

УДК 532.522.2

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ СТРУИ МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В ПЕРПЕНДИКУЛЯРНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Диканский Ю.И., Борисенко О.В., Закирян А.Р.

*Институт естественных наук Северо-Кавказского федерального университета,
Ставрополь, e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru*

В работе представлены результаты экспериментального исследования неустойчивости и распада вертикальной струи магнитной жидкости под действием перпендикулярного струе внешнего однородного стационарного магнитного поля. Показано, что воздействие перпендикулярного магнитного поля стимулирует развитие неустойчивости. Измерена длина непрерывного участка струи в зависимости от величины напряженности магнитного поля и скорости струи. Показано, что в магнитном поле струя деформируется, принимая волнистую конфигурацию. Измерена амплитуда деформации струи (максимальное отклонение от вертикали) в зависимости от напряженности магнитного поля и скорости струи. Развита теория неустойчивости струи магнитной жидкости в перпендикулярном магнитном поле в приближении линейных волн. Проведено сопоставление экспериментальных и теоретических данных, демонстрирующее удовлетворительное согласие теории и результатов измерений.

Ключевые слова: магнитная жидкость, струя, неустойчивость, магнитное поле

INSTABILITY OF A MAGNETIC FLUID JET IN A PERPENDICULAR MAGNETIC FIELD

Dikansky Y.I., Borisenko O.V., Zakinyan A.R.

*Institute of Natural Sciences, North-Caucasian Federal University,
Stavropol, e-mail: zakinyan.a.r@mail.ru*

The results of experimental investigation of instability and breakup of a vertical magnetic fluid jet under the action of a perpendicular external stationary uniform magnetic field are presented in the article. It is shown that the action of a perpendicular magnetic field stimulates the instability development. The length of the uninterrupted jet section was measured as a function of the magnetic field strength and the jet velocity. It is shown that in a magnetic field the jet deforms taking undulate configuration. The jet deformation amplitude (the maximal deflection from a vertical) was measured as a function of the magnetic field strength and the jet velocity. The theory of the instability of a magnetic fluid jet in a perpendicular magnetic field is developed in the linear wave approximation. The comparison of the experimental and theoretical data demonstrating the satisfactory agreement of the theory and the measured results is performed.

Keywords: magnetic fluid, jet, instability, magnetic field

Исследования струйных течений жидкостей, имеющих свободную поверхность, а также распада жидких струй на капли представляют собой актуальную научную проблему в виду наличия широкого спектра практических приложений данных явлений. Существует множество работ, посвященных изучению неустойчивости и распада струй [1–4]. Использование в подобных исследованиях магнитных жидкостей открывает новые возможности для изучения механизмов протекания данных явлений и позволяет обнаружить их новые аспекты благодаря возможности воздействовать внешним магнитным полем на жидкую струю. Ранее были выполнены некоторые работы, которые касались исследования струй магнитных жидкостей под действием параллельного струе магнитного поля [5, 6]. Было показано, что воздействие магнитного поля приводит к стабилизации такой струи. В данной работе исследуются особенности неустойчивости струи магнитной жидкости, находящейся под действием перпендикулярного ей внешнего магнитного поля.

Экспериментальные исследования и их результаты

Схема применявшейся экспериментальной установки представлена на рис. 1. Однородное магнитное поле формировалось с помощью катушек Гельмгольца 1, позволяющих получать горизонтально направленное однородное магнитное поле напряженностью до 110 Э. В пространство между катушками вводилась струя магнитной жидкости 2 так, что ось струи перпендикулярна вектору напряженности магнитного поля. Скорость истечения струи регулировалась путём перемещения с помощью электродвигателя 5 поршня 3 вдоль резервуара с магнитной жидкостью 4. Диаметр струи составлял 2 мм, магнитная восприимчивость магнитной жидкости – 9,5. Поведение струи фиксировалось с помощью скоростной видеокамеры при частоте съёмки 300 кадров в секунду. На рис. 2 представлены мгновенные снимки струи в магнитном поле напряжённостью 60, 70, 80 и 90 Э.

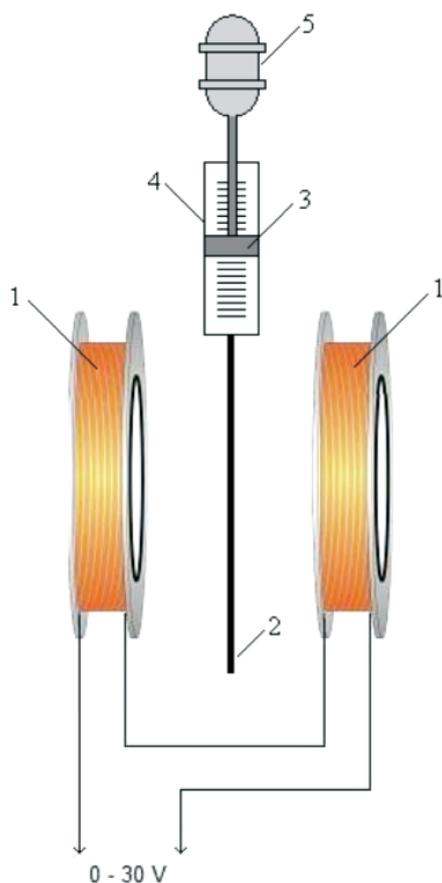


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

В ходе проведения эксперимента установлено, что под действием магнитного поля вдоль поверхности струи развивается

неустойчивость, приводящая к трансформации формы струи от цилиндрической к синусоидальной. При этом распад струи на капли происходит тем раньше, чем больше напряжённость магнитного поля и меньше скорость течения струи.

На рис. 3 и 4 графически представлены экспериментально полученные зависимости максимального отклонения и длины линейного участка струи от напряжённости магнитного поля при разных значениях скорости течения струи. Как следует из рисунков, с ростом скорости течения величина максимального отклонения струи от вертикали и длина линейного участка струи возрастают.

Анализ и обсуждение результатов

Будем рассматривать движение невязкой несжимаемой магнитной жидкости. Движение магнитной жидкости в магнитном поле описывается уравнением Навье–Стокса с добавлением в правой части магнитной силы, действующей на единицу объема жидкости:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}, \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_m + \mathbf{F}_v, \quad (1)$$

где \mathbf{F}_v – сила вязкого трения, действующая на единицу объема жидкости. Учтем также уравнение разрывности и уравнения магнитного поля:

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0; \quad \operatorname{rot} \mathbf{H} = 0; \quad \operatorname{div} \mathbf{B} = 0;$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 (\mathbf{H} + \mathbf{M}); \quad \mathbf{M} = \chi \mathbf{H}. \quad (2)$$

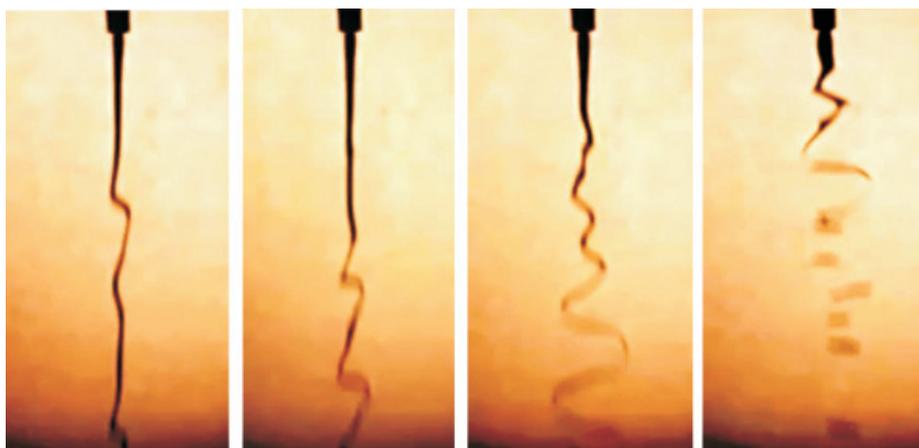


Рис. 2. Мгновенные фотографии струи в магнитном поле

Граничные условия для векторов поля имеют вид:

$$\begin{aligned} \left[\mathbf{n}^{(2,1)}, (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) \right] &= 0; \\ \left(\mathbf{n}^{(2,1)}, (\mathbf{B}_1 - \mathbf{B}_2) \right) &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнение баланса давления на поверхности струи:

$$n_i^{(1,2)} \left(T_{ij}^{(2)} - T_{ij}^{(1)} \right) = 2K \sigma n_j^{(1,2)}, \quad (4)$$

где n – нормаль к поверхности; T_{ij} – тензор напряжений; K – кривизна поверхности; σ – межфазное натяжение.

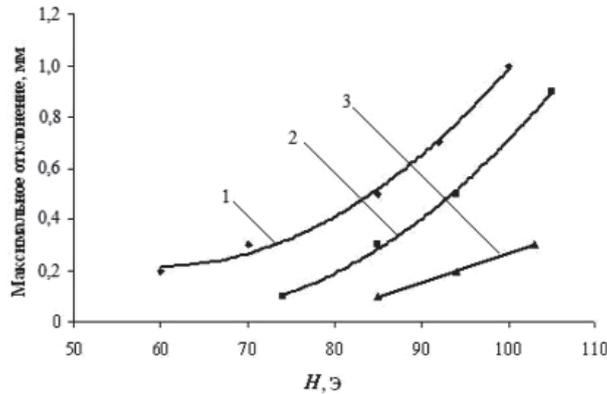


Рис. 3. Зависимость максимального отклонения струи от напряжённости магнитного поля при разной скорости течения струи: кривая 1 – 2,4 мм/с; кривая 2 – 4 мм/с; кривая 3 – 6 мм/с

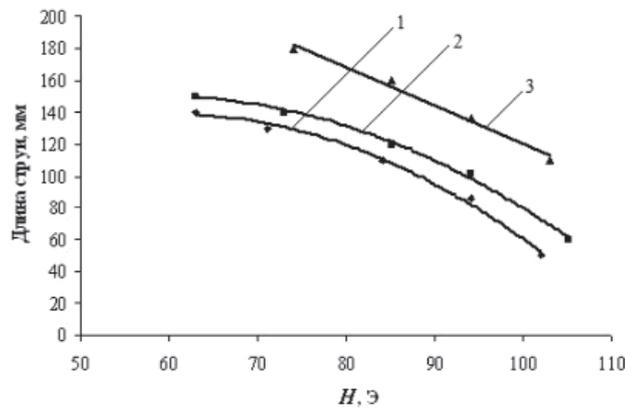


Рис. 4. Зависимость длины линейного участка струи от напряжённости магнитного поля при разной скорости течения струи: кривая 1 – 2,4 мм/с; кривая 2 – 4 мм/с; кривая 3 – 6 мм/с

Будем рассматривать малые гармонические возмущения поверхности струи. Тогда, решая систему уравнений (1)–(4)

в цилиндрических координатах, получим дисперсионное соотношение для возмущений в виде:

$$\omega = \frac{u_0 k + \sqrt{u_0^2 k^2 + 4A_0}}{2};$$

$$A_0 = \frac{I_1(kr_0) - kr_0 I_2(kr_0)}{\rho r_0^2 I_1(kr_0)} \left\{ 4\mu_0 \mu H_0^2 \frac{\mu - 1}{(\mu + 1)^3} \times \left(\frac{2}{\mu + 1} - \mu \sqrt{2 \left[\left(\frac{\mu - 1}{\mu + 1} \right)^2 + 1 \right]} + \sigma r_0 k^2 \right) \right\}. \quad (5)$$

Волновое число неустойчивости k^* можно найти из условия $\partial\omega/\partial k = 0$. Подставляя k^* в (5) найдем частоту возмущений ω^* . Длину струи можно оценить по выражению

$$L \approx u_0 / \omega^*,$$

где u_0 – скорость струи. Соответствующий расчет приведен на рис. 5, где представлено сопоставление теоретических и экспериментальных данных.

Как видно, наблюдается удовлетворительное согласие эксперименталь-

ных и теоретических данных. Полученные результаты свидетельствуют о том, что воздействие перпендикуляр-

ного магнитного поля стимулирует развитие неустойчивости струи магнитной жидкости.

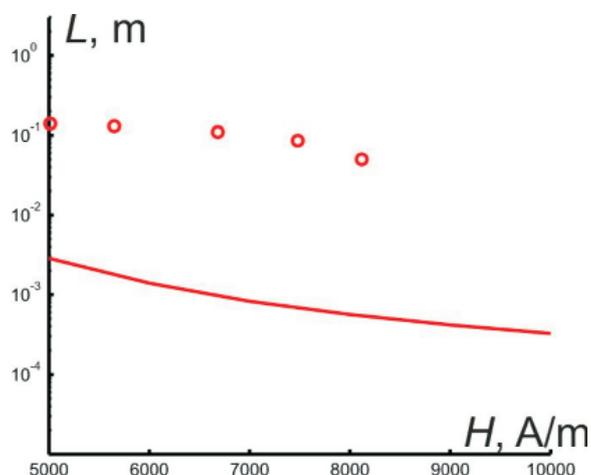


Рис. 5. Зависимость длины струи от напряженности магнитного поля: линия – теоретический расчет, точки – экспериментальные данные

Работа выполнена при частичной поддержке гранта Президента РФ МК–6053.2012.2, а также при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ведомственной аналитической научно-технической программы «Развитие научного потенциала высшей школы».

Список литературы/References

1. Eggers J. Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows // *Rev. Mod. Phys.*, 1997, Vol. 69, pp. 865–929.
2. Moseler M., Landman U. Formation, stability and breakup of nanojets // *Science*, 2000, Vol. 289, pp. 1165–1169.
3. Kalaaji A., Lopez B., Attané P., Soucemarianadin A. Breakup length of forced liquid jets // *Phys. Fluids*, 2003, Vol. 15, pp. 2469–2480.

4. Utada A.S., Fernandez-Nieves A., Stone H.A., Weitz D.A. Dripping to jetting transitions in coflowing liquid streams // *Phys. Rev. Lett.*, 2007, Vol. 99, 094502.

5. Korovin V.M. The capillary instability of a thin cylinder of viscous ferrofluid in a longitudinal magnetic field // *J. Appl. Math. Mech.*, 2001, Vol. 65, pp. 243–251.

6. Sudo S., Ikohagi T., Nishiyama H., Katagiri K. Dynamic behavior of a magnetic fluid jet injected from a vibrating nozzle // *J. Magn. Magn. Mater.*, 1999, Vol. 201, pp. 306–309.

Рецензенты:

Ерин К.В., д.ф.-м.н., доцент, профессор кафедры общей физики СКФУ, г. Ставрополь;

Дерябин М.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры общей физики СКФУ, г. Ставрополь.
Работа поступила в редакцию 22.11.2012.