

УДК 538.74

А.Н. Вислович, доцент; А.Б. Сухоцкий, ассистент

МЕХАНОМАГНИТНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ЛЕВИТАЦИИ НЕМАГНИТНОЙ ПЛАСТИНЫ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

It is research of correlation between migrations of a nonmagnetic plate, which immersed in a magnetic fluid, force, which operates on a plate, and perturbations in the enclosing tank with a fluid space.

На немагнитное тело, помещенное в сосуд с магнитной жидкостью во внешнем магнитном поле, действует сила, выталкивающая тело из области сильного поля в область более слабого. При этом в жидкости и в окружающем ее пространстве возникают возмущения поля, которые зависят от положения тела и силы. Взаимосвязь механических и магнитных величин в этой ситуации мы называем механомагнитным эффектом. В [1, 2] рассмотрена модельная ситуация, для которой получено аналитическое уравнение механомагнитного эффекта для жидкости с линейным законом намагничивания. На практике линейный закон намагничивания имеет ограниченную область применимости – для напряженности поля, не превышающей значения порядка 5 кА/м. В настоящей работе проведены экспериментальное и численное исследования механомагнитного эффекта для нелинейно намагничивающейся жидкости.

1. Описание экспериментальной установки.

На рис. 1 представлена схема идеализированной установки для численного изучения механомагнитного эффекта. Намагничивающаяся жидкость 2 находится в прямоугольном сосуде с немагнитными стенками. Высота жидкости в сосуде l_c поддерживается постоянной. Сосуд устанавливается на источник поля 1, собранный из прямоугольных постоянных магнитов с чередованием направления их намагниченности. Компоненты поля системы изменяются вдоль оси x по гармоническому закону и не меняются вдоль оси z , а модуль напряженности поля экспоненциально изменяется по оси z :

$$H^{(0)} = H_a e^{-kz} (i \sin x + k \cos x),$$

где H_a – напряженность поля на поверхности источника.

Внутри сосуда с жидкостью помещено немагнитное тело 3 в виде пластины толщиной l_b , которое может перемещаться под действием нагрузки. Сосуд разделен телом на две полости. Нижняя полость толщиной l расположена между телом и источником, верхняя полость толщиной l_1 – между телом и верхней поверхностью сосуда. При перемещении тела жидкость может перетекать из одной полости в другую, при этом l и l_1 связаны между собой зависимостью $l + l_b + l_1 = l_c$. Возмущения магнитного поля, возникающие при перемещении тела, измеряются датчиком 4, расположенным в области между источником поля и кюветой. Датчик измеряет максимальное значение нормальной составляющей напряженности поля.

Реальная установка, на которой проводились измерения, детально описана в работе [4]. Она отличается от представленной на рис. 1 только наличием двух немагнитных направляющих стержней; с помощью которых перемещалось тело и измерялась действующая на него магнитная сила. В качестве намагничивающейся жидкости использовалась коллоидная взвесь частиц магнетита в трансформаторном масле с законом намаг-

ничивания $M = M_s H / (H + H_h)$ и характеристическими параметрами: $M_s = 35,40$ кА/м, $H_h = 17,12$ кА/м.

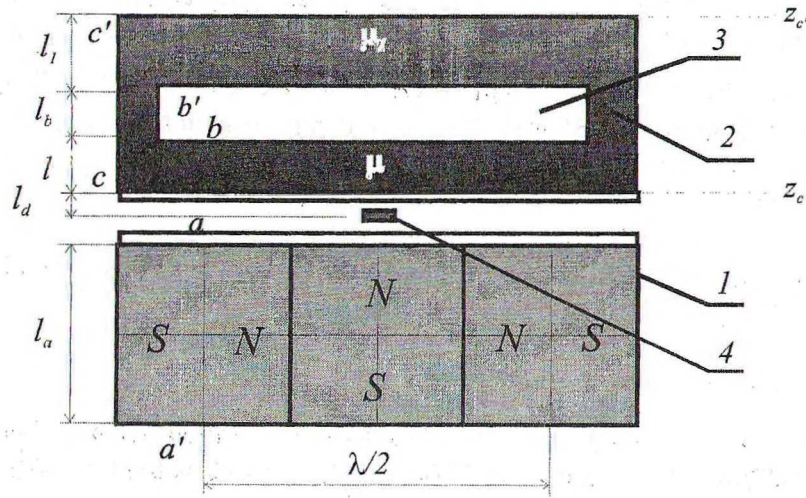


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости силы и напряженности поля, измеряемой датчиком.

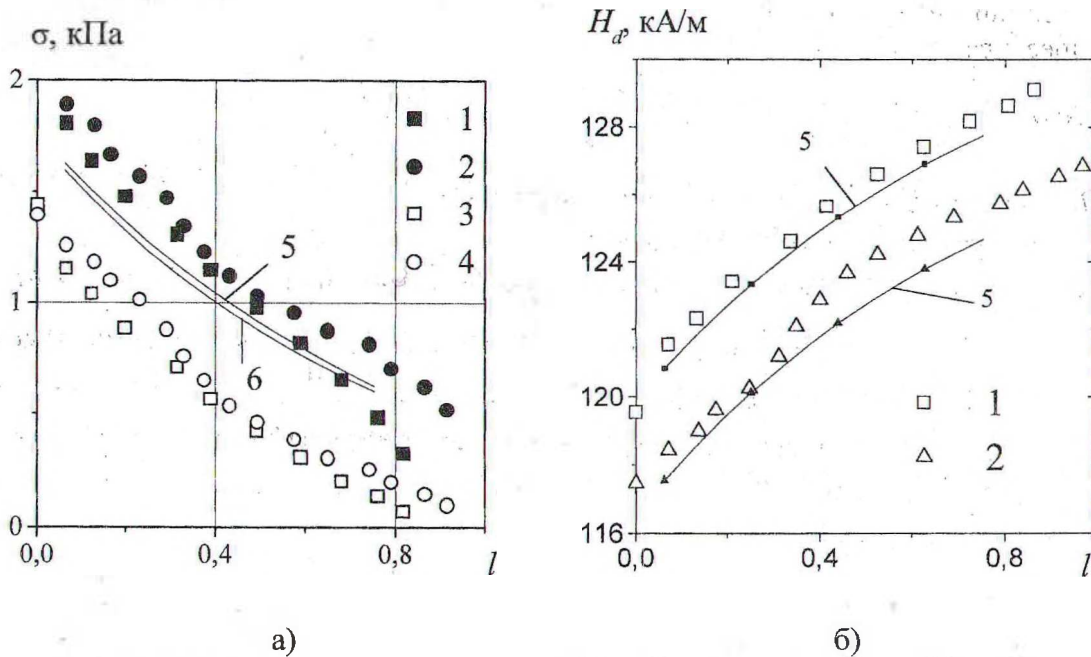


Рис. 2. Зависимости силы (а) и показаний датчика (б) от расстояния пластины до дна сосуда: 1, 2 – эксперимент; 5 – расчет для σ_b ; 3, 4 – $\Delta\sigma^a$, определенное по измеренным возмущениям поля; 6 – $\Delta\sigma^a$, определенное по расчетным возмущениям поля

2. Теория механомагнитного эффекта. Рассмотрим систему из трех тел: полностью погруженное в жидкость немагнитное тело (относящиеся к нему величины будем обозначать индексом «b»), сосуд, удерживающий магнитную жидкость («с»), и источник

внешнего магнитного поля («а»). Вследствие третьего закона Ньютона сила, действующая на магнит, равна по величине и противоположна по знаку сумме сил, действующих на сосуд с жидкостью и тело. Для геометрии, представленной на рис. 1, эти силы имеют только z -составляющую. Кроме того, удобно рассматривать силы, приходящиеся на единицу площади магнита (σ^a), тела (σ^b) и сосуда (σ^c). Таким образом, $\sigma_z^a = -(\sigma_z^b + \sigma_z^c)$. Поскольку $\sigma_z^a, \sigma_z^b > 0, \sigma_z^c < 0$ для модулей этих сил имеем

$$\sigma^a = \sigma^c - \sigma^b. \quad (1)$$

В отсутствие тела уравнение (1) принимает вид $\sigma^{a*} = \sigma^{b*}$. Вычитая из этого равенства (1), находим

$$\Delta\sigma^a = \sigma^b + \Delta\sigma^c, \quad (2)$$

где $\Delta\sigma^c = \sigma^{c*} - \sigma^c, \Delta\sigma^a = \sigma^{a*} - \sigma^a$ — изменения магнитного веса жидкости и приложенной к источнику поля силы при погружении пластины в жидкость.

Теория расчета σ^b детально рассмотрена в [3, 4]. Там же приведены результаты экспериментальных исследований. Сила σ^c рассчитывается аналогично σ^b . Сила σ^a представляет собой среднее по x значение максвелловских напряжений в области (a, c) между кюветой и магнитом. Принимая во внимание, что результирующее поле равно суперпозиции внешнего поля $H^{(o)}$ и поля, индуцированного жидкостью, и разложив последнее в ряд Фурье, получим

$$\sigma^a = \mu_o \langle H_z^2 - H_x^2 \rangle = \mu_o H^{(o)} H_1', \quad \Delta\sigma^a = \mu_o H^{(o)} \Delta H_1', \quad (3)$$

где H_1' — амплитуда основной гармоники поля жидкости, $\Delta H_1' = H_1'^* - H_1'$ — ее изменение при погружении пластины в жидкость.

Измеряемое датчиком изменение результирующего поля $\Delta H_d = \Delta H_1' + \Delta H^{(n)}$, где $\Delta H^{(n)}$ — изменение поля жидкости, связанное с высшими гармониками. Выразив отсюда $\Delta H_1'$ и подставив его в (3), получим $\Delta\sigma^a = \mu_o H_d^{(o)} (\Delta H_d - \Delta H^{(n)})$. Подставив это выражение в (2), получим уравнение механомагнитного эффекта, справедливое для произвольного закона намагничивания жидкости:

$$\sigma_b = \frac{\mu_o H_d^{(o)} \Delta H_d}{1 - \varepsilon_c - \varepsilon_a}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_a = -\frac{\mu_o H_d^{(o)} \Delta H^{(n)}}{\sigma^b} = -\frac{\mu_o H_d^{(o)} \Delta H_d - \Delta\sigma^a}{\sigma^b}, \varepsilon_c = -\frac{\Delta\sigma^c}{\sigma^b}$ — безразмерные параметры, определяющие вклад высших гармоник и изменения магнитного веса жидкости соответственно.

В случае линейного закона намагничивания поле жидкости имеет единственную гармонику $H_1' = s_c H^{(o)}$. Следовательно,

$$\sigma^a = \mu_o H_c^{(o)2} s_c, \quad \Delta\sigma^a = \mu_o H_c^{(o)2} (s_c^* - s_c), \quad (5)$$

здесь s_c^* и s_c – коэффициенты отражения поля от нижней поверхности кюветы без тела и в его присутствии, которые рассчитываются по соотношениям

$$s_c = \frac{r + s_b e^{-2l}}{1 + r s_b e^{-2l}}, \quad s_b = \frac{-r + s_b e^{-2l_b}}{1 - r s_b e^{-2l_b}}, \quad s_b^* = \frac{r(1 - e^{-2l_1})}{1 - r^2 e^{-2l_1}}, \quad s_c^* = \frac{r(1 - e^{-2l_c})}{1 - r^2 e^{-2l_c}}, \quad (6)$$

где $r = (\mu - 1)/(\mu + 1)$, μ – магнитная проницаемость жидкости.

Тогда (5) примет вид

$$\mu_o H_d^{(o)} \Delta H_d = \Delta\sigma_a = \mu_o H_c^{(o)2} \frac{(r^2 - 1)(r e^{-2l_c} + s_b e^{-2l})}{(1 - r^2 e^{-l_c})(1 + r s_b e^{-2l})} \Big|_{h \gg 1} = \sigma_b (1 + r s_b). \quad (7)$$

Выражение для расчета относительного изменения магнитного веса ϵ_c в линейно намагничивающейся среде можно получить, используя результаты работ [1, 4]:

$$\epsilon_c = 1 - \frac{(r e^{-2l_c} + s_b e^{-2l})(1 + r s_b e^{-2l})}{(1 - r^2 e^{-l_c}) e^{-2l} \left[\frac{-(r + s_b)^2 e^{-2(l_1 - l_b)}}{r(1 - e^{-2l_1})^2} - s_b \right]} \Big|_{l_1 \gg 1} = \frac{r^2 (1 - e^{-2l})}{1 - r^2 e^{-2l}}. \quad (8)$$

3. Результаты расчетов. Представленная на рис. 3 зависимость построена по (8) для жидкости с магнитной восприимчивостью, соответствующей начальной магнитной восприимчивости экспериментальной жидкости $\chi = \chi_o = M_s / H_h = 2,068$. Как видно, вклад изменения магнитного веса жидкости в выталкивающую силу значителен и достигает при погружении тела на дно кюветы 22,5 %.

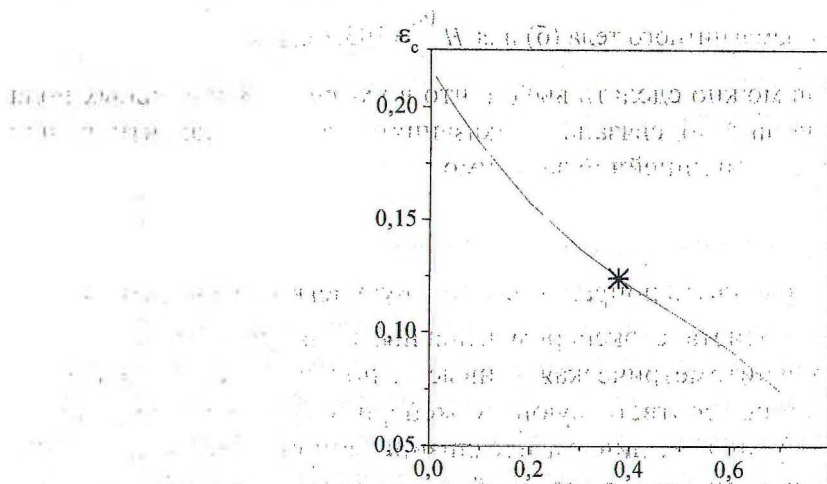


Рис. 3. Зависимость относительного изменения магнитного веса жидкости ϵ_c от положения немагнитного тела l для линейно намагничивающейся жидкости

Для нелинейно намагничивающейся жидкости параметры ϵ_a и ϵ_c можно получить численным методом на основе модели [3]. Результаты расчетов представлены на рис. 4. Как показано (рис. 4, а), ϵ_c принимает максимальное значение в слабых полях (около 12 %), которое согласуется с результатами линейной теории (точка на рис. 3). При $H_c^{(0)} = 100$ кА/м ϵ_c практически равен нулю. При изменении положения тела (рис. 4, б) ϵ_c изменяет знак. Параметр высших гармоник ϵ_a (рис. 4, а) максимален в умеренных полях (менее 4 %) и при крайнем положении тела (менее 5 %).

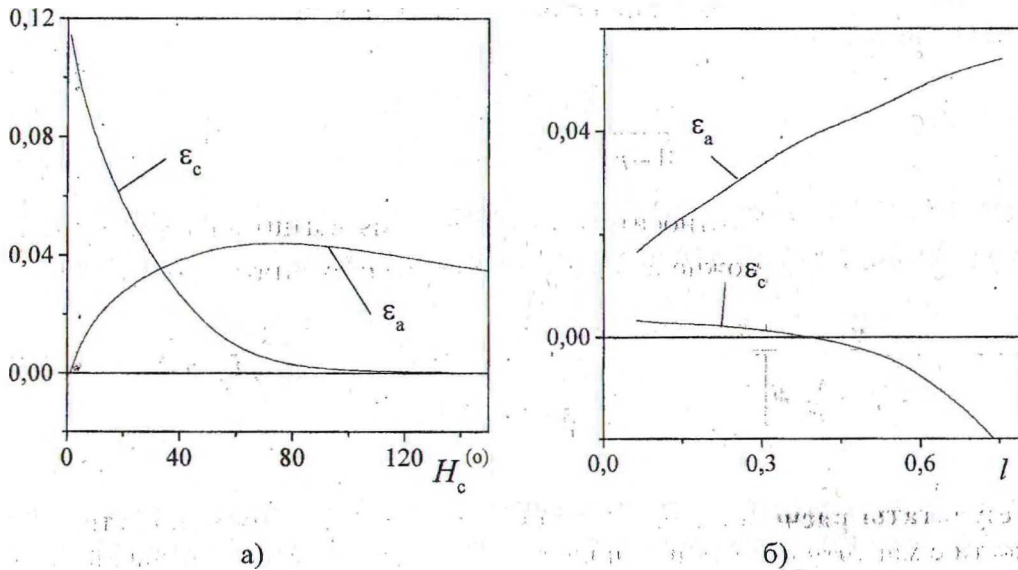


Рис. 4. Зависимости относительных вкладов высших гармоник ϵ_a и изменения веса жидкости ϵ_c в уравнении механомагнитного эффекта от напряженности внешнего поля (а) для $l = 0,377$ и положения немагнитного тела (б) для $H_c^{(0)} = 105,3$ кА/м

На основе этих расчетов можно сделать вывод, что в умеренных и сильных полях магнитная сила, действующая на тело, связана с показаниями датчика магнитного поля (погрешность менее 5 %) простой линейной зависимостью:

$$\sigma_b \approx \Delta\sigma_b = \mu_0 H_d^{(0)} \Delta H_d. \quad (9)$$

В слабых полях нужно учитывать поправку ϵ_c , которую легко рассчитать по (8).

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными проведено на рис. 2. Силометрическая и магнитометрическая кривые 5, полученные путем прямого расчета, расположились чуть ниже соответствующих экспериментальных зависимостей 1, 2. Расхождение можно объяснить различием идеализированной установки, на которой проводился численный эксперимент, и реальной, на которой проводились измерения. Кривая 6 (рис. 2, а) представляет силометрическую кривую, рассчитанную косвенным методом – по приближенному уравнению механомагнитного эффекта (9) с использованием результатов численного моделирования показаний датчиков (кривые 5 на рис. 2, б). Расхождение кривых 6 и 5 (менее 5 %) показывает влияние поправок, которые содержатся в точном уравнении механомагнитного эффекта (4). Результаты косвенного определения силы по (5) с использованием экспериментальных показаний дат-

чика представлены на рис. 2, а зависимостями 3, 4, которые расположены заметно ниже результатов прямого измерения силы 1, 2. Это можно объяснить постоянной погрешностью, возникающей при погружении тела в жидкость. В остальном изменения поля с использованием простого преобразования (9) передают все нюансы изменений силы при перемещениях тела в жидкости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вислович А.Н. Механомагнитный эффект при плавании немагнитных тел в магнитных резервуарах // Автоматический контроль и автоматизация производственных процессов: – Минск, 2000. – С.235–237.
2. Vislovich A.N. Mechanomagnetic effects in magnetic reservoir // ICMF 9. – Bremen, 2001. – P. 231.
3. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // Десятая Международная Плесская конференция по магнитным жидкостям. – Плес, 2002. – С. 206–214.
4. Вислович А.Н., Сухоцкий А.Б. Силы, действующие на пластину в магнитной жидкости в магнитном поле с экспоненциальной неоднородностью // МЖГ. – 2001. – № 6. – С. 3–14.

УДК 620.9:657.471

В.И. Володин, д-р техн. наук; С.В. Здитовецкая, аспирант

ПРИНЦИПЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛА

The problem of optimization of vapor-compression heat transformers is considered. The diagrams of conjugate optimization of cycle and equipment parameters are given.

В процессе использования теплоты в промышленности, жилищно-коммунальном секторе, сельском хозяйстве образуются энергетические отходы в этой же форме, но с более низким потенциалом, который характеризуется температурой носителя тепла. При этом наибольшее количество отходов имеют температуру, отличающуюся от температуры окружающей среды от нескольких до десятков градусов.

Такую теплоту, как и теплоту окружающей среды, непосредственно использовать в качестве полезной не представляется возможным. Для этих целей применяют специальные преобразователи – трансформаторы тепла, представляющие собой холодильную машину, которая может работать в режимах охлаждения, нагрева или нагрева–охлаждения.

В настоящее время наиболее распространенными типами трансформаторов тепла являются парокompрессионные, которые также называют компрессионными. Однако, несмотря на их широкое применение, в настоящее время отсутствуют адекватные методы для выбора оптимальных режимных и конструктивных параметров в процессе их проектирования и эксплуатации.

Рассмотрим, какие проблемы существуют при реализации комплексной задачи оптимизации.

Трансформатор тепла представляет собой сложную техническую систему, включающую взаимосвязанное оборудование. Схема компрессионного трансформатора тепла дана на рис. 1. С помощью рабочего тела (хладагента), циркулирующего внутри