г. Нагаранджу [7] показано, как при увеличении числа Рейнольдса замедляется осевая составляющая потока, тогда как усиливается ее радиальная составляющая. С. К. Какарантзас и соавт. [8] методами прямого численного моделирования магнитогидродинамических потоков подтверждают, что наличие магнитного поля приводит к замедлению жидкости и, следовательно, к стабилизации потока и для случаев движения жидкости в кольцевых зазорах.

Цель исследования и постановка задачи

Учитывая эти способности и большое практическое значение исследований гидродинамического начального участка в настоящей работе, сделана попытка оценки влияния магнитного поля на нестабилизированный поток. В связи с этим возникла необходимость проведения дополнительных исследований, связанных с решением задачи и получения рекомендаций, связанных с определением длины гидродинамического начального участка, характеризуемой как гидродинамическими характеристиками, так и критериями, связанными с магнитной природой.

Методика и результаты исследования

Исследованиям по изучению особенностей течения вязких и аномально-вязких жидкостей в поперечном магнитном поле в зоне гидродинамического начального участка посвящено множество работ [10–14]. В основном эти исследования относились к электропроводным ньютоновским жидкостям. Как известно, для гидродинамического начального участка при наличии поперечного магнитного поля перепад давления может быть определен на основании уравнения движения, представленным в следующем виде

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = -\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Данные уравнения записаны в декартовой системе координат для случая движения жидкости в канале вдоль оси X. Как видно из этого уравнения, перепад давления на начальном участке зависит от поверхностных сил, характеризуемых силами вязкого трения и представленных выражением $\mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$, сил инерции,

характеризуемых конвективным ускорением $\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right)$ и объемных сил, имеющих магнитную природу

$\frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}$. В уравнении (1) приняты следующие обозначения:

- u, ω проекции скорости на оси x и z ;
- μ – вязкость;
- B – индукция магнитного поля;
- c – скорость света;
- σ – плотность электромагнитного поля.

Таким образом, в общем случае перепад давления на гидродинамическом начальном участке характеризуется тремя основными составляющими:

- вязким трением;
- силами инерции от конвективного ускорения;
- магнитными силами.

Запись данного уравнения в безразмерном виде показывает, что перепад давления, характеризуемый критерием Эйлера, является функцией критерия Рейнольдса и критерия Гартмана. В зависимости от соотношения

между данными силами определяются особенностью формирования поля скоростей и давлений на начальном участке. При этом возможно три случая:

1. Когда магнитные силы в электропроводной жидкости по величине значительно меньше сил инерции; в этом случае задачу можно рассматривать как стандартную задачу о гидродинамическом начальном участке [10, 13, 15, 16];
2. Возможен случай, когда силы магнитного поля значительно превышают по величине силы инерции; в этом случае уравнение принимает следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial \omega}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

3. В этом случае наиболее распространенным на практике является предположение, что объемные силы инерции соизмеримы с силами вязкого трения, то есть

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + \omega \frac{\partial u}{\partial z} \right) \approx \frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial z}. \quad (3)$$

Для случая 1 может быть использовано решение, представленное в работах [10, 15–17], и решение системы уравнений дает возможность получить зависимости для перепада давления и поля скоростей. В этом случае уравнение движения в цилиндрических координатах имеет следующий вид:

$$\begin{cases} u_0 \frac{du_z}{dz} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{dp}{dz} + \left(\nu \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial u_z}{\partial r} \right) \\ \frac{\partial u_z}{\partial z} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial (ru_r)}{\partial r} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Решение данных уравнений позволяет определить закон распределения скоростей на начальном участке в следующем виде:

$$\frac{\Delta p}{0,5\rho u_{cp}^2} = \frac{2}{3} - \frac{4}{u_{cp}} \cdot \sqrt{\frac{2x}{R \cdot Re}} \cdot \frac{\partial u}{\partial r}. \quad (5)$$

Энергия, затрачиваемая на начальном участке, является причиной дополнительного перепада давления, возникающего в этой области по сравнению с областью установившегося течения. На рисунке 1 показано, как градиент давления постепенно уменьшается на длине L_e L_e по мере удаления от входа, пока не достигнет постоянного значения, соответствующего стабилизированному течению.

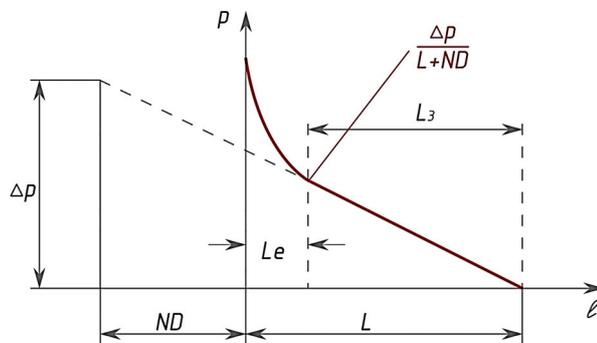


Рис. 1. График зависимости $p(\ell)$

Для случая 2 (стабилизированного течения в магнитном поле) уравнения движения могут быть представлены в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{\sigma B^2(x)}{c^2} u + \frac{\sigma E(x) B(x)}{c}, \quad (6)$$

а решение имеет следующий вид

$$u(z) = \frac{2 \left(\sigma E_0 B_0 + \frac{dp}{dx} \right)}{\sigma B_0^2 H} (z) + \frac{\sigma E_0 B_0 + \frac{dp}{dx}}{\sigma B_0^3 L} \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)^{-1/2} \frac{L}{H} \left(B_0 H \left(\frac{\sigma}{\eta} \right)^{-1/2} - 2 \right). \quad (7)$$

При исследовании течения на начальном участке в случае (3) при экспериментальных исследованиях был обнаружен эффект торможения потока за счёт действия пондеромоторных сил. Особенности движения жидкости в этом случае можно охарактеризовать следующим образом:

– Процесс развития течения начинается с формирования гартмановских пограничных слоев, который

происходит за время $\frac{\rho}{\sigma B^2}$. Более медленно протекает соответствующее формирование профиля в ядре

потока (и рост пограничных слоев на верхней и нижней стенках в канале прямоугольного сечения). При

изучении полностью развитого течения было показано, что электромагнитная сила в ядре потока имеет

порядок $\frac{B v_c \sqrt{\sigma \mu}}{a}$. Эта оценка следует из того, что распределения токов в поперечном сечении регулируется пограничными слоями на боковых стенках. Аналогично при развитии течения разность между электромагнитными силами в переходном и развитом режимах, связанная с наиболее устойчивой составляющей разности скоростей $v' - v^l$ в ядре потока, $T \approx \frac{\rho a}{B \sqrt{\sigma \mu}}$ и $L \approx \frac{\rho a v_m}{B \sqrt{\sigma \mu}} = Re \frac{a}{Ha'}$, что было указано

выше. Таким образом, как следует из анализа, с уменьшением скорости движения жидкости влияние поперечного магнитного поля может возрастать.

В первом случае, когда величина критерия Гартмана незначительна, длина начального участка определяется по формуле [16]:

$$L = const \cdot H \cdot Re \quad (8)$$

где $const$ – экспериментальная величина, зависящая от условия входа в каналах.

Перепад давления определяется по формуле, имеющей следующую структуру:

$$\frac{2(p_0 - p_l)}{\rho v_m^2} = \frac{64L}{H \cdot Re} + \Delta p' \quad (9)$$

где $\Delta p'$ – дополнительный перепад давления, связанный с деформацией эпюры скоростей на начальном участке.

Таким образом, многие авторы считают, что используя приведенную зависимость (9) как результат анализа уравнения Пуайзеля, к которому добавили член $\Delta p'$, учитывающий переход скоростного профиля от однородного к параболическому и потере на трении при входе в трубопровод.

Для второго случая, когда силы инерции пренебрежимо малы, гидродинамический начальный участок отсутствует.

В третьем случае гидродинамический начальный участок определяется в зависимости от величины критерия Рейнольдса и Гартмана:

$$L = c_1 \cdot H \cdot Re + c_2 \cdot H \cdot Ha \quad (10)$$

где c_1, c_2 – константы, характеризующие электропроводящие свойства рассматриваемой жидкости.

К сожалению, определение перепада давления для этого случая является весьма сложной задачей, связанное с недостаточностью физического представления о взаимодействии сил магнитной природы и сил

инерции. В связи с этим, возникает необходимость дополнительных экспериментальных исследований. Используя метод двух капилляров были проведены эксперименты, позволяющие сделать оценку величины тормозящего эффекта за счет магнитного поля, то есть, пондеромоторных сил, на начальном участке.

Таким образом, степень влияния сил, имеющих аналогичную природу, то есть поперечного магнитного поля на гидродинамическом начальном участке, существенно зависит от соотношения между ними и силами инерции, характеризующимся конвективным ускорением. Данное соотношение влияет не только на распределение скоростей, но и на перепад давления и длину гидродинамического начального участка. Основными критериями подобия в рассматриваемом случае являются критерии Гартмана и Рейнольдса. Соотношение между этими критериями, имеющее вид

$$\frac{Re}{Ha} \cdot a = \frac{\rho a u_m}{B \sqrt{\sigma \mu}} \quad (11)$$

и характеризует интенсивность и степень торможения потока магнитной жидкости на начальном участке под влиянием магнитного поля. Ядро потока, в данном случае, является ускоренным благодаря действию сил инерции. Как показано в работе [11], поведение потока на начальном участке может быть представлено следующим образом: процесс развития течения начинается с формирования гартмановских пограничных слоев, который происходит за время $\frac{\rho}{\sigma B^2}$. Более медленно протекает соответствующее формирование профиля в ядре потока. При изучении полностью развитого течения было показано, что электромагнитная сила в ядре потока имеет порядок $\frac{B u_c \sqrt{\sigma \mu}}{a}$. Эта оценка следует из того, что распределение токов в пограничном сечении регулируется пограничными слоями на боковых стенках. Аналогично при развитии течения разность между электромагнитными силами в переходном и развитом режимах, связанная с наиболее устойчивой составляющей разности скоростей u' в ядре потока, оказывается порядка $\frac{B u' \sqrt{\sigma \mu}}{a}$ и должна быть сравнима с $\frac{\rho u'}{T}$. Таким образом, $T \approx \frac{\rho a}{B \sqrt{\sigma \mu}}$ и $L \approx \frac{\rho a u_m}{B \sqrt{\sigma \mu}} = \frac{Re}{Ha} \cdot a$, что было указано выше. Оценка длины L согласуется с результатами анализа, сделанного Бай-Ши-И [18]. Длина начального участка в трубе при круглом сечении оказывается меньше, чем при квадратном.

Выводы

В статье поставлена задача проведения анализа воздействия на поток вязкой жидкости, сил инерции от конвективного ускорения и пондеромоторных сил, возникающих при движении жидкости в магнитном поле. Показано, что основными критериями, характеризующими такой поток, являются критерии Рейнольдса и Гартмана, а их соотношение характеризует степень проявления рассматриваемых сил в пределах гидродинамического начального участка. Показано, что если силы инерции от конвективного ускорения оказывают ускоряющее действие на поток (иногда используется термин разгонный начальный участок), то пондеромоторные силы способствуют торможению потока. На основании данного представления о физике процесса были получены рекомендации для определения длины гидродинамического начального участка.

References

1. Перминов, А.В. Движение жидкостей с различной реологией во внешних силовых полях [Текст]: автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. физ.-мат. наук (01.02.05) / Перминов Анатолий Викторович; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2016. – 32 с.
2. Nikulin, I.L. Mathematical model of conducting fluid convection in a nonuniform alternating magnetic field / I.L. Nikulin, A.V. Perminov, A.I. Tsaplin // *Magnetohydrodynamics*. – 2013. – Vol. 49, No. 1. – P. 203–209. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1389-5>
3. Nikulin I L, Perminov A V. Mathematical modelling of frequency and force impacts on averaged metal flows in alternating magnetic field. *Int J Heat Mass Transfer*. – 2019. – 128: P. 1026–1032. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.130>
4. Malekzadeh, A. Heydarinasab and B. Dabir, Magnetic field effect on fluid flow characteristics in a pipe for laminar flow, *Journal of Mechanical Science and Technology*. – 2011. – Vol. 2, No. 25. P. 333–339. <https://doi.org/10.1007/s12206-010-1223-5>.

5. Taheri, M.H. The influence of magnetic field on the fluid flow in the entrance region of channels: analytical/numerical solution. SN Appl. Sci. – 2019. – Vol. 10, No. 1, 1233 p. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1244-3>.
6. Moustafa, EL-Shahed., “MHD of a Fractional Viscoelastic Fluid in a Circular Tube”, Mechanics Research Communication. – 2006. – No. 33, P. 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2005.02.017>.
7. Nagaraju G., Mahesh Garvandha. Magnetohydrodynamic viscous fluid flow and heat transfer in a circular pipe under an externally applied constant suction. Heliyon. 2019. – Vol. 2. No5. e01281. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01281>.
8. Kakarantzas SC, Benos LT, Sarris IE, Knaepen B, Grecos AP, Vlachos NS. MHD liquid metal flow and heat transfer between vertical coaxial cylinders under horizontal magnetic field. Int J Heat Fluid Flow. – 2017. – No. 65, P. 342–351. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2017.01.001>.
9. Sheikholeslami, M.; Jalili, P. Magnetic field effect on nanofluid flow between two circular cylinders using AGM. Alex. Eng. J. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.010>
10. Тябин Н.В., Центовский Е.М. Труды хим. – тех. института, Казань, 1964. вып. 32.
11. Шерклиф Дж. Курс магнитной гидродинамики, М., Мир, 1967. 320 с.
12. Ватажин А.Б., Любимов Г.А., Регирер С.А. Магнитогидродинамические течения в каналах, М., Наука, 1970. – 672 с.
13. Shizhi Qian, Haim H. Bau, Magneto-Hydrodynamics Based Microfluidics, Mech Res Commun. 2009 January 1; 36(1): 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.06.013>
14. Hwei Chu Weng, Hydrodynamic Modeling of Targeted Magnetic-Particle Delivery in a Blood Vessel, *J Biomech Eng* 135(3), 034504 (Feb 11, 2013) (5 pages), <https://doi.org/10.1115/1.4023137>
15. Christiansen, E., Jensen, G. and Tao, F., 1966. Laminar flow heat transfer. *AIChE Journal*, 12(6), pp.1196-1202.
16. Яхно О.М., Матиєга В.М., Кривошеєв В.С. Гидродинамический начальный участок, Черновцы, “Зелена Буковина”, 2004. 141 с.
17. Мак-Келви, Д.М. Переработка полимеров [Текст] / Д.М. Мак-Келви, – М.: Химия, – 1965. – 442 с.
18. Бай Ши-И, Магнитная газодинамика и динамика плазмы [Текст] / Ши-И Бай; пер. В. П. Коробейников, П. И. Чушкин; ред. А.Г. Куликовский. - М. : Изд-во Мир, 1964. - 301 с.
19. Yakhno, O., Mamedov, A. and Stas, S., 2019. Influence of transverse magnetic field on flow destabilization in the channel. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, 0(1), pp.25-29. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2019.1.04>

Особливості течії в'язкої рідини під дією поперечного магнітного поля

А. Н. Мамедов, С. В. Стась, Е. В. Лаврухін

Анотація. Розглянуто течії в'язких електропровідних рідин у під дією сил, що мають магнітну природу. Проведено аналіз випадку, коли течія є нестабілізованою, за своїми характеристиками близькою до потоку на гідродинамічній початковій ділянці. В такому випадку, окрім сил в'язкого тертя, істотний вплив на потік чинять сили інерції від конвективного прискорення та масові сили, пов'язані з дією пондеромоторних сил, що виникають при наявності магнітного поля. За таких умов у рівняннях руху для опису гідродинамічної початкової ділянки, з'являється доданок, що характеризує дію сил з магнітною природою. Величина $\frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{du}{dy}$ вказує на ефект прояву пондеромоторних сил на гідродинамічній початковій ділянці й пов'язана з величиною співвідношення між силами інерції та силами в'язкого тертя. У випадку, коли сили інерції незначні, розглянута система рівнянь характеризує течію Гартмана. Коли сили інерції від конвективного прискорення суттєво більші за пондеромоторні сили, особливості течії подібні до гідродинамічної початкової ділянки і детально описані в літературі. Нарешті, дані рівняння можуть бути використані для опису течії Пуайзеля, коли і пондеромоторні сили, і сили інерції несуттєві. Таким чином, в загальному випадку при наявності всіх видів сил, представлених в рівнянні руху рідини, ми маємо справу з гідродинамічною початковою ділянкою, довжина якої залежить як від критерія Рейнольдса, так і від критерія Гартмана. Характер такої залежності поданий в статті у вигляді рисунка, де зміну тиску в загальному випадку можна представити як суму перепаду тиску для стабілізованої течії і додаткової, пов'язаної з дією сил інерції і пондеромоторних сил. Як показали проведені експерименти, дія пондеромоторних сил чинить гальмуючий ефект на течію. Разом із тим, сили інерції від конвективного прискорення сприяють прискореному руху рідини в ядрі потоку в гідродинамічній початковій ділянці та гальмуванню у примежовому шарі. Таким чином, від співвідношення між цими силами залежить процес формування потоку на гідродинамічній початковій ділянці. У роботі цей процес характеризується співвідношенням між критерієм Рейнольдса і критерієм Гартмана.

Ключові слова: гідродинамічна початкова ділянка, сили інерції, пондеромоторні сили, критерій Рейнольдса, критерій Гартмана, перепад тиску.

Specific of a viscous fluid flow under the action of a transverse magnetic field

A. N. Mamedov, S. V. Stas, Y. V. Lavrykhin

Annotation. In this article we considered the flow of viscous electrically conductive fluids in the field of action forces which have a magnetic nature. Done the analysis of the case when the flow is unstabilized, but in their characteristics close to the flow in the hydrodynamic initial section. In this case, besides the viscous friction forces, have a significant effect on the flow the inertial forces from convective acceleration and mass forces, related with the action of ponderomotive forces arising in the presence of a magnetic

field. In this case, the term appears in the equations of motion characteristic of the description of the hydrodynamic initial section, which characterize the action of forces with a magnetic nature, that is, the value $\frac{\sigma B_0^2}{c^2} \cdot \frac{\partial u}{\partial y}$ shows on the effect of the manifestation of ponderomotive forces in the hydrodynamic initial section and related with the value of the ratio between the forces of inertia and the forces of viscous friction. The Hartman flow characterizes when the inertia forces are insignificant in this case. On the other side the inertia forces from convective acceleration are much greater than the ponderomotive forces, the flow under consideration is characteristic of the hydrodynamic initial section and is described in the article quite fully. Finally, these equations can be used to describe the Poiseuille motion, when ponderomotive forces and inertia forces are too small. In general case, in the presence of all types of forces represented in the equation of motion, we are working with a hydrodynamic initial section, whose value depends on both the Reynolds criterion and the Hartman criterion. The nature of this dependence is presented in the article as a picture, where the differential pressure in the general case can be represented as the sum of the differential pressure for a stabilized flow and additional, related with the action of inertia and ponderomotive forces. The experiments show, that the action of ponderomotive forces appear itself in the form of a flow-inhibiting effect. At the same time, inertial forces from convective acceleration contribute to the accelerated movement of fluid in flow core in the hydrodynamic initial section and inhibition within the forming boundary layer. Finally, the process of flow formation in the hydrodynamic initial section depends on the relationship between these forces. In the work, this process is characterized by the relationship between the Reynolds criterion and the Hartman criterion.

Keywords: hydrodynamic initial section, inertia forces, ponderomotive forces, Reynolds criterion, Hartman criterion, pressure drop.

References

1. Perminov, A., (2016), The Movement Of Fluids With Different Rheology In External Force Fields. Doctor of Physico-Mathematical Sciences.
2. Perminov, A. and Nikulin, I., (2016), Mathematical Model of the Processes of Heat and Mass Transfer and Diffusion of the Magnetic Field in an Induction Furnace. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, vol. 2, no. 89, pp.397–409. <https://doi.org/10.1007/s10891-016-1389-5>
3. Nikulin, I. and Perminov, A., (2019), Mathematical modelling of frequency and force impacts on averaged metal flows in alternating magnetic field. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 128, pp.1026–1032. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.130>
4. Malekzadeh, A., Heydarinasab, A. and Dabir, B., (2011), Magnetic field effect on fluid flow characteristics in a pipe for laminar flow. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 25(2), pp.333–339. <https://doi.org/10.1007/s12206-010-1223-5>.
5. Taheri, M., (2019), The influence of magnetic field on the fluid flow in the entrance region of channels: analytical/numerical solution. *SN Applied Sciences*, 1(10). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1244-3>.
6. L-Shahed, M., (2006), MHD of a fractional viscoelastic fluid in a circular tube. *Mechanics Research Communications*, 33(2), pp.261–268. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2005.02.017>
7. Nagaraju, G. and Garvandha, M., (2019), Magneto-hydrodynamic viscous fluid flow and heat transfer in a circular pipe under an externally applied constant suction. *Heliyon*, vol. 2, no.5, p.e01281. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01281>
8. Kakarantzas, S., Benos, L., Sarris, I., Knaepen, B., Grecos, A. and Vlachos, N., (2017), MHD liquid metal flow and heat transfer between vertical coaxial cylinders under horizontal magnetic field. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 65, pp. 342–351. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01281>
9. Sheikholeslami, M., Jalili, P. and Ganji, D., (2018), Magnetic field effect on nanofluid flow between two circular cylinders using AGM. *Alexandria Engineering Journal*, 57(2), pp.587–594. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.02.010>
10. Tyabin, N.V. and Tsentovsky, E.M. (1964), Proceedings of the Institute of Chemical Technology, no. 32.
11. Shercliff, J. (1965), A Textbook Of Magneto-hydrodynamics. Oxford [etc.]: Pergamon Press.
12. Vatazhin, A., Liubimov, G. and Regirer, S., (1970), *Magnitogidrodinamicheskie techeniia v kanalakh*, Nauka, Moscow, Russian.
13. Qian, S. and Bau, H., (2009), Magneto-hydrodynamics based microfluidics. *Mechanics Research Communications*, 36(1), pp.10–21. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2008.06.013>
14. Weng, H., (2013), Hydrodynamic Modeling of Targeted Magnetic-Particle Delivery in a Blood Vessel. *Journal of Biomechanical Engineering*, 135(3). <https://doi.org/10.1115/1.4023137>
15. Christiansen, E., Jensen, G. and Tao, F. (1966), Laminar flow heat transfer. *AICHE Journal*, 12(6), pp.1196–1202.
16. Yakhno, O., Matiega, V. and Krivosheev, V. (2004), *Hydrodynamic initial section*. Chernivtsi: Zelena Bukovyna. Ukraine.
17. McKelvey, J., Zelenev, U., Pašinin, B. and Rodin, E., (1965), Pererabotka Polimerov, Izdatel'stvo "Himiâ", Moscow, Russian.
18. Shi-I, Bay, (1964), Magnetic gas dynamics and plasma dynamics. (version by V.P. Korobeynikov, P.I. Chushkin; editor A.G. Kulikovskiy), Moskva: Mir. 301p.
19. Yakhno, O., Mamedov, A. and Stas, S., (2019), Influence of transverse magnetic field on flow destabilization in the channel, *Bulletin of the National Technical University "KhPI", Series: Hydraulic machines and hydraulic units*, 0(1), pp.25–29. <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2019.1.04>