

УДК 532.5:537.6+536.24

О ЛОКАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОМ ОХЛАЖДЕНИИ ПРИ ЗАКАЛКЕ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ

ГОГОСОВ В. В., СИМОНОВСКИЙ А. Я.

Влияние магнитного поля на процессы теплопереноса в режиме конвекции, пузырькового и пленочного кипения [1, 2] открывают широкие перспективы применения магнитных жидкостей в качестве закалочных сред [3].

Управлять процессом закалки в магнитной жидкости можно, используя магнитные поля с заданным пространственным распределением и изменяющиеся со временем по заданным законам. Несомненный технологический интерес представляет возможность проведения локально-неоднородного охлаждения при закалке в магнитной жидкости, в результате которой удастся получать локально-неоднородную структуру и различную твердость на разных участках поверхности изделия [2].

В данной работе исследуется процесс закалочного охлаждения в магнитной жидкости цилиндрических стальных образцов при наличии магнитного поля. Показано, что в зависимости от интенсивности магнитного поля и его ориентации по отношению к поверхности цилиндра на поверхности могут появляться локальные паровые образования, обуславливающие неоднородность охлаждения, а кипение жидкости на поверхности цилиндра происходит в различных режимах.

Экспериментально моделируются процессы формирования локальных паровых пленок путем наблюдения за формой поверхности магнитной жидкости, окружающей цилиндр, помещенный в зазор между полюсами электромагнита. Выведено уравнение, описывающее форму свободной поверхности магнитной жидкости и эволюции воздушных полостей с изменением объема магнитной жидкости и напряженности магнитного поля. Показано хорошее совпадение формы поверхности магнитной жидкости, рассчитанной по предлагаемой теории, с экспериментальными данными.

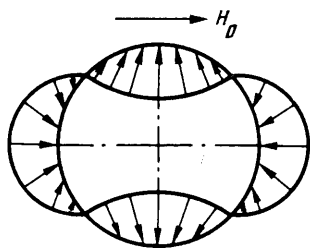
1. Влияние магнитного поля на процесс закалочного охлаждения в магнитной жидкости. Эксперименты по наблюдению за процессом формирования паровых полостей при закалочном охлаждении в магнитной жидкости проводились следующим образом.

Цилиндрический образец диаметром 10 мм, высотой 35 мм, выполненный из среднеуглеродистой стали, установленный на немагнитном штоке, подвергался нагреву до температуры 750 С. Охлаждение образца проводилось в центре объема магнитной жидкости, заполнявшей немагнитный цилиндрический контейнер, помещенный между полюсами электромагнита. Магнитная жидкость, применяемая в эксперименте, представляла собой коллоидный раствор магнетита в воде. Намагниченность насыщения $M_s = 20,4$ кА/м.

В центральной точке на оси образца устанавливался спай хромель-алюмелевой термопары. Показания термопары регистрировались электронно-лучевым осциллографом. Для наблюдения за состоянием поверхности образца при смене режимов теплоотдачи охлаждение прерывалось при различных температурах путем быстрого удаления образца из раствора.

Концентрированная магнитная жидкость, вступая в контакт с поверхностью металла, оставляет на ней темный след. Это позволило выявить картину смены режимов кипения жидкости на поверхности нагретого до высоких температур цилиндра. При охлаждении без магнитного поля поверхность цилиндра, удаленного из раствора при температуре выше 500 С, остается светлой. Это означает, что при высоких температурах охлаждающая среда отделена от поверхности металла слоем пара.

При температурах от 500 до 250 С на поверхности цилиндра обнаруживаются участки, покрытые осадком расслоившейся жидкости, что является характерным признаком переходного кипения. Ниже 250 С вся поверхность образца занята остатками расслоившейся жидкости. Заметны раковины от формирующихся пузырей. Это позволяет говорить о том, что при температурах ниже 250 С наблюдается режим пузырькового кипения жидкости. При температурах ниже точки кипения жидкости ~400 С раковины от формирующихся пузырей в слое остатка жидкости на по-



Фиг. 1

верхности образца уже не обнаруживаются. Следовательно, охлаждение происходит в режиме однофазной конвекции.

Для наблюдения за влиянием магнитного поля на процесс охлаждения цилиндра в магнитной жидкости емкость из немагнитного материала с магнитной жидкостью, в которой происходило охлаждение образца, помещалась в межполюсное пространство электромагнита с однородным распределением поля. Степень неоднородности поля не превышала 5%. Охлаждаемый образец помещался в жидкость перпендикулярно на-

правлению внешнего магнитного поля. В отсутствие образца внутри цилиндрической емкости, а также внутри образца поле близко к однородному, а вне его существенно искажается образцом и описывается в случае бесконечного цилиндра формулами [4] (вблизи торцов цилиндра конечной длины поле искажается)

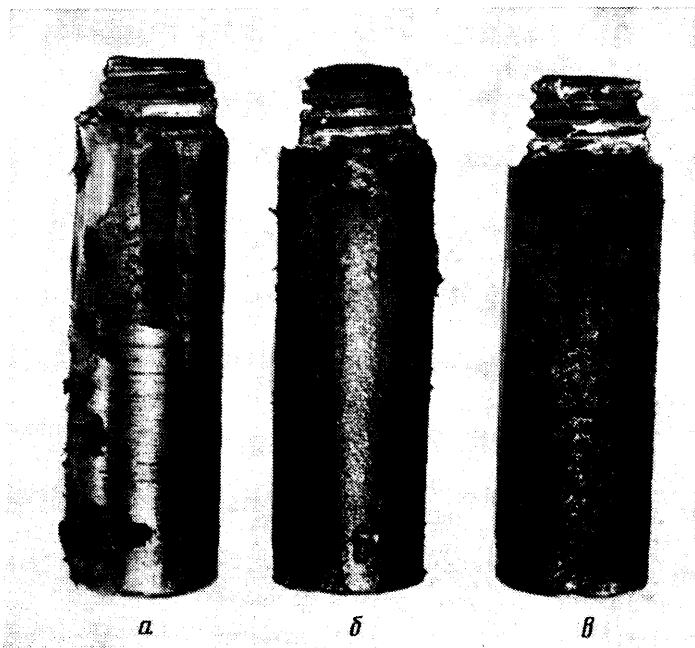
$$H_\varphi = H_0 \left(\alpha \frac{R^2}{r^2} - 1 \right) \sin \varphi, \quad H_r = H_0 \left(\alpha \frac{R^2}{r^2} + 1 \right) \cos \varphi, \quad \alpha = \frac{\mu_c - \mu_f}{\mu_c + \mu_f} \quad (1.1)$$

Здесь H_0 — внешнее магнитное поле, R — радиус цилиндра, r — радиус-вектор точки, в которой определяется поле, φ — полярный угол, отсчитываемый от направления магнитного поля далеко от цилиндра, μ_c — магнитная проницаемость цилиндра, μ_f — магнитная проницаемость магнитной жидкости далее предполагается равной единице, H_φ и H_r — азимутальная и радиальная компоненты поля.

Сила, действующая на магнитную жидкость со стороны магнитного поля, пропорциональна его градиенту [4]. Эпюра распределения сил, вычисленная по формулам (1.1), симметрична относительно диаметров цилиндра, параллельного и перпендикулярного полю (фиг. 1).

Наложение магнитного поля приводит к существенному изменению режимов охлаждения цилиндра. Об этих изменениях можно судить по картине распределения остатков расслоившейся магнитной жидкости по поверхности цилиндра.

На фиг. 2, а показана фотография образца, охлаждение которого проводилось в магнитном поле 16 кА/м, направленном перпендикулярно плоскости от нее, и было прервано при температуре выше 500 С. Видимая на фотографии часть поверхности образца при охлаждении располагалась так, что $-90^\circ < \varphi < +90^\circ$. Рыхлаые темные хлопьеобразные пятна на поверхности образца — остатки расслоившейся жидкости. В области видимого участка поверхности, где угол φ близок к нулю, наблюдается темный вертикальный след вдоль образующей цилиндра плотного хорошо связанного с поверхностью осадка магнитной жидкости. Градиент поля и пропорциональная ему сила, действующая на магнитную жидкость в этой области, направлены к поверхности цилиндра. При этом жидкость прижимается к поверхности цилиндра, вытесняя паровую рубашку, и расслаивается на ней, образуя темные пятна.



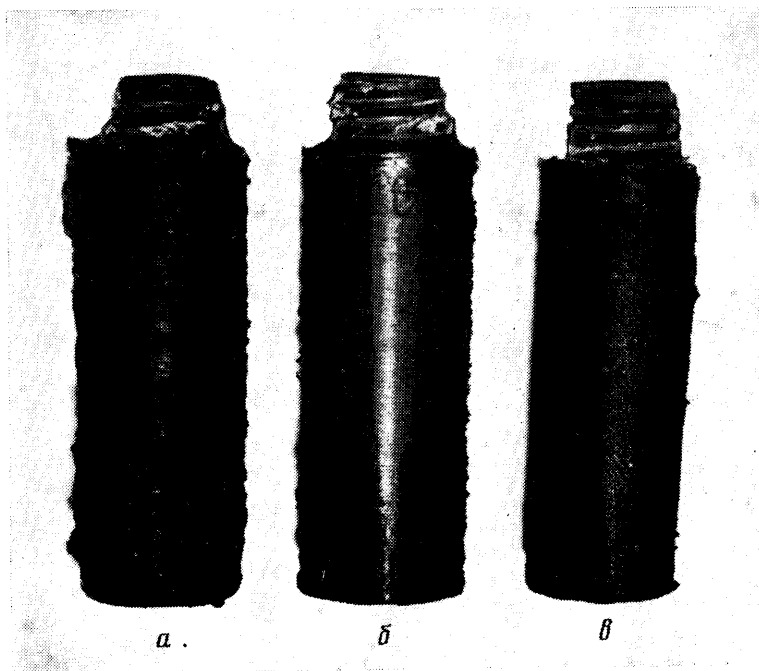
Фиг. 2

Отметим, что место выпадения осадка на поверхности определяется набором случайных факторов. Поэтому на участках поверхности, для которых угол φ близок к 180° , зона плотного осадка также присутствует, но ее положение по высоте цилиндра может быть иным. Уже в сравнительно малых магнитных полях переходной режим кипения наблюдается при температурах теплоотдающей поверхности выше 500°C . Подчеркнем, что без магнитного поля такой режим кипения наблюдался только при температурах ниже 500°C .

На фиг. 2, б представлена фотография образца, охлаждение которого проводилось в поле 150 кА/м , вектор которого лежит в плоскости фигуры и направлен слева направо, и было прервано при температуре 250°C . В процессе охлаждения видимая часть поверхности образца располагалась так, что $0 < \varphi < 180^\circ$. В отсутствие поля при данной температуре вся поверхность образца была покрыта слоем расслоившейся магнитной жидкости и выглядела темной. Видимая на фотографии (фиг. 2, б) светлая вертикальная полоска при $\varphi \sim 90^\circ$ (аналогично при $\varphi \sim -90^\circ$) является частью поверхности образца, свободной от магнитной жидкости, которая в этих областях отталкивалась от образца магнитным полем.

Таким образом, пленочное кипение в областях, где магнитная жидкость отталкивается магнитным полем от поверхности цилиндра, может быть устойчивым при температурах теплоотдающей поверхности ниже 250°C . Без магнитного поля такой же режим кипения осуществляется при температурах выше 250°C .

На фиг. 2, в представлен образец, охлаждение которого проводилось при том же магнитном поле, что и в случае 2, б, но было прервано при температуре 100°C . Вся поверхность образца независимо от направления поля занята слоем магнитной жидкости. Это свидетельствует о том, что паровая пленка даже на участках поверхности цилиндра с углом φ , близким к $\pm 90^\circ$, при этих температурах разрушается и магнитная жидкость соприкасается с образцом, несмотря на отталкивающий характер сил неоднородного магнитного поля.



Фиг. 3

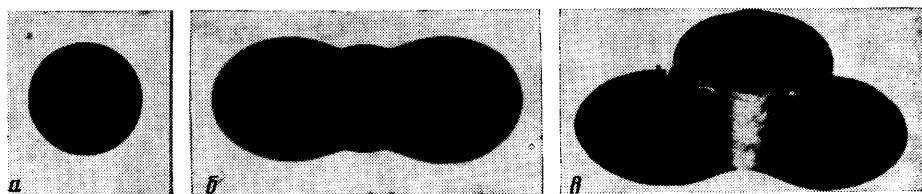
На фиг. 3 демонстрируется изменение режимов охлаждения цилиндра при различных значениях магнитного поля в момент достижения образцом температуры 250 С. Вектор напряженности магнитного поля всюду на фиг. 3 лежит в плоскости фигуры и направлен слева направо.

На фиг. 3, *а* представлен образец, охлаждение которого проводилось в магнитном поле 16 кА/м. Светлый след вдоль передней образующей цилиндра (угол φ близок к $\pm 90^\circ$) соответствует зоне, где магнитная жидкость отделена от поверхности цилиндра. В слабом магнитном поле этот след узкий. На фиг. 3, *б, в* представлены фотографии образцов, охлаждение которых проводилось в магнитном поле 79,6 и 150 кА/м соответственно. Светлая сужающаяся книзу полоска, свободная от магнитной жидкости, с увеличением напряженности магнитного поля расширяется.

2. Экспериментальное изучение формы свободной поверхности магнитной жидкости вблизи намагничивающегося цилиндра во внешнем магнитном поле. Для понимания природы происхождения локальных паровых полостей, образующихся при охлаждении цилиндра в магнитной жидкости, изучения их формы и размеров был предпринят следующий эксперимент.

Измерительная кювета, состоящая из двух коаксиально расположенных цилиндров — внутреннего ферромагнитного из среднеуглеродистой стали диаметром 10 и высотой 20 мм и наружного из немагнитного металла, устанавливалась в межполюсном пространстве электромагнита, где создавалось однородное магнитное поле, перпендикулярное оси цилиндра. Дном кюветы служило матовое стекло. При включенном магнитном поле к поверхности цилиндра подавалась последовательно увеличивающаяся порция магнитной жидкости. Характер распределения магнитной жидкости регистрировался фотокамерой при просвечивании кюветы снизу.

На фиг. 4, *а* представлен вид сверху цилиндрического образца без магнитной жидкости. На фиг. 4, *б, в* представлены фотографии цилиндрического образца, окруженного малым, 1,8 см³, объемом магнитной жидкости, при напряженности внешнего магнитного поля $H_0 = 79,6$ кА/м.



Фиг. 4



Фиг. 5

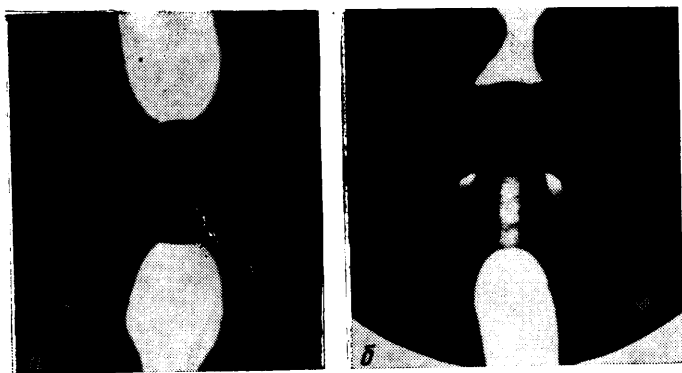
Вектор магнитного поля на фиг. 4 лежит в плоскости фотографии и направлен слева направо.

На фиг. 4, б представлена фотография распределения магнитной жидкости вокруг образца при виде сверху. Фигура 4, в получена съемкой той же картины в направлении, перпендикулярном к внешнему магнитному полю под углом к горизонту $50-70^\circ$ — «вид сбоку». Боковая фотография распределения магнитной жидкости вдоль цилиндра на фиг. 5, б, 6, б, 7, б проводилась аналогичным образом. На фотографиях видно, что малый объем магнитной жидкости располагается вдоль участков поверхности цилиндра, где угол φ близок к 0 или 180° — левая и правая части цилиндрического образца на фиг. 4, б, в. Участки поверхности цилиндра, свободные от магнитной жидкости, сужаются в направлении силы тяжести.

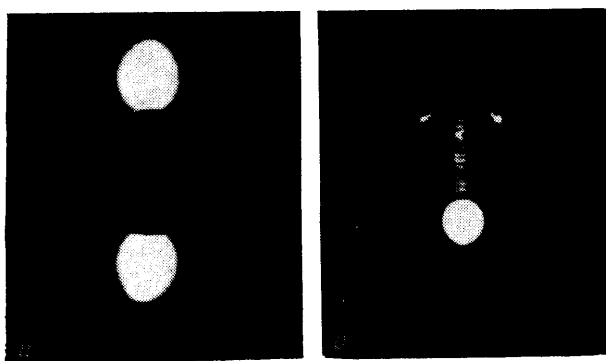
Вблизи левого и правого участков поверхности образца на фиг. 4, б, в у поверхности цилиндра сила, действующая со стороны магнитного поля на жидкость, направлена к поверхности цилиндра. При этом магнитная жидкость располагается по высоте цилиндра (фиг. 4, в) так, что сечение ее объема плоскостью, перпендикулярной оси цилиндра, увеличивается в направлении силы тяжести.

На фиг. 4, в видно, что левая и правая части торца цилиндра, находящиеся в контакте с жидкостью, покрыты ею. От этого на фотографии не закрытое магнитной жидкостью светлое пятно торца цилиндра выглядит вытянутым снизу вверх.

На фиг. 5 приведены фотографии распределения формы свободной поверхности магнитной жидкости после введения в кювету дополнительного объема жидкости без изменения величины внешнего магнитного поля. Суммарный объем жидкости при этом равен 24 см^3 ; фиг. 5, а — вид сверху, 5, б — вид сбоку. С увеличением объема магнитной жидкости у поверхности цилиндра, где φ близко $\pm 90^\circ$, у дна кюветы начинают формироваться области подковообразной формы, свободные от магнитной жидкости. На фиг. 5, а эти области видны на верхней и нижней частях



Фиг. 6



Фиг. 7

фигуры. Область, занятая магнитной жидкостью, растекшейся по дну, ограничена при печати круглой рамкой.

Фотография вида сбоку той же картины на фиг. 5, б дает представление о форме участка поверхности цилиндра, свободного от магнитной жидкости. На фотографиях не удалось зафиксировать тот факт, что жидкость поднимается на высоту, сравнимую с высотой цилиндра, только в непосредственной близости к цилиндру. В местах, удаленных от поверхности цилиндра на расстояния, большие его радиуса, жидкость растекается тонким слоем по дну кюветы. Именно на дне кюветы и происходит образование воздушной полости подковообразной формы.

На фиг. 6, а и б приведена дальнейшая эволюция формы полости при увеличении объема магнитной жидкости до 44 см^3 . В полости магнитной жидкости на дне кюветы образуются шейки-перетяжки. С увеличением объема жидкости шейки воздушных полостей уменьшаются до тех пор, пока не произойдет смыкание левых и правых придонных объемов жидкости.

На фиг. 7, а приведена фотография вида сверху формы свободной поверхности магнитной жидкости, когда ее суммарный объем равен 76 см^3 . Видно, что шейки воздушных полостей отсутствуют. Верхнее и нижнее белые пятна на фиг. 7, а — воздушные полости в объеме магнитной жидкости на дне кюветы. По-прежнему высота слоя жидкости меньше высоты цилиндра в точках, удаленных от поверхности более чем на величину диаметра.

Фотография на фиг. 7, б дает представление о виде сбоку той же картины и характеризует изменения формы поверхности цилиндра, не смоченной магнитной жидкостью, вдоль оси цилиндра. Происходит сужение поверхности цилиндра, свободной от магнитной жидкости, сверху вниз — в направлении силы тяжести.

Наблюдения показали, что дальнейшее увеличение объема магнитной жидкости в кювете приводит к сужению просвета полости в придонной части кюветы и увеличению высоты столба жидкости в областях, удаленных от цилиндра. Существует некоторое критическое значение объема жидкости, при котором белые пятна, изображенные на фиг. 7, а, исчезают. При этом воздушные полости принимают вид расширяющихся снизу вверх воронок конусообразной формы с вершинами на дне кюветы. Еще большее увеличение объема жидкости приводит к смещению вершины конуса вверх, уменьшению объема воронок до полного их вырождения. С возрастанием напряженности магнитного поля воронки вновь возникают и их объем возрастает с увеличением интенсивности поля.

3. Определяющие уравнения; анализ формы свободной поверхности магнитной жидкости. Уравнение, описывающее форму свободной поверхности магнитной жидкости на границе с немагнитизирующей средой, имеет вид [1]

$$\rho g z - \mu_0 \int_{H_0}^H \mathbf{M} d\mathbf{H} - \frac{1}{2} \mu_0 (\mathbf{M} \cdot \mathbf{n})^2 + \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = c \quad (3.1)$$

Здесь ρ — плотность жидкости, g — ускорение силы тяжести, z — вертикальная координата точки на поверхности жидкости, отсчитываемая от верхнего торца цилиндра в направлении $\mathbf{g}$, σ — коэффициент поверхностного натяжения жидкости, R_1 и R_2 — радиусы кривизны поверхности раздела газ — жидкость, μ_0 — магнитная постоянная, $\mathbf{M}$ — намагниченность жидкости, $\mathbf{n}$ — единичный вектор внешней нормали к межфазной поверхности, $c = \text{const}$.

Будем считать, что магнитное поле велико, жидкость намагничена до насыщения и ее намагниченность меньше магнитного поля. Такое условие приближенно выполняется для жидкости с намагниченностью насыщения $M_s \sim 10^4$ А/м, находящейся во внешнем поле $H_0 \sim 10^5$ А/м, реализующемся в эксперименте. При этом можно пренебречь влиянием намагниченности на распределение магнитного поля вблизи образца и для его распределения принять выражение (1.1).

При намагниченности насыщения магнитной жидкости $M_s \sim 10^4$ А/м, коэффициенте поверхностного натяжения $\sigma \sim 10^{-2}$ Н/м, характерном радиусе кривизны $R_1 \sim R_2 \sim 10^{-3}$ м три последних слагаемых в левой части в уравнении (3.1) имеют порядки величин 10^3 , 10^2 и 10 соответственно.

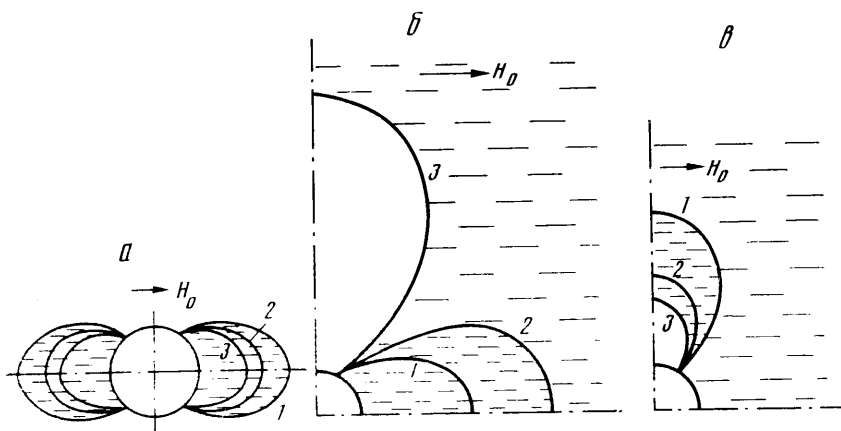
Учитывая приведенные оценки, пренебрегая в правой части уравнения (3.1) двумя последними слагаемыми, запишем уравнение (3.1) для свободной поверхности магнитной жидкости в виде

$$\rho g z - \mu_0 M_s H = c \quad (3.2)$$

В рассматриваемом диапазоне магнитного поля $\mu_c \gg \mu_l$ [5], при этом $\alpha \approx 1$. Учитывая это и подставляя выражение для поля из формулы (1.1) в уравнение (3.2), найдем выражение для формы свободной поверхности магнитной жидкости

$$\left[H_0^2 - \left(\frac{\rho g z}{\mu_0 M_s} - c \right)^2 \right] r^4 + 2R^2 H_0^2 (\cos^2 \varphi - \sin^2 \varphi) r^2 + H_0^2 R^4 = 0 \quad (3.3)$$

Задавая в (3.3) z от 0 до L (L — длина цилиндра), получим биквадратное уравнение для r^2 от φ , описывающее форму сечения объема магнитной жидкости плоскостью $z = \text{const}$. Существование вещественных



Фиг. 8

корней уравнения (3.3) определяется заданием величины z и параметров R , H_0 и c ; c связан с величиной объема жидкости.

Графики сечений, когда величина внешнего магнитного поля H_0 равна 79,6 кА/м, при различных значениях z приведены на фиг. 8. Направление магнитного поля показано на фигурах стрелками. Окружность в центре фигуры соответствует верхнему торцу цилиндра. Начало координат — на верхнем торце цилиндра. Кривые на фиг. 8, а — в являются геометрическим местом точек, описываемых уравнением (3.3) при значениях $c = \sqrt{1,5} H_0$, $\sqrt{1,2} H_0$ и $\sqrt{0,9} H_0$ соответственно. Линии 1—3 на этих фигурах построены для значений $z=0$ (верхний торец цилиндра), 0,01; 0,02 м (нижний торец цилиндра) соответственно.

Ввиду симметрии картины относительно центра цилиндра на фиг. 8, б, в приведены графики сечений, соответствующие значениям полярного угла $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$.

На фиг. 8, а показано расположение магнитной жидкости, соответствующее фотографии экспериментов, приведенной на фиг. 4, б. Площадь ограниченная линиями 1—3 и отмеченная штриховкой, занята магнитной жидкостью. Сечение объема магнитной жидкости плоскостью $z=\text{const}$ увеличивается при удалении от верхнего торца цилиндра к нижнему (от линии 1 к линии 3) в соответствии с экспериментом на фиг. 4, б. Из экспериментов, описанных в разд. 2, следует, что объем магнитной жидкости при таком ее расположении вне цилиндра невелик. Сечения объема магнитной жидкости плоскостями $z=\text{const}$ на фиг. 8, б соответствуют эксперименту, фотография которого приведена на фиг. 6, а, когда объем магнитной жидкости достаточно большой. Отмеченные штриховкой области, ограниченные линиями 1, 2, заняты жидкостью. Вне их — воздух. Штриховкой вне линии 3 отмечена область, занятая магнитной жидкостью на дне кюветы. Не заштрихованная область, ограниченная линией 3, соответствует части дна кюветы, не занятой магнитной жидкостью.

При еще большем увеличении объема магнитной жидкости, как показано на фотографиях 7, а, б, в магнитной жидкости, окружающей цилиндр, образуются две сужающиеся воронки — воздушные полости. Граница раздела воздух — жидкость, описываемая уравнением (3.3) для этого случая, показана на фиг. 8, в. Внутренняя часть области, ограниченная линией 3, не занятая магнитной жидкостью — область на дне воронки — самая узкая ее часть. Линия 1 показывает границу воронки в плоскости верхнего торца цилиндра. Заштрихованная область вне ее — жидкость, внутри — сужающаяся внутрь фигуры воздушная полость.

Расчеты показывают, что с уменьшением параметра c область, свободная от магнитной жидкости на дне кюветы, уменьшается до нуля. Далее, вершина воронки с уменьшением величины c поднимается в направлении верхнего торца цилиндра.

Проводилось количественное сравнение формы свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей цилиндр, полученной в эксперименте и описываемой уравнением (3.3). Для этого на фотографии (фиг. 4, б), дающей увеличение реальной картины в 1,9 раза, определялся радиус-вектор точки свободной поверхности магнитной жидкости в плоскости нижнего торца цилиндра, $z=0,02$ м, при значении угла $\varphi=0$. По найденному значению радиус-вектора с учетом величины внешнего магнитного поля H_0 из уравнения (3.3) определялся параметр c . Далее это значение величины c использовалось в уравнении (3.3) для построения графика раздела магнитная жидкость — воздух. Ниже представлены значения теоретических r_t и найденных в эксперименте r_e радиус-векторов точек свободной поверхности магнитной жидкости в плоскости нижнего торца цилиндра, $z=0,02$, в магнитном поле $H_0=79,6$ кА/м.

φ°	0	10	20	30	40	50	60
$1,9 \cdot 10^2 r_e$	2,65	2,58	2,36	2,0	1,54	1,10	0,86
$1,9 \cdot 10^2 r_t$	2,65	2,58	2,34	2,0	1,56	1,15	0,87

Из таблицы видно, что различие растёт с увеличением угла φ . Однако это различие лежит в пределах ошибки измерений, равной $\pm 0,05 \cdot 10^{-2}$ м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гогосов В. В., Налетова В. А., Шапошникова Г. А. Гидродинамика намагничивающихся жидкостей // Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. М.: ВИНТИ, 1981. Т. 16. С. 76–208.
2. Симоновский А. Я., Верховский С. Н. О локальных параметрах охлаждения цилиндра в магнитной жидкости // Тез. докл. IV Всесоюз. конф. по магнитным жидкостям. Иваново: Иванов. энергет. ин-т, 1985. Т. 2. С. 96–97.
3. Чеканов В. В., Симоновский А. Я. Закалочная среда. А. С. № 985076 СССР // Б. И. 1982. № 48.
4. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика. Т. 8. Электродинамика сплошных сред. М.: Наука, 1982. 623 с.
5. Лифшиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1980. 320 с.

Москва

Поступила в редакцию
20.X.1987