

О КОНВЕКЦИИ МАГНИТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ В ВЕРТИКАЛЬНОМ СЛОЕ

Г. Л. Лосев, А. С. Сидоров

Пермский государственный национальный исследовательский университет,
614990, Пермь, Букирева, 15

Магнитные жидкости (МЖ) – это коллоидные системы, состоящие из ферромагнитных или ферримагнитных частиц взвешенных в жидкостиносителе (обычно органический растворитель или вода) и стабилизированных оболочкой из поверхностно-активного вещества (ПАВ). Характерный размер магнитных частиц составляет 10 нм, что соответствует однодоменному состоянию частицы и определяет суперпарамагнитное поведение системы [1, 2].

Сочетание свойств МЖ позволяет использовать все преимущества жидкого материала (малый коэффициент трения в контакте с твердым телом, возможность проникать в микрообъемы, смачивание практически любых поверхностей и др.), в то же время, удерживая МЖ в нужном месте устройства под действием магнитного поля [3, 4]. Тем не менее, технологическое применение магнитных жидкостей сопряжено с рядом сложностей: нелинейные реологические кривые сложная взаимозависимость концентрации магнитных частиц, температурных и магнитных полей, а так же полей скорости течения требует тщательного и систематического исследования поведения жидкости при проектировании и изготовлении устройств.

Данная работа посвящена автоколебательному режиму неустойчивости основного подъемно-опускного течения МЖ в вертикальном слое, обогреваемом сбоку.

Экспериментальная установка (рис. 1) представляет собой конвективную камеру, состоящую из теплообменника и рабочей области (1) в форме параллелепипеда, заполненной магнитной жидкостью. Задняя стенка (2), представляет собой алюминиевую пластину толщиной 20 мм, в которой сделаны каналы для циркуляции воды, подаваемой термостатом. Передняя стенка (3) изготовлена из текстолита толщиной 0.5 мм и фиксируется дополнительной крепёжной рамкой (4) из органического стекла. Температура текстолита поддерживается равной комнатной температуре в лаборатории. Наконец, рамка из органического стекла (5) служит в качестве торцов камеры и задает толщину слоя. В опытах использовалась конвективная камера с размерами рабочей области $70 \times 6 \times 255 \text{ мм}^3$. В ходе эксперимента ведется наблюдение за полем температуры на текстолитовой стенке с помощью инфракрасной камеры.

На рис. 2 представлено первичное подъемно-опускное течение термогравитационной природы осложненное вторичными вихрями в МЖ на основе керосина. Опыты проводились при установленном перепаде

температуры между алюминиевым теплообменником и текстолитовой пластиной с точностью 5 %. Перед началом эксперимента магнитная жидкость перемешивается конвективным течением при значительном (до 30 K) перепаде температуры в поле постоянного магнита.

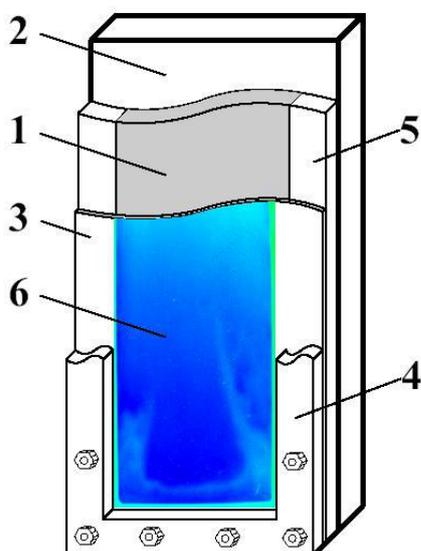


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – полость с магнитной жидкостью, 2 – алюминиевый теплообменник, 3 – текстолитовая пластина, 4 и 5 – рамки из органического стекла, 6 – поле температур, полученное при помощи инфракрасной камеры.

При перепаде температуры ~ 5 K основное подъемно-опускное течение сменяется колебательным режимом, при котором в нижней части у нагретой стенки образуется вторичный вихрь (кадр 1). Граница между двумя течениями со временем движется вверх, а затем становится неустойчивой (кадр 2) и разрушается (кадр 3 – 5). Наиболее ярко разрушение вторичного вихря наблюдается у торцов конвективной камеры (кадры 3, 4). После полного разрушения (кадр 6) вихрь начинает формироваться вновь, совершая своеобразные колебания (возникновение-рост-разрушение). Характерный период происходящих колебаний составляет около 4 часов.

В исследуемой области температур обогрева слоя и при отсутствии внешних магнитных полей, устойчивость подъемно-опускного течения сменяется колебательным режимом конвекции из-за концентрационных неоднородностей коллоидной системы [5 – 7].

Чтобы исключить влияние расслоения жидкости носителя (как известно керосин является смесью углеводородов определенной фракции нефти и может расслаиваться под действием термодиффузии его составляющих) были проведены опыты с магнитной жидкостью на основе ундекана – однокомпонентного предельного углеводорода. В этом случае причиной конвективных автоколебаний в магнитной жидкости может быть расслоение коллоидного раствора под действием вертикального

наведенного градиента температуры, седиментация и термодиффузионное расслоение магнитных частиц и агрегатов.

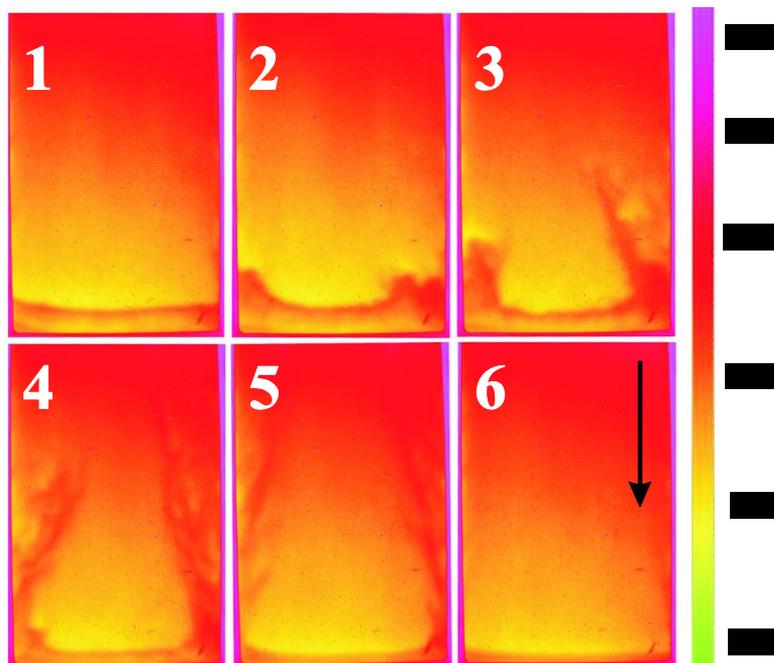


Рис. 2. Эволюция вторичного колебательного режима течений. Время на кадрах: 0, 10, 16, 19, 21, 30 минут от начала съемки соответственно (~ 2х часов от начала эксперимента). Перепад температуры $\Delta T = 5$ К. Направление вектора силы тяжести указано черной стрелкой.

Последний фактор требует отдельного описания в силу специфики течения: при обогреве вертикального слоя сбоку, термодиффузия увлекает магнетитовые частицы к холодной стенке и создает горизонтальный градиент концентрации. Частицы, скопившиеся у холодной стенки, увлекаются вниз первичным опускным течением и скапливаются в нижней части слоя, что порождает уже вертикальный градиент концентрации.

Были измерены неоднородности концентрации магнитных частиц при автоколебательном режиме течения. В качестве меры концентрации магнитных частиц рассматривалась их объемная доля

$$\varphi = \frac{\rho_{МЖ} - \rho_{ундекан}}{\rho_{магнетит} - \rho_{ундекан}},$$

где ρ_N – плотность N-ой фазы.

Измерения плотности проб магнитной жидкости, взятых из нижней ($1.4 \pm 0.1 \text{ г/см}^3$) и верхней ($1.1 \pm 0.1 \text{ г/см}^3$) частей кюветы, позволяют оценить перепад концентрации магнитных частиц в жидкости $\Delta\varphi = 7\%$ в вертикальном направлении. Пробы жидкости производились шприцем стерильным одноразовым, объемом 10 мл. Для измерения плотности использовался пикнометр стеклянный объемом 5.0 мл и массой 4.165 г. Масса пробы магнитной жидкости определялась при помощи электронных весов OHAUS Adventure (точность измерений 0.001 г).

Найденная объёмная доля магнитных частиц позволила оценить влияние концентрационного и теплового механизма стратификации жидкости (а следовательно и возбуждения конвекции) в вертикальном направлении. Мерой интенсивности влияния послужили концентрационное и тепловое числа Рэлея, определяемые формулами (1) и (2) и равные, соответственно, $Ra_C \sim 10^5$ и $Ra_T \sim 10^2$ (при расчетах использовались значения параметров: $g = 9.81 \text{ м/с}^2$, $\beta_T = 10^{-3} \text{ К}^{-1}$, $\beta_C = 5.1$, $\nu = 9.0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $a = 1.7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $d = 6.0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $L = 2.55 \cdot 10^{-1} \text{ м}$, $\Delta T = 4 \text{ К}$, $\Delta C = 7 \cdot 10^{-2}$).

$$Ra_T = \frac{g\beta_T}{\nu a} \cdot d^4 \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

$$Ra_C = \frac{g\beta_C}{\nu a} \cdot d^4 \cdot \frac{\Delta C}{L} \quad (2)$$

Здесь g – ускорение силы тяжести, β_T и β_C – тепловой и концентрационный объёмные коэффициенты, ν – кинематическая вязкость, a – температуропроводность, d – толщина слоя, L – высота слоя, ΔT – характерный перепад температуры в вертикальном направлении, ΔC – характерный перепад концентрации магнитных частиц в вертикальном направлении.

Таким образом, проведенные измерения плотности образцов МЖ подтверждают концентрационную природу конвективных автоколебаний. Показано, что в отличие от однокомпонентных жидкостей в МЖ при перепадах температуры в несколько градусов опасными становятся периодические в пространстве и времени режимы течений.

Список литературы

1. Фертман В. Е. Магнитные жидкости. Мн.: Выш. шк., 1988. 184 с.
2. Шлиomis М. И. Магнитные жидкости // УФН. 1974. Т. 112, № 3. С. 427–458.
3. Фертман В. Е. Магнитные жидкости – естественная конвекция и теплообмен. Мн.: Наука и техника, 1978. 206 с.
4. Орлов Д. В., Михалев Ю. О., Мышкин Н. К. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 268 с.
5. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука, 1989. 320 с.
6. Bozhko A. A., Putin G. F., Sidorov A. S., Suslov S. A. Convection in a vertical layer of stratified magnetic fluid // Magnetohydrodynamics. 2013. Vol. 49. N. 1. P. 143–152.
7. Глухов А. Ф., Демин В. А. Седиментация частиц в ферроколлоидах с учетом динамических граничных условий // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 2. С. 189–194.