

УДК 536.242

Гришанина О.А. [Grishanina O.A.],
Симоновский А.Я. [Simonovskii A.Ya.],
Яновский А.А. [Yanovskii A.A.]

ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН В ПРОЦЕССАХ ОХЛАЖДЕНИЯ НАМАГНИЧИВАЮЩЕЙСЯ ПЛАСТИНЫ В МАГНИТНОЙ ЖИДКОСТИ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ*

Hydrodynamics and heat exchange in processes of cooling of a magnetic plate in a magnetic liquid in the magnetic field

В работе экспериментально изучено влияние магнитного поля на процессы теплообмена намагничивающейся стальной пластины, охлаждаемой в магнитной жидкости. Термопары были установлены в шести точках на поверхности пластины вдоль ее длины. Получены графики зависимости температуры от времени в отсутствие магнитного поля и в магнитных полях различной напряженности. Обнаружено, что интенсивность теплообмена зависит в значительной степени от величины магнитного поля и от расположения областей поверхности пластины. В магнитном поле охлаждение центральной части пластины происходит с такой же интенсивностью, что и в отсутствие магнитного поля и с меньшей интенсивностью в сравнении с другими точками поверхности пластины. Вблизи концов пластины скорость охлаждения поверхности намного больше в магнитном поле, чем при его отсутствии. С ростом напряженности магнитного поля скорость охлаждения в центральной части пластины уменьшается и оказывается меньше, чем в отсутствие магнитного поля. Зависимость теплообмена от величины магнитного поля объяснена распределением магнитных сил, действующих на жидкость окружающую пластину и характер образующихся паровоздушных полостей вблизи ее поверхности. Описаны эксперименты по моделированию образования и форму паровоздушных полостей в жидкости, окружающих намагничивающуюся пластину.

The effect of the magnetic field on heat transfer processes of a magnetized steel plate cooled in a magnetic fluid is experimentally studied. Thermocouples were installed at six points on the surface of the plate along its length. The plots of temperature versus time are obtained in the absence of a magnetic field and in magnetic fields of different intensity. It is found that the intensity of heat exchange depends to a large extent on the magnitude of the magnetic field and on the location of points on the surface of the plate. In a magnetic field, cooling of the central part of the plate occurs with the same intensity as in the absence of a magnetic field and with a lower intensity in comparison with other points on the surface of the plate. Near the plate ends, the cooling rate of the surface is much greater in the magnetic field than in the absence of it. With increasing magnetic field strength, the cooling rate of points in the central part of the plate decreases and is less than in the absence of a magnetic field. The dependence of heat transfer on the magnitude of the magnetic field is explained by the distribution of the magnetic forces acting on the liquid surrounding the plate and the nature of the vapor-air cavities formed near its surface. Experiments on simulation of formation and the shape of vapor-air cavities in a liquid surrounding a magnetizing plate are described.

Ключевые слова: магнитная жидкость, теплообмен, гидродинамика, стальная пластина, магнитное поле.

Key words: magnetic fluid, heat transfer, hydrodynamics, steel plate, magnetic field.

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00037).

Введение

Магнитные жидкости представляют собой устойчивую коллоидную систему. Дисперсионной средой в магнитных жидкостях, как правило, является керосин, кремнийорганические масла или вода. В качестве дисперсной фазы используются частицы железа, кобальта или магнетита, благодаря чему магнитные жидкости обладают способностью сильно намагничиваться в магнитных полях, сохраняя при этом текучесть. Исследование теплообмена при кипении магнитных жидкостей представляют интерес как с чисто научной точки зрения, так и в связи с возможным техническим и технологическим использованием процесса кипения жидкой намагничивающейся среды [1–10]. Так, предлагалось использовать магнитные жидкости в теплообменных аппаратах и устройствах, управляемых магнитным полем [8–9], а также в качестве закалочной среды при охлаждении намагничивающихся тел [1–3, 11–13]. Было показано [1, 2, 11], что использование магнитных полей с заданным пространственным распределением и изменяющихся со временем по заданным законам позволяет управлять процессами закалки. При этом оказывается возможным проведение неоднородного охлаждения и получение локально неоднородной структуры и различной твердости на разных участках поверхности закаливаемых изделий. В связи с этим представляет интерес исследования процессов тепломассопереноса при охлаждении нагретых намагничивающихся тел в магнитных жидкостях при наличии магнитного поля.

Целью настоящего исследования является изучение влияния магнитных полей на интенсивность процессов теплообмена намагничивающейся пластины, погруженной в магнитную жидкость, а также форму паровоздушных полостей образующихся при ее охлаждении.

Материалы и методы

Определение параметров теплопереноса проводилось на экспериментальной установке, схема которой приведена на рисунке 1. Пластина 1, выполненная из ферромагнитной стали, прикреплялась к немагнитному цилиндрическому штоку 2. Шток мог свободно перемещаться вертикально по направляющим 3. Нагрев пластины осуществлялся в трубчатой электропечи 4. Охлаждение проводилось быстрым погружением образца в объем магнитной жидкости, заполнявшей немагнитный цилиндрический контейнер 5, расположенный между полюсами электромагнита 6. При диаметре полюсных наконечников электромагнита 100 мм и расстоянии между полюсами 107 мм неоднородность поля в зазоре электромагнита не превышала 7%. Ошибка измерения напряженности магнитного поля не превышала 2%. Направление магнитного поля во всех экспериментах совпадало с плоскостью пластины. Длина пластины $L = 45$ мм, высота $h = 50$ мм, толщина $b = 5$ мм. В шести точках на поверхности пластины в средней ее части по высоте устанавливались термомпары. Точка 1 расположена в центре пластины, точка 6 на торце пласт-

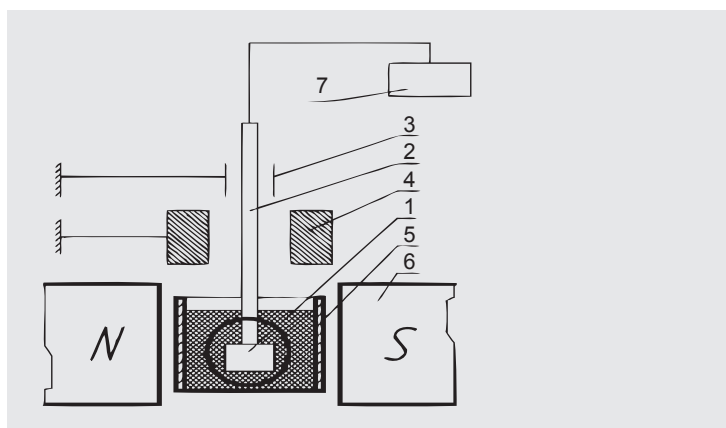


Рис. 1. Схема экспериментальной установки.

тины. Размеры пластины и места точек установки термодпар указаны на рис. 2. Электроды термодпар для изоляции разводились по каналам керамической соломки и укладывались вдоль поверхности направляющего штока. Показания термодпар фиксировались платой аналого-цифрового преобразователя 7. В экспериментах использовалась магнитная жидкость на водной основе с параметрами: абсолютная магнитная проницаемость $\mu = (2.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-6}$ Гн/м; плотность $\rho = 1.21 \cdot 10^3$ кг/м³, кинематическая вязкость $\nu = 3.99 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Охлаждаемая пластина была выполнена из стали 40X. Выбор материала образца объясняется широким распространением данной марки стали и известной зависимостью ее теплофизических свойств от температуры. Выбор отношения размеров образца L к толщине b , $L/b \sim 10$, обусловлен следующим. Эксперименты по нахождению формы свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей холодную намагничивающуюся пластину, показали, что при $L/b \sim 10$ в зависимости от величины приложенного внешнего магнитного поля вблизи поверхности пластины могут образовываться как две, так и четыре конусообразные воздушные полости в объеме окружающей пластину магнитной жидкости. Размеры полостей немонотонно зависят от величины магнитного поля. Таким влиянием поля на форму свободной поверхности магнитной жидкости можно анализировать зависимость толщины паровой пленки магнитной жидкости, окружающей охлаждаемую в ней намагничивающуюся пластину, от величины поля. Тем самым возможно моделирование влияния поля на теплообмен пластины с магнитной жидкостью, интенсивность которого зависит от толщины паровой пленки.

Термодпары устанавливались в шести точках поверхности пластины (рис. 2). В ходе экспериментов образец нагревали до температуры 625 °С. Таким образом, температура нагрева образца во всех измерениях была меньше

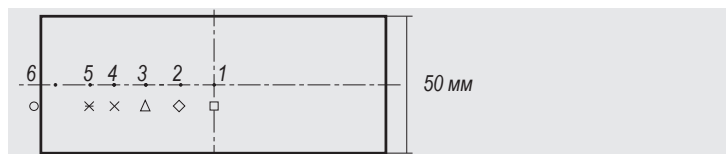


Рис. 2. Схема расположения термопар на поверхности пластины в средней ее части по высоте, вид сверху.

температуры Кюри, равной для стали $768\text{ }^{\circ}\text{C}$. В результате остаточная намагниченность охлаждаемой пластины в магнитном поле могла изменяться от измерения к измерению. Для обеспечения постоянства начального магнитного состояния образец перед каждой сменой режима прикладываемого магнитного поля помещался в переменное магнитное поле для размагничивания.

Было установлено, что при охлаждении пластины от $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ до комнатной температуры можно наблюдать все режимы кипения магнитной жидкости – пленочный, переходный, пузырьковый, а также конвективное охлаждение. В частности, было установлено, что при охлаждении пластины, в интервале температур $700\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$ реализуется пленочный режим кипения. Следует отметить, что при температурах нагрева выше $625\text{ }^{\circ}\text{C}$ наблюдается существенное ускорение обезуглероживания и расслаивания поверхности охлаждаемого образца, т.е. образование окалины. Так как спаи термопар приваривались к поверхности пластины точечной сваркой медным электродом, то снижение температуры нагрева ниже традиционно применяемых в технологических процессах закалки стали ($850\text{--}900\text{ }^{\circ}\text{C}$) при проведении теплофизических измерений позволило увеличить количество охладений без повреждения мест соединений спаев термопар с поверхностью охлаждаемого образца. Для выравнивания температуры по сечению образца перед очередным изменением поля реализовалась трехминутная выдержка.

Чтобы оценить систематическую погрешность измерений, связанную с различием инерционных свойств датчиков температуры, было проведено охлаждение пластины в воздухе. Измерения показали, что при охлаждении пластины в воздухе изменение температуры со временем в различных точках поверхности пластины происходит одинаково. Это обусловлено тем, что охлаждение в воздухе происходит за счет конвективного отвода тепла. Фазовые переходы в этом случае не происходят. Одинаковый ход кривых охлаждения различных точек поверхности пластины в воздухе свидетельствует о том, что инерционность термопар существенно не различается (нет запаздывания в ходе какой-либо кривой по сравнению с остальными) при небольшой интенсивности охлаждения.

При охлаждении в жидкости фазовые переходы вызывают существенные температурные флуктуации на теплоотдающей поверхности, а интенсив-

ность охлаждения больше, чем при охлаждении в воздухе. При более высокой интенсивности охлаждения может появляться запаздывание в ходе кривых охлаждения из-за различия в инерционных свойствах термопар.

Для определения значения этого различия проводилось охлаждение пластины в воде. Измерения показали, что ход кривых охлаждения в различных точках поверхности пластины практически одинаков. Имеющиеся различия в ходе кривых охлаждения связаны с естественными флуктуациями, обусловленными процессами кипения охлаждающей среды в ходе тепломассопереноса. При повторных экспериментах ход кривых изменялся произвольным образом. Измерения показали, что инерционность используемых в эксперименте термопар существенно не различается. Таким образом, различие в ходе кривых, связанное с инерционностью термопар, меньше различия в ходе кривых, обусловленного температурными флуктуациями теплоотдающей поверхности. В отсутствие магнитного поля предполагалось, что скорость охлаждения во всех точках поверхности пластины одинакова.

Данные измерений усреднялись по шести измерениям через каждые 25 °С. Это означает, что в каждой точке проводилось по шесть измерений. В результате получалось шесть незначительно отличающихся друг от друга зависимостей температуры от времени. На каждой кривой заданному значению температуры соответствовало шесть различных значений времени τ . Эти времена суммировались и сумма делилась на шесть. Полученное значение и считалось характерным временем, соответствующим выбранному значению температуры. Такая процедура производилась во всем диапазоне температуры охлаждения с интервалом 25 °С. Ошибка в определении температуры не превышала ± 5 °С. Относительная погрешность определения временных интервалов не превышала 20%.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 3а приведена усредненная кривая зависимости температуры T от времени τ , полученная при охлаждении пластины в магнитной жидкости без магнитного поля. Из графика видно, что охлаждение происходит наиболее интенсивно в начальный период (примерно до 465 °С). Затем интенсивность охлаждения снижается. При температурах примерно 400 °С наблюдается излом на кривой. Появление точки излома связано с разрушением паровой пленки, окружающей пластину в процессе пленочного режима кипения охлаждающей среды, что соответствует началу переходного режима кипения. Наблюдения за состоянием поверхности охлаждаемой пластины, проведенные ранее, показали, что при температуре пластины выше 400 °С происходит пленочный режим кипения охлаждаемой среды. Ниже 400 °С (кривая рис. 3а) охлаждение первоначально интенсифицируется, затем при $T \sim 300$ °С вновь ослабевает.

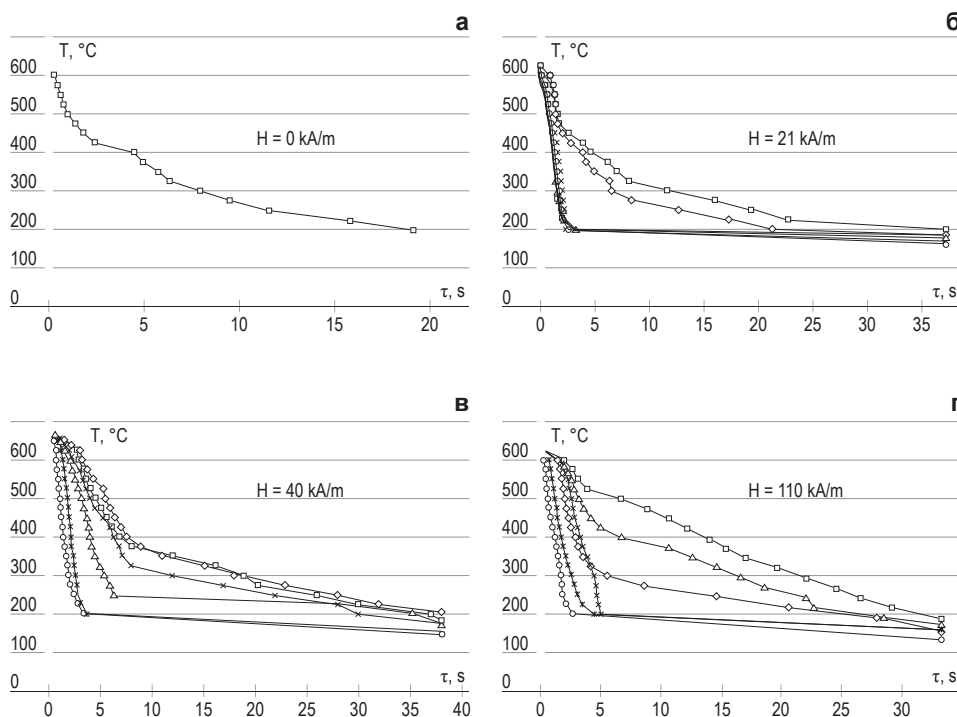


Рис. 3. Зависимость температуры T , °С, от времени τ , с, при охлаждении пластины в отсутствии магнитного поля (а) и в магнитных полях 21, 40, 110 кА/м (б, в, г).

На рис. 3б-г приведены линии скорости охлаждения точек на поверхности пластины, полученные в экспериментах по охлаждению в магнитной жидкости в приложенных магнитных полях напряженностью 21, 40 и 110 кА/м, соответственно. Из рис. 3б видно, что в магнитном поле напряженностью 21 кА/м в начальный период охлаждения в интервале температур 625–475 °С, интенсивность охлаждения всех точек поверхности пластины в пределах погрешности эксперимента одинакова. В точках 1 и 2, прилежащих к центральной части пластины, охлаждение при температурах ниже 475 °С происходит существенно менее интенсивно, чем в остальных точках поверхности. В этих точках интенсивность охлаждения не изменилась по сравнению с охлаждением без поля. Охлаждение точек 3–6 при температурах от 600 до 200 °С происходит значительно интенсивнее, чем без поля.

Увеличение скорости теплообмена в магнитном поле напряженностью 21 кА/м по сравнению с теплообменом без магнитного поля в точках пластины 3–6, расположенных ближе к ее торцам, при температурах поверхности от 625 до 200 °С можно объяснить следующим. Намагничивающаяся пластина искажает приложенное однородное магнитное поле. В результате на магнитную жидкость действуют силы, вызванные искажением магнитного

поля и пропорциональные градиенту поля. Можно показать [9], что эти силы прижимают жидкость к поверхности пластины в окрестности ее торцов. При пленочном и переходном режимах кипения магнитной жидкости в результате действия этих сил толщина паровой прослойки уменьшается. Теплообмен пластины с нагретым паром существенно ниже, чем с жидкостью. Следовательно, уменьшение толщины слоя пара приводит к увеличению теплопереноса в окрестности точек вблизи концов пластины. Кроме того, может возникать неустойчивость границы раздела магнитная жидкость-пар. В результате магнитная жидкость может соприкасаться с поверхностью пластины. Все это может приводить к интенсификации теплообмена.

Вблизи точек 1 и 2, в центральной части пластины, магнитные силы, вызванные искажением магнитного поля намагничивающейся пластиной, отталкивают жидкость от поверхности пластины [9]. В магнитном поле напряженностью 21 кА/м отталкивающие силы невелики и не приводят к существенному утолщению паровой пленки, а возможно, и к развитию неустойчивости границы раздела фаз. В результате этого не происходит заметного изменения интенсивности теплообмена в окрестности точек 1 и 2 по сравнению с охлаждением без магнитного поля.

На рис. 3в приведены кривые охлаждения различных точек поверхности пластины, полученные в результате охлаждения пластины в магнитной жидкости в магнитном поле напряженностью 40 кА/м. Из рисунка видно, что различие в ходе кривых охлаждения заметно уже и в высокотемпературной области охлаждения. При этом существенного изменения скорости теплообмена в точке 6 на торце пластины и прилегающей к торцу точке 5 по сравнению с охлаждением в магнитном поле 21 кА/м не происходит. В то же время в точках 1–4 поверхности пластины наблюдается существенное снижение скорости охлаждения по сравнению с охлаждением в магнитной жидкости в поле 21 кА/м (рис. 3б).

По-видимому, в точках 5 и 6 интенсивность теплообмена по сравнению с полем 21 кА/м не увеличилась, поскольку магнитные силы, прижимающие жидкость к полюсам пластины в окрестности этих точек, изменились незначительно. В точках 1–4 величина магнитных сил, отталкивающих магнитную жидкость от поверхности пластины, существенно возросла. Произошло увеличение толщины парового слоя, отделяющего пластину от жидкости. Уменьшился и теплоотвод от указанных точек поверхности пластины. По той же причине в точках 1, 2, 4 на поверхности пластины существенно снижается скорость охлаждения и по сравнению со скоростью охлаждения без поля. Однако, в точке 3 такое снижение скорости охлаждения наблюдается только в диапазоне температур от 625 до 450 °С. При более низких температурах охлаждение в точке 3 в поле 40 кА/м происходит все-таки более интенсивно, чем без поля.

Следует отметить, что точка 4 находится ближе к торцу пластины, чем точка 3, и силы, прижимающие жидкость к пластине в точке 4, больше, чем в

точке 3. Казалось бы паровая прослойка в точке 4 должна быть тоньше, чем в точке 3. Тем не менее, теплообмен в точке 4 происходит менее интенсивно, чем в точке 3. Возможное объяснение увеличения скорости охлаждения в точке 3 по сравнению с точкой 4 в магнитном поле 40 кА/м будет дано ниже. Дальнейшее увеличение магнитного поля приводит к новым интересным эффектам по распределению интенсивности охлаждения вдоль длины охлаждаемой пластины.

На рисунке 3г приведены кривые охлаждения различных точек поверхности пластины, полученные при охлаждении пластины в магнитной жидкости в магнитном поле 110 кА/м. Из графика видно, что в высокотемпературной области охлаждения 625–550 °С происходит существенное уменьшение интенсивности охлаждения в точках поверхности пластины 1–5. Уменьшается интенсивность охлаждения и в точке 6 на торце пластины по сравнению с интенсивностью охлаждения в магнитном поле 40 кА/м. Интенсивность охлаждения в центральной точке 1 несколько увеличивается по сравнению с интенсивностью охлаждения этой точки в магнитном поле 40 кА/м и с интенсивностью охлаждения в точке 2. По-видимому, граница раздела магнитная жидкость-пар в окрестности точек 1, 2 становится неустойчивой. Происходит подтекание магнитной жидкости к пластине в центре пластины в окрестности точки 1. В результате толщина паровой прослойки в этой области уменьшается, а теплообмен увеличивается. Кроме того, заметно, что интенсивность охлаждения в точке 3 поверхности пластины становится больше, чем интенсивность охлаждения в точке 5. По-видимому, в результате неустойчивости границы раздела магнитная жидкость-пар жидкость подтекает к пластине также и в окрестности точки 3. В результате интенсивность теплообмена в точке 3 возрастает. По этой же причине происходит и увеличение скорости теплообмена в точке 3 по сравнению с точкой 4 в магнитном поле 40 кА/м. Охлаждение значительно замедляется в точке 3 поверхности пластины, но одновременно интенсифицируется в точках 4–6 в окрестности торца пластины.

Анализ зависимости изменения скорости охлаждения от величины магнитного поля позволяет сделать вывод об определяющем влиянии величины поля на гидродинамику образования паровых полостей на различных участках поверхности охлаждаемой намагничивающейся пластины и форму полостей и, как следствие, на интенсивность теплообмена пластины с магнитной жидкостью.

Влияние магнитного поля на форму свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей намагничивающуюся пластину

Для выяснения влияния магнитного поля на образование и форму паровой полости, окружающей намагничивающуюся пластину, проводили следующие эксперименты. Холодную пластину устанавливали в не-

магнитной цилиндрической кювете, помещенной между полюсами электромагнита. Кювету заполняли магнитной жидкостью. Отношение объема магнитной жидкости V_{mf} к объему пластины $V_{mf}/V_{pl}=51$. Направление магнитного поля параллельно плоскости пластины. Схема эксперимента аналогична представленной на рисунке 1.

На рисунке 4а показана фотография пластины без магнитной жидкости (вид сверху). При наличии магнитной жидкости и приложенного внешнего магнитного поля $H = 76$ кА/м в объеме магнитной жидкости в окрестности центральной части пластины образуются две воздушные полости, по одной на каждой стороне пластины. Из эксперимента видно, что образовавшиеся воздушные полости имеют форму конусообразных воронок, сужающихся в направлении силы тяжести от верхней свободной поверхности магнитной жидкости до дна кюветы.

Два светлых пятна в центре пластины на фотографии б (рис. 4, вид сверху) – следы конусообразных воздушных полостей-воронок на дне кюветы в приложенном магнитном поле 76 кА/м. При дальнейшем увеличении суммарного объема магнитной жидкости при постоянных размерах пластины

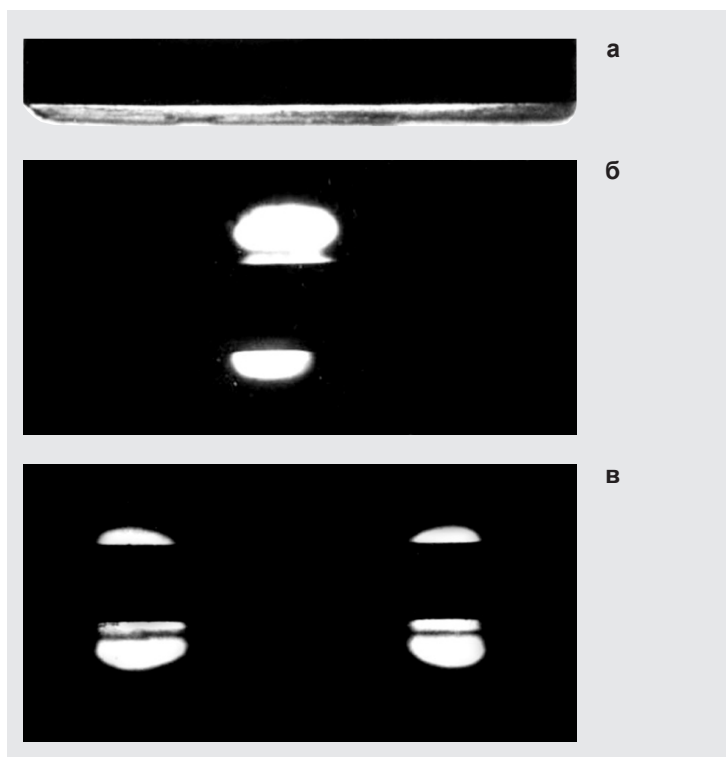


Рис. 4. Фотографии пластины без магнитной жидкости (а) и следов на дне пластины конусообразных воздушных полостей-воронок, появляющихся в объеме магнитной жидкости, в магнитных полях напряженностью 76 кА/м (б), 190 кА/м (в).

объем воздушных полостей вблизи центральной части пластины уменьшается. Уменьшается и просвет полостей на дне кюветы – сужается часть поверхности пластины, свободная от магнитной жидкости. Отметим, что при магнитных полях, меньших 76 кА/м для данного отношения V_{mf}/V_{pl} , и фиксированных размерах пластины воздушные полости не образуются. Жидкость всюду соприкасается с пластиной. Вблизи концов пластины высота столба жидкости, сравнимая с высотой пластины, наблюдается на удалении от пластины практически до границ кюветы.

Как было ясно из предыдущего, образование воздушных полостей можно объяснить действием магнитных сил на магнитную жидкость, окружающую намагничивающуюся пластину. Эти силы возникают в результате искажения приложенного однородного магнитного поля намагничивающейся пластиной. Можно показать [9], что вблизи концов пластины магнитные силы прижимают жидкость к пластине. В центре пластины магнитные силы отталкивают магнитную жидкость от пластины. В результате в центральной части пластины образуются воздушные полости. Аналогичные широкие паровые полости могут образовываться вблизи центральной части горячей пластины, охлаждаемой в магнитной жидкости. В результате теплообмен между пластиной и жидкостью в этих областях пластины уменьшается.

При увеличении напряженности магнитного поля до 138 кА/м жидкость касается центральной части пластины и вместо двух конусообразных полостей в центре пластины в объеме магнитной жидкости образуются четыре конусообразных полости-воронки по две с каждой стороны пластины. Полости смещаются из центральной части пластины к ее торцам. При дальнейшем увеличении магнитного поля до 165 кА/м размеры полостей уменьшаются, уменьшаются и следы полостей на дне кюветы. Полости смещаются в направлении торцов пластины. В магнитном поле 190 кА/м полости вновь увеличиваются в объеме, фотография их следов на дне кюветы приведена на рисунке 4в.

Образование воздушных полостей в центре пластины, их форма, размеры и переход от двух полостей к четырем зависят при прочих равных условиях (размеры пластины, тип магнитной жидкости и т.д.) не только от величины магнитного поля, но и от отношения объема магнитной жидкости в кювете V_{mf} к полному объему пластины V_{pl} , погруженной в жидкость. Это утверждение справедливо и в том случае, когда высота пластины превышает высоту кюветы с магнитной жидкости. Возможно, это связано с тем, что вблизи торцов пластины в приложенном магнитном поле магнитная жидкость поднимается под действием магнитных сил по всей высоте торцов до верхней грани пластины, независимо от ее высоты. Так, при отношении $V_{mf}/V_{pl} = 32$ во всем диапазоне магнитного поля от 110 до 190 кА/м наблюдаются две воздушные полости с устойчивой границей раздела магнитная жидкость-воздух. Подтекания жидкости к пластине и перехода от двух к четырем воздушным

полостям-воронкам не происходит. Аксонометрический рисунок свободной поверхности магнитной жидкости в этом случае соответствует приведенному на рисунке 5а. Однако объем полостей с ростом поля увеличивается. Увеличиваются и следы воздушных полостей-воронок на дне пластины при $V_{mf}/V_{pl} = 32$. Границы раздела магнитная жидкость-воздух устойчива при всех значениях поля. При значениях поля меньших 110 кА/м воздушные полости отсутствуют – жидкость всюду соприкасается с пластиной.

Таким образом, с ростом отношения V_{mf}/V_{pl} , неустойчивость границы раздела магнитная жидкость-воздух, образование двух воздушных полостей в объеме жидкости в области центральной части пластины и переход от двух к четырем воздушным полостям в окрестности торцов пластины возникают при меньших величинах магнитного поля.

Можно выявить аналогию между формой свободной поверхности магнитной жидкости, окружающей холодную намагничивающуюся пластину, и формой паровой полости в объеме магнитной жидкости, окружающей нагретую пластину. Так, в магнитном поле 21 кА/м в центральной части охлаждаемой пластины с каждой ее стороны в объеме магнитной жидкости могут образовываться утолщения паровой пленки. С увеличением магнитного поля утолщения паровой пленки могут захватывать соседние с центральной частью области пластины, простираясь к ее торцам. Затем возникают четыре утолщения паровой пленки вблизи торцов пластины по два с каждой ее стороны. С дальнейшим увеличением поля каждое из четырех утолщений вначале уменьшается, а затем увеличивается в размере, мигрируя вдоль длины пластины.

Такое изменение формы паровой полости соответствует образованию вначале двух воздушных полостей-воронок в центральной части холодной пластины, окруженной магнитной жидкостью, при некотором значении магнитного поля. С увеличением поля размер воздушных полостей-воронок увеличивается, простираясь вдоль длины пластины. При дальнейшем увеличении поля возникают четыре воздушных полости в окрестности торцов пластины, толщина и размер которых изменяются с ростом поля, захватывая то одни, то другие области поверхности пластины.

Увеличение либо уменьшение толщины паровой пленки приводит, соответственно, к уменьшению, либо увеличению интенсивности теплообмена между магнитной жидкостью и пластиной.

В экспериментах по охлаждению пластины объем магнитной жидкости в кювете большой, отношение $V_{mf}/V_{pl} = 160$, так что пластина полностью погружена в жидкость. Можно предположить, что переход от двух к четырем утолщениям паровой полости происходит при меньших значениях поля по сравнению с переходом от двух к четырем воздушным полостям, возникающим в экспериментах при исследовании форм свободной поверхности жидкости, окружающей холодную пластину.

Выводы

В результате проведенных исследований получены графики зависимости температуры различных точек на поверхности намагничивающейся пластины от времени в магнитных полях различной напряженности. Показано, что интенсивность теплообмена между пластиной и жидкостью существенно зависит от величины приложенного магнитного поля и расположения на пластине элементов ее поверхности. Обнаружено, что в магнитном поле напряженностью 21 кА/м, на торцах пластины интенсивность теплообмена намного больше в магнитном поле, чем без поля. С увеличением приложенного магнитного поля интенсивность теплообмена в центральной части пластины снижается по сравнению с таким же охлаждением в отсутствие поля.

Анализ описанных экспериментов позволяет сделать вывод об определяющем влиянии величины магнитного поля на гидродинамику образования паровых полостей вблизи различных участков поверхности охлаждаемой пластины.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-01-00037).

Библиографический список

1. Гогосов В. В., Симоновский А. Я. О локально-неоднородном охлаждении при закалке в магнитной жидкости // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1989. № 2. С. 3.
2. Gogosov V. V., Simonovskii A. Ya., Smolkin R. D. Quenching and separation in magnetic fluids // JMMM. 1990. V. 85. №. 1–3. P. 227.
3. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // 1993. V.U.Z. Mashinostr. V.6 P. 1.
4. Bashtovoi V.G., G. Challant, Volkova O.Yu. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids// Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 1993. V. 122. P. 305.
5. Junhong L., Jianming G., Zhiwei L. Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid // Int J Heat Mass Transf. 2004. V. 41. P. 170.
6. Кобозев М.А., Симоновский А.Я. Метод измерения, экспериментальная установка и результаты измерения частоты образования пузырьков пара при кипении магнитной жидкости на одиночном центре парообразования // ЖТФ. 2007. Т. 77 №11. С. 31.
7. Симоновский А.Я., Яновский А.А. Влияние однородного магнитного поля на теплообмен при кипении магнитной жидкости на неограниченной поверхности // Вестник Ставропольского государственного университета. 2011.

8. Syam S.L.; Singh M.K., Sousa A. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications // *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013. V. 44 P. 7–14.
9. Yanovskii A.A., Simonovskii A.Ya., Klimenko E.M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. V. 50. № 3. P. 260.
10. Yanovskiy A.A., Simonovskiy A.Ya., Kholopov V.L., Chuenkova I.Yu. Heat Transfer in Boiling Magnetic Fluid in a Magnetic Field // *Solid State Phenomena*. 2015. № 233–234. P. 339.
11. Khoshmehr H.H., Saboonchi A., Shafii M.B., Jahani N. The study of magnetic field implementation on cylinder quenched in boiling ferro-fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2014. V. 64. № 1–2. P. 331.
12. Zupan J., Renjo M.M. Thermal and rheological properties of water-based ferrofluids and their applicability as quenching media // *20th International Conference on Magnetism. Conf. Proc. ICM 2015*. V. 75. P. 1458.
13. Abdollahi A. Salimpour M.R., Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferro-fluid // *Applied Thermal Engineering*. 2017. V.111. P.1101.

References

1. Gogosov V.V., Simonovskij A.Ya. O lokalno-neodnorodnom oxlazhdenii pri zakalke v magnitnoj zhidkosti (On locally inhomogeneous cooling during quenching in a magnetic fluid) // *Izv. an sssr. mexanika zhidkosti i gaza*. 1989. № 2. P. 3.
2. Gogosov V.V., Simonovskii A.Ya., Smolkin R.D. Quenching and separation in magnetic fluids // *JMMM*. 1990. V. 85. №. 1–3. P. 227.
3. Mirkin L.I., Shesterikov S.A., Simonovski A.Y. Equipment and method for quenching steels in a magnetic liquid // *1993. V.U.Z. Mashinostr.* V.6 P. 1.
4. Bashtovoi V.G., G. Challant, Volkova O.Yu. Boiling Heat Transfer in Magnetic Fluids// *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1993. V. 122. P.305.
5. Junhong L., Jianming G., Zhiwei L. Experiments and mechanism analysis of pool boiling heat transfer enhancement with water-based magnetic fluid // *Int J Heat Mass Transf.* 2004. V. 41. P. 170.
6. Kobozev M.A., Simonovskij A.Ya. Metod izmereniya, eksperimentalnaya ustanovka i rezultaty izmereniya chastoty obrazovaniya puzyrkov para pri kipenii magnitnoj zhidkosti na odinochnom centre paroobrazovaniya (The method of measurement, the experimental setup and the results of measuring the frequency of the formation of bubbles of vapor upon boiling of a magnetic fluid at a single vaporization center) // *ZHTF*. 2007. V. 77. № 11. p. 31.
7. Simonovskij A.Ya., Yanovskij A.A. Vliyanie odnorodnogo magnitnogo polya na teploobmen pri kipenii magnitnoj zhidkosti na neogranichennoj poverxnosti (Influence of a homogeneous magnetic

- field on heat transfer upon boiling of a magnetic fluid on an unbounded surface) // Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta. 2011.
8. Syam S. L.; Singh M. K., Sousa A. Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe_3O_4 nanofluid for heat transfer applications // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2013. V. 44 P. 7–14.
 9. Yanovskii A.A., Simonovskii A.Ya., Klimenko E.M. On the Influence of the Magnetic Field upon Hydrogasdynamic Processes in a Boiling Magnetic Fluid // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014. V. 50. № 3. P. 260.
 10. Yanovskiy A. A., Simonovsky A. Ya., Kholopov V. L., Chuenkova I. Yu. Heat Transfer in Boiling Magnetic Fluid in a Magnetic Field // Solid State Phenomena. 2015. № 233–234. P. 339.
 11. Khoshmehr H.H., Saboonchi A., Shafii M.B., Jahani N. The study of magnetic field implementation on cylinder quenched in boiling ferro-fluid // Applied Thermal Engineering. 2014. V. 64. № 1–2. P. 331.
 12. Zupan J., Renjo M.M. Thermal and rheological properties of water-based ferrofluids and their applicability as quenching media // 20th International Conference on Magnetism. Conf. Proc. ICM 2015. V. 75. P. 1458.
 13. Abdollahi A. Salimpour M.R., Etesami N. Experimental analysis of magnetic field effect on the pool boiling heat transfer of a ferro-fluid // Applied Thermal Engineering. 2017. V. 111. P. 1101.