

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ЖИДКОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО ПОЯСА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СОСУДА В УСЛОВИЯХ ГИДРОНЕВЕСОМОСТИ

А.С. Виноградова¹, Д.И. Меркулов^{1,2}, Д.А. Пелевина^{1,2}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, НИИ механики, Москва

²Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, механико-математический факультет, кафедра гидромеханики, Москва
vinogradova-as@mail.ru

Аннотация. В данной работе изучена устойчивость осесимметричной, неодносвязной поверхности несжимаемой, однородной, изотермической жидкости на внутренней поверхности цилиндрического сосуда в условиях гидроневесомости. Построена граница области устойчивости. В эксперименте роль такого жидкого пояса выполняет магнитная жидкость в магнитном поле катушки с током. Экспериментально показано, что при выключенном токе, в зависимости от объема магнитной жидкости, возможны три качественно разных положения магнитной жидкости.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-501-12011.

Введение

Встроенные клапаны, насосы и дозаторы играют важную роль и обеспечивают повышенный контроль в микрофлюидике, когда речь идет о поведении малых объемов и потоков жидкостей. В качестве таких устройств иногда используются магнитные полимеры [1], гели [2] или жидкости (коллоидные растворы ферромагнитных частиц размером около 10 нм, покрытых поверхностно-активным веществом, в немагнитной жидкости-носителе), положение которых контролируется с помощью различных магнитных полей. Магнитные поля, создаваемые внешними постоянными магнитами [3], электромагнитом [4] или линейным проводником с током [5], могут использоваться для приведения в действие клапанов на основе магнитной жидкости. В микрофлюидике часто используются цилиндрические трубочки, на внутренней поверхности которых можно расположить магнитную жидкость, выполняющую роль клапана, который открывает и закрывает поток окружающей немагнитной среды.

В связи с вышеописанным применением магнитных жидкостей в микрофлюидике, в данной работе изучена устойчивость осесимметричной, неодносвязной поверхности несжимаемой, однородной, изотермической жидкости на внутренней поверхности цилиндрического сосуда в условиях гидроневесомости. В эксперименте роль такого жидкого осесимметричного пояса выполняет магнитная жидкость в магнитном поле катушки с током. При включенном токе осесимметричная, неодносвязная поверхность магнитной жидкости находится на внутренней поверхности цилиндрического сосуда и клапан открыт. Однако при выключенном токе, в зависимости от объема магнитной жидкости, возможны три качественно разных положения магнитной жидкости (все из них получены в эксперименте), и лишь при одном из них клапан закрывается.

Теория

Пусть покоящаяся в условиях гидроневесомости жидкость образует жидкий осесимметричный пояс на внутренней поверхности цилиндрического сосуда радиуса a (рис. 1.а).

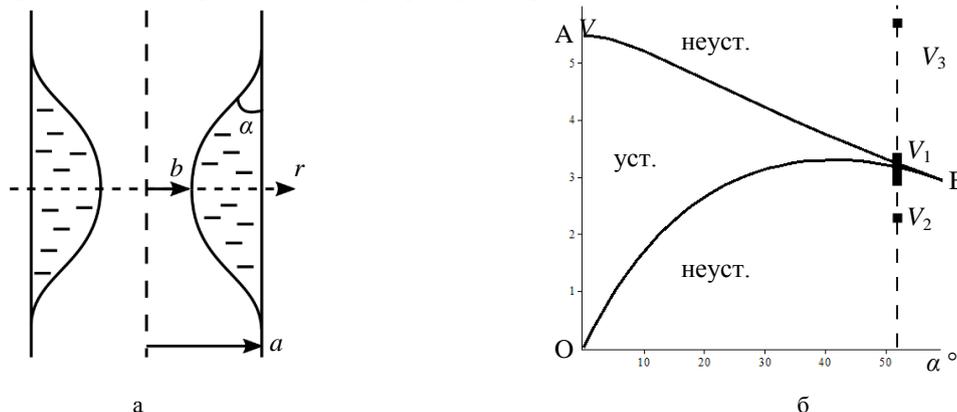


Рис. 1. (а) Жидкий осесимметричный пояс на внутренней поверхности цилиндрического сосуда в условиях гидроневесомости. (б) Граница области устойчивости OAB и используемые в эксперименте объемы V_1 , V_2 , V_3 .

Рассматриваемое осесимметричное равновесное состояние имеет экваториальную плоскость симметрии, на которой $r = b$ – минимальное расстояние от оси сосуда до жидкого пояса, а окружности контакта находятся на поверхности сосуда. Будем считать объем жидкости V и угол смачивания α известными. В [6] решена задача об устойчивости такого равновесного состояния, исходя из принципа минимума потенциальной энергии и следуя методике, изложенной в [7]. Понятно, что такое состояние представляет собой положение безразличного равновесия, так как допускает произвольные сдвиги жидкости как единого целого вдоль оси симметрии. Эти сдвиги определяются некоторыми осесимметричными возмущениями и на них приращение потенциальной энергии равно нулю. В [6] указанные возмущения игнорированы при изучении устойчивости. В [6] построена граница области устойчивости в плоскости двух параметров, определяющих равновесие: угла смачивания α и безразмерного объема $V^* = V/a^3$. При этом показано, что потеря устойчивости происходит относительно неосесимметричных возмущений, которые, по-видимому, приводят к тому, что жидкость сбивается набок.

В данной работе из уравнений гидростатики для покоящегося жидкого пояса, окружающей его жидкости и динамического соотношения на поверхности раздела двух сред получено, что форма поверхности жидкого пояса в безразмерной форме $h^*(r^*)$ имеет вид:

$$h^*(r^*) = \int_{b^*}^{r^*} \frac{G}{(1-G^2)^{1/2}} dr^*, G(r^*) = \frac{C}{r^*} \pm Br^*. \quad (1)$$

Здесь следует брать верхний (нижний) знак, когда жидкий пояс находится под (над) окружающей его жидкостью. B, C – неизвестные константы, и введены следующие безразмерные параметры: $r^* = r/a$, $h^* = h/a$, $b^* = b/a$. Далее звездочки опускаются, и параметры считаются безразмерными, если не указана размерность. На линиях контакта трех сред должно выполняться условие Юнга, которое дает следующее граничное условие: $G(r=1) = \cos \alpha$. При $r=b$ касательная к форме поверхности жидкого пояса $h(r)$ вертикальная, поэтому $G(r=b) = 1$. Из этих двух условий на функцию $G(r)$ определяются значения констант $B = (\cos \alpha - b)/(1 - b^2)$ и $C = b - Bb^2$.

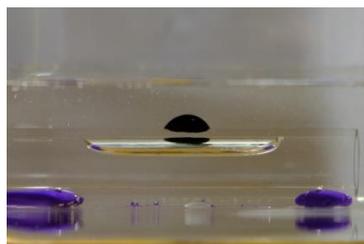
В [6] обнаружено, что устойчивые равновесные поверхности содержат внутри себя точки перегиба, поэтому в данной работе построена такая же граница области устойчивости (рис. 1.б), как и в [6], но нижеописанным способом. Граница образована кривыми ОВ и АВ; у краевых точек следующие координаты: О(0;0), А(0;5,47), В(59;2,96). Кривая ОВ определяется поверхностями, образующие которых ограничены точками перегиба, т.е. выполнено условие $G'(r=1) = 0$, из которого аналитически получается квадратное уравнение на b , одним из корней которого является $b_2 = (2 - (4 - 4\cos^2 \alpha)^{1/2}) / (2\cos \alpha) < 1$. Безразмерный объем жидкого пояса V вычисляется по формуле:

$$V(b) = 4\pi \int_b^1 \frac{1-r^2}{2} \frac{G}{(1-G^2)^{1/2}} dr. \quad (2)$$

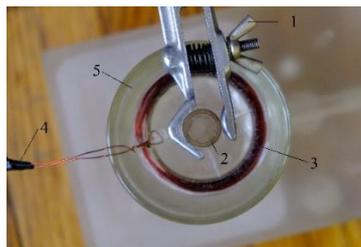
Кривая АВ определяется численно из условий $V'(b) = 0$, $V''(b) < 0$, то есть соответствует максимальным объемам жидкого пояса, которые можно поместить на внутреннюю поверхность цилиндрического сосуда.

Эксперимент

Чтобы реализовать условия гидроневесомости в эксперименте, подобраны две несмешивающиеся жидкости одинаковой плотности: водный раствор глицерина и магнитная жидкость на основе керосина. Угол смачивания $\alpha = 52^\circ$ вычисляется по экспериментальной фотографии (рис. 2.а) в точке трехфазного контакта: цилиндрическая мензурка из прозрачного органического стекла, магнитная жидкость, глицерин. Построена экспериментальная установка для исследования устойчивости осесимметричной, неодновязной поверхности магнитной жидкости на внутренней поверхности мензурки в условиях гидроневесомости. В состав установки (рис. 2.б) входят: 1) штатив; 2) цилиндрическая мензурка из прозрачного органического стекла с одним открытым и одним закрытым концом; 3) катушка с током вокруг мензурки; 4) источник питания; 5) сосуд с холодной водой для охлаждения катушки. Экспериментально подобраны величины тока в катушке: $I = 8 \div 10$ А, необходимые для формирования осесимметричного пояса магнитной жидкости на внутренней поверхности мензурки в случае гидроневесомости, при которых катушка не очень сильно нагревается. В мензурку с внутренним радиусом $a = 5,6$ мм наливается глицерин, и при включенном в катушке токе на внутреннюю поверхность мензурки с помощью шприца наносится осесимметричный пояс магнитной жидкости. Далее поле выключается.



а



б

Рис. 2. (а) Экспериментальная фотография, по которой определяется угол смачивания.
(б) Фотография экспериментальной установки.

При угле смачивания $\alpha = 52^\circ$ граница области устойчивости (рис. 1.б) дает следующий диапазон объемов: $V = 0,557 \div 0,567$ мл. Проведена серия экспериментов с разными объемами магнитной жидкости. Показано, что при выключенном токе, в зависимости от объема магнитной жидкости, возможны три качественно разных положения магнитной жидкости:

1) Объем V_1 , лежащий в диапазоне $0,5 \div 0,6$ мл, который при выключенном токе остается осесимметричным (рис. 3.а, 3.б). Здесь приведен данный диапазон объемов, т.к. на внутреннюю поверхность мензурки осесимметричный пояс магнитной жидкости наносится с помощью шприца, у которого одно деление шкалы равно 0,1 мл. Обработка экспериментальной фотографии жидкого пояса (рис. 3.б) при $I = 0$ дает расстояние $b = 2,28$ мм, которое по формуле (2) соответствует объему $V = 0,526$ мл. Этот объем близок к предсказанному теорией диапазону объемов, при котором жидкий пояс устойчив.

2) Объем $V_2 = 0,4$ мл, который при выключенном токе сбивается набок (рис. 3.в, 3.г). Данный объем лежит ниже границы области устойчивости (рис. 1.б).

3) Объем $V_3 = 1$ мл, который при выключенном токе стягивается в перемычку, перекрывающую поперечное сечение мензурки (рис. 3.д, 3.е). Данный объем лежит выше границы области устойчивости (рис. 1.б).

Таким образом, проведенные эксперименты хорошо согласуются с полученной теоретически границей области устойчивости жидкого осесимметричного пояса на внутренней поверхности цилиндрической мензурки в условиях гидроневесомости (рис. 1.б).

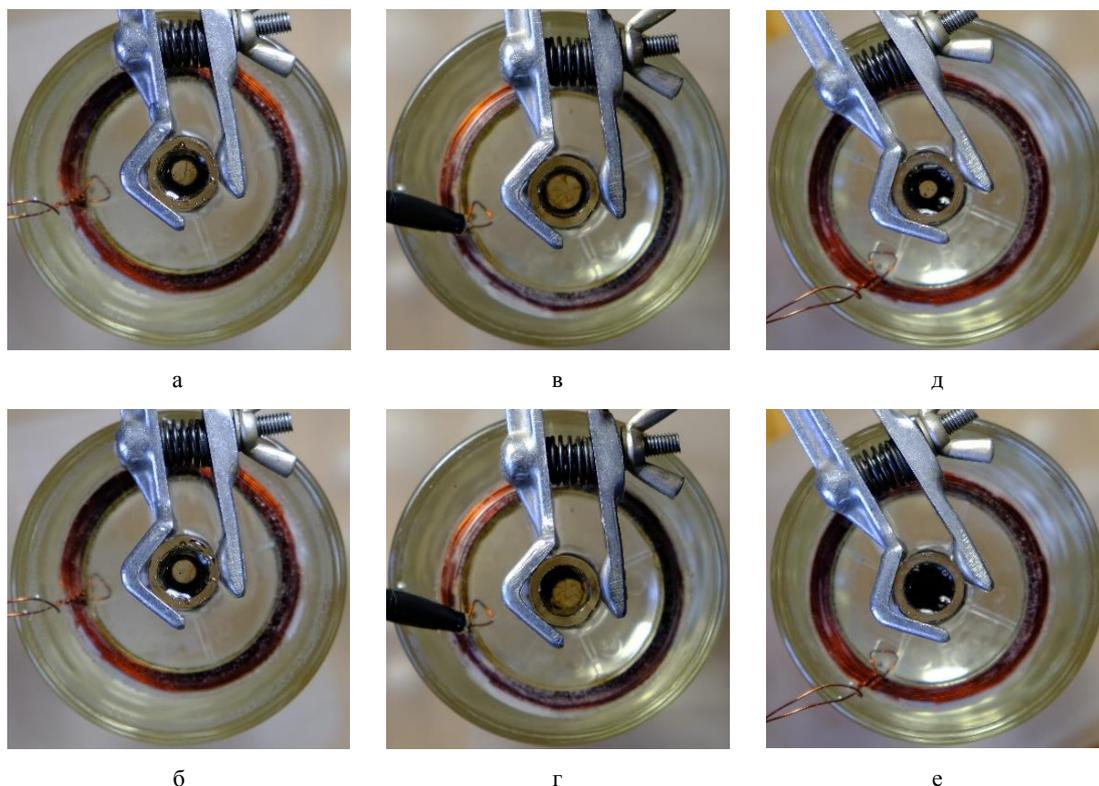


Рис. 3. Экспериментальные фотографии магнитной жидкости (а) объемом V_1 при $I \neq 0$, (б) объемом V_1 при $I = 0$; (в) объемом V_2 при $I \neq 0$, (г) объемом V_2 при $I = 0$; (д) объемом V_3 при $I \neq 0$, (е) объемом V_3 при $I = 0$.

Заключение

Проведенное теоретическое и экспериментальное исследование устойчивости жидкого осесимметричного пояса на внутренней поверхности цилиндрического сосуда в условиях гидроневесомости показало, что жидкий пояс из магнитной жидкости в магнитном поле катушки с током может выполнять роль клапана, который открывает и закрывает поперечное сечение цилиндрических трубочек, часто используемых в микрофлюидике.

Литература

1. S.E. Chung, J. Kim, S.-E. Choi, L.N. Kim, S. Kwon // J. Microelectromech. Syst. 2011. Vol. 20(4). Pp. 785-787.
2. S. Ghosh, C. Yang, T. Cai, Z. Hu, A. Neogi // J. Phys. D: Appl. Phys. 2009. Vol. 42. 135501.
3. H. Hartshorne, C.J. Backhouse, W.E. Lee // Sens. Actuators B. 2004. Vol. 99. Pp. 592-600.
4. T.I. Becker, V.A. Naletova, V.A. Turkov, K. Zimmermann // J. Fluid Mech. 2017. Vol. 830. Pp. 326-349.
5. A.S. Vinogradova, V.A. Turkov, V.A. Naletova // J. Magn. Magn. Mater. 2019. Vol. 470. Pp. 18-21.
6. Л.А. Слободжанин. Задачи устойчивости равновесия жидкости, возникающие в вопросах космической технологии. – В кн.: Гидромеханика и тепло-массообмен в невесомости. М.: Наука, 1982. С. 9-24.
7. Гидромеханика невесомости / Под ред. А.Д. Мышкиса. М.: Наука, 1976. 504 с.

ON THE STABILITY OF A FLUID AXISYMMETRIC BAND ON THE INNER SURFACE OF A CYLINDRICAL VESSEL AT NEUTRAL BUOYANCY

Alexandra Sergeevna Vinogradova ¹, Dmitrii Igorevich Merkulov ^{1,2},
Daria Andreevna Pelevina ^{1,2}

¹*Lomonosov Moscow State University, Institute of Mechanics, Moscow*

²*Lomonosov Moscow State University, Faculty of Mechanics and Mathematics, Department of Fluid Mechanics, Moscow*

vinogradova-as@mail.ru

Abstract. In this paper, the stability of an axisymmetric, non-simply connected surface of an incompressible, homogeneous, isothermal fluid on the inner surface of a cylindrical vessel is studied at neutral buoyancy. The boundary of the stability region is defined. In the experiment, the role of such fluid band is performed by a magnetic fluid in the magnetic field of an electromagnetic coil. It is experimentally shown that when the current is turned off, three qualitatively different positions of the magnetic fluid are possible, depending on the magnetic fluid volume.

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant No. 18-501-12011).

Доклад представлен на

Подсекция II - 1. Гидродинамика

или

Подсекция II - 4. Физико-химическая механика сплошных сред.