

А. В. Радионов, канд. техн. наук, директор (ООО НПВП «Феррогидродинамика», г. Николаев, Украина)

## Влияние испаряемости магнитной жидкости на работоспособность и техногенную безопасность магнитожидкостных герметизирующих комплексов

*Рассмотрено влияние испаряемости магнитной жидкости, находящейся в зазоре магнитожидкостного герметизатора, на его работоспособность и техногенную безопасность. Проанализирована задача об испарении коллоидного раствора наночастиц. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению скорости испарения магнитных жидкостей на различных основах, сделан вывод об уменьшении скорости испарения при воздействии магнитного поля на магнитную жидкость.*

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, испарение, наночастица, магнитное поле.

*Розглянуто вплив випаровування магнітної рідини, що знаходиться в зазорі магніторідинного герметизатора, на його працездатність і техногенну безпеку. Проаналізовано завдання про випаровування колоїдного розчину наночастинок. Приведені результати експериментальних досліджень з визначення швидкості випаровування магнітних рідин на різних основах. Зроблено висновок про зменшення швидкості випаровування під час впливу магнітного поля на магнітну рідину.*

**Ключові слова:** магнітна рідина, випаровування, наночастка, магнітне поле.

*The effect of the evaporation of the magnetic fluid in the gap of magnetic seal on its performance and technological safety is considered. The evaporation problem of the colloidal solution of nanoparticles is analyzed. The results of experimental studies to determine the evaporation rate of magnetic fluids on various bases are presented. It is concluded that the evaporation rate of the magnetic fluid when exposed to a magnetic field is reduced.*

**Keywords:** magnetic fluid, evaporation, nanoparticles, magnetic field.

### Постановка задачи

На сегодняшний день техногенную безопасность следует рассматривать как часть экологической безопасности, причем одну из важнейших ее частей, так как техногенные аварии и катастрофы наносят окружающей среде существенно больший вред, чем стационарные выбросы загрязняющих веществ [1].

Техногенная безопасность определяется надежностью и безаварийностью технических систем. Анализ аварий и катастроф показывает, что в большинстве случаев они связаны с отказами устройств, разрушениями элементов, выходами из строя агрегатов.

Для Украины ситуация усугубляется критическим значением величины износа технологического оборудования подавляющего числа отраслей отечественной промышленности. При такой высокой изношенности эксплуатационного парка (достигает 60–90 %) вопрос обеспечения экологической безопасности невозможно решить массовым обновлением технических устройств [2]. Кроме того, физическое и моральное старение оборудования все последние годы

значительно опережает темпы замены и обновления. Поэтому необходим поиск резервов лучшего использования качественных характеристик эксплуатируемой техники, в том числе путем ее модернизации с заменой деталей и узлов, где вероятность отказа высока.

К таким «узким» местам относятся подшипниковые узлы многих видов оборудования (электродвигатели, редукторы, мешалки, вентиляторы и т. д.). Анализ выхода из строя подшипниковых узлов показал, что одной из причин является невозможность обеспечения практически полной герметичности. Потенциальные возможности традиционных уплотнений в значительной мере себя исчерпали, и обеспечить близкую к абсолютной герметичность они не в состоянии.

Выполнить эту задачу могут магнитожидкостные герметизирующие комплексы (МЖГК). Они достаточно хорошо себя зарекомендовали для защиты подшипниковых узлов при тяжелых условиях эксплуатации (сильная запыленность, абразив, влага и т. д.) Величина зазора в начале эксплуатации составляет 0,2–0,25 мм, но значительно увели-

чивается по мере износа оборудования [3, 4, 5].

Работоспособность МЖГК зависит от эксплуатационных характеристик. Одной из таких характеристик является испаряемость магнитной жидкости (МЖ). Ее изучению уделялось мало внимания, это связано с тем, что испаряемость МЖ практически полностью определяется испаряемостью основы МЖ. И задача ее подбора по испаряемости зачастую сводится к подбору основы по известным данным о ее испаряемости в различных температурных диапазонах [6].

Однако тенденция развития многих промышленных предприятий последних лет, связанная со стремлением увеличить время работы между капитальными ремонтами до 2–3 лет, требует более точной информации о скорости испарения МЖ, являющейся коллоидным раствором с наночастицами.

### Исследование вопроса испарения коллоидного раствора наночастиц

В последние годы задача об испарении коллоидного раствора на-

ночастиц привлекла к себе значительное внимание. Это связано как с чисто научным интересом, так и многочисленными приложениями. Процессы, протекающие при испарении капли, находят применение в производстве наноструктур, создании структурированных поверхностей микро- и наномасштабов, для растягивания ДНК и РНК, полиграфии и многих других приложениях [7].

Большое число работ посвящено исследованию кипения наножидкостей. Современное состояние данной проблемы для магнитных наножидкостей отражено в монографии [8]. В то же время процесс испарения капель магнитных жидкостей не изучался вообще и практически не изучалось испарение обычных капель наножидкостей. Исключение составляют ряд работ, в которых измерялась скорость испарения в окружающую неподвижную воздушную среду подвешенных к капилляру капель наножидкости, а также их поверхностное натяжение и давление насыщенных паров.

В качестве базовой жидкости в работе [9] использовалась вода, а частиц-лапонит, Ag и, концентрация которых составляла 0,05 % и только для лапонита 0,5 %. Главным выводом этой работы является слабое влияние добавки наночастиц на поверхностное натяжение жидких капель, а также скорость их испарения в начальные моменты времени. При достижении некоторого критического размера скорость испарения снижается, причем наиболее сильно этот эффект проявляется для частиц серебра. Для лапонита изменения скорости испарения капле не наблюдается, а наножидкости с частицами занимают промежуточное положение между ними. В работе [10] проведено экспериментальное исследование испарения капле топлива (этанол, н-декан и др.) в режиме свободной и вынужденной конвекции с добавкой наночастиц алюминия. Главным выводом работы является снижение скорости испарения для наножидкости, что противоречит результатам исследования наножидкостей с дистиллированной водой в качестве базовой жидкой среды [10,11].

Наличие наночастиц в растворах хладагент-масло изучалось в работе [12]. Авторы отмечали повышение давления насыщенных паров растворов хладагента в наномаслах и уменьшение их поверхностного натяжения, что должно приводить к увеличению интенсивности ис-

парения. Однако в этой же статье отмечается, что все опубликованные исследования по присутствию наночастиц в хладагентах носят фрагментарный характер и достоверных выводов сделать невозможно. Подтверждая это, в работе [13] подчеркивается «аномально большое» время испарения нанокапли при увеличении давления насыщенных паров.

На противоречивость данных о влиянии дисперсной фазы и поверхностно-активных веществ (ПАВ) на интенсивность испарения даже для обычных коллоидных растворов и эмульсий указывается в [14]. В частности, еще Кнудсен отметил существенное изменение скорости испарения капелек ртути, если последние подвергались даже незначительному окислению [13]. В достаточно давно изданных монографиях [15, 16] также отмечается сильное уменьшение скорости испарения капле воды при наличии даже небольших примесей ПАВ.

Классическая квазистационарная теория испарения капли не позволяет разрешить эти проблемы, так как она построена на предположении, что концентрация пара на поверхности капли равна концентрации насыщенного пара при температуре капли. Это справедливо при радиусе капли, значительно превышающем среднюю длину свободного пробега молекул пара [7], т. е. для наночастиц может не выполняться. Для капли коллоидного раствора наличие дисперсной фазы приводит к дополнительным эффектам. Необходимо учесть структуру межфазной границы, в котором концентрация частиц в общем случае не является постоянной величиной. Присутствие частиц в поверхностном слое влияет на скорость испарения, поскольку средний химический потенциал молекул пара и их энтропия за счет сорбционных свойств поверхности частиц и зависимости эффективной поверхности раствора от наличия дисперсной фазы изменяются [17].

Процесс испарения капле из коллоидного раствора является многофакторным и нелинейным по вкладу отдельных составляющих. Даже не очень существенное уточнение теории испарения приводит к сильному усложнению используемых уравнений. В литературе приводятся решения лишь для отдельных предельных или частных случаев испарения, так как решить задачу в общем виде возможно только численными методами. При этом

различные авторы придерживаются различных точек зрения о механизмах испарения, что приводит к качественно отличающимся друг от друга результатам [18].

Наличие магнитного поля еще больше усложняет механизм испарения капле магнитной жидкости ввиду способности МЖ ощутимо взаимодействовать с магнитным полем. Любая магнитная жидкость является парамагнетиком: в отсутствии внешнего магнитного поля магнитные моменты наночастиц ориентированы хаотически, тем самым, компенсируя друг друга, и равновесная остаточная намагниченность МЖ равна нулю; в слабых полях стремлению магнитных моментов выстроиться вдоль приложенного поля мешает тепловое движение; с ростом интенсивности приложенного поля направления магнитных моментов наночастиц становятся все более упорядоченными, и в очень сильных полях наночастицы ориентированы полностью, а намагниченность МЖ достигает насыщения. Характерные значения диаметров магнитных частиц составляют приблизительно 10 нм, что оказывается меньше границы однодоменности. При таких размерах частицы в магнитном поле остаются однородно намагниченными, а ориентационные флуктуации магнитных моментов частиц и перемангличивания всего ансамбля определяются нееевским и броуновским механизмами [19]. Именно такие условия создаются для магнитной жидкости в зазоре магнитождкостного герметизатора.

Влияние магнитного поля на процесс испарения магнитной жидкости заключается в появлении объемных магнитных сил, удерживающих весь объем наножидкости в области сильного магнитного поля; в рекордно высоких для парамагнитных систем значениях магнитных характеристик; в зависимости эффективных гидродинамических, реологических и теплофизических характеристиках МЖ от напряженности внешнего магнитного поля. Также необходимо отметить, что концентрация наночастиц в межфазном (испаряемом) слое существенно отличается от концентрации феррочастиц в объеме магнитной жидкости, что обусловлено магнитофорезом коллоидных наночастиц [20].

Структурирование феррочастиц во внешнем магнитном поле приводит к созданию ансамбля наночастиц, свойства которых, могут сильно отличаться от свойств как

индивидуальной наночастицы, так и объемного материала подобно тому, как свойства наночастиц отличаются от свойств микрообъема аналогичного вещества.

В работах [8, 21, 22] изучался тепломассоперенос при кипении магнитных жидкостей. Температуры, создаваемые в экспериментах, значительно превышали предельно допустимые рабочие температуры МЖ в зазоре герметизатора. Магнитная жидкость практически мгновенно расслаивалась и испарялась ее жидкая фаза.

В литературе появились в последнее время попытки развить более полную теорию процесса испарения, включающую как диффузию пара в воздухе, так и эффекты гидродинамики и теплообмена. Однако противоречивость и расхождение в экспериментальных данных различных авторов свидетельствует о том, что до понимания физической сути происходящих при испарении наножидкости процессов еще далеко. Очевидно, что на различные наночастицы и жидкие основы влияние физических полей (магнитное, электрическое и т. д.) непредсказуемо. Для сравнения скорости испарения промышленных магнитных жидкостей было решено провести экспериментальное исследование. Естественно, что никаких обобщающих выводов на другие типы магнитных жидкостей, их концентрацию, размер и материал наночастиц и т. д. делать невозможно.

Поэтому целью работы является экспериментальные исследования влияния интенсивности испарения промышленных магнитных жидкостей, эксплуатирующихся в зазоре герметизатора, на работоспособность и долговечность магнитожидкостных герметизирующих комплексов, от которых зависит техногенная безопасность промышленных объектов.

### Основная часть

В работе были исследованы три типа магнитных жидкостей, получившее наиболее широкое применение в промышленности. Жидкими основами для этих жидкостей являлись вакуумное масло ВМ-3 (образец 1), кремнийорганическая жидкость ПЭС-3 (образец 2) и рабочая гидравлическая жидкость ЛЗ-МГ-2 (образец 3).

Все три типа жидкостей представляли собой однородный коллоидный раствор однодоменных

частиц магнетита. В качестве стабилизатора (ПАВ) использовалась олеиновая кислота. Средний диаметр наночастиц магнетита составлял около 8 нм., т. к. при таком размере седиментационная устойчивость и стабильность магнитных свойств МЖ сохраняются на протяжении нескольких десятков лет [23]. Намагниченность насыщения образцов МЖ и концентрации наночастиц практически не отличались друг от друга. Образцы размещались в помещении, температура окружающей среды изменялась незначительно.

Для понимания происходящих при испарении магнитных жидкостей процессов было решено определять испаряемость как относительное изменение массы образца МЖ согласно ГОСТ 9566 и ГОСТ 20354

$$\delta = \frac{m_{\text{исх}} - m}{m_{\text{исх}}} = 100\%. \quad (1)$$

где  $m_{\text{исх}}$  – исходная масса (нетто) образца МЖ на начало измерений,  $m$  – масса МЖ на день измерения. Массы определялись с помощью электронных весов с точностью  $\pm 1$  мг.

Каждый образец МЖ заливали в две стеклянные кюветы (чашки Петри) диаметром около 9 см. Толщина слоя МЖ составляла 3 мм. Одна кювета с МЖ устанавливалась на постоянный магнит из сплава

Nd-Fe-B. Вторая кювета с МЖ находилась вне поля.

По полученным величинам были построены графики временной зависимости относительного изменения массы.

Для МЖ на основе вакуумного масла и ПЭС-3 на начальном этапе не наблюдалось никаких изменений массы образцов. Для образца 2 процесс испарения начался через месяц после начала исследований (см. рис. 2), а для образца 1 изменения массы стали заметными спустя три месяца (см. рис. 1). Для образца 3 изменения массы наблюдались с первых дней наблюдения. В течение всего времени испытаний все магнитные жидкости оставались однородными, без признаков расслоения.

При этом были отмечены отличия в протекании процесса испарения для выбранных образцов МЖ. Так для образцов 1 и 2 воздействие магнитного поля привело к увеличению скорости испарения, а для образца 3 испарения происходило интенсивнее в отсутствии магнитного поля.

Сравнительный анализ графиков на рис. 1–3 показал, что испаряемость образцов магнитной жидкости в поле и без него отличаются друг от друга незначительно. В то же время площадь поверхности испарения при воздействии магнитного поля значительно выше. Это объясняется тем, что конфигурации свободной поверх-

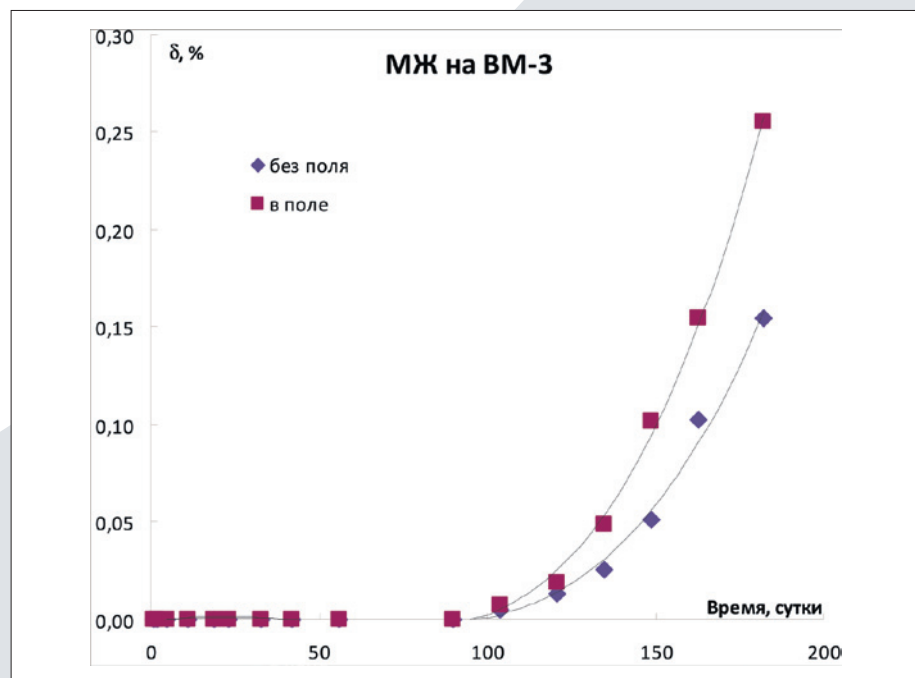
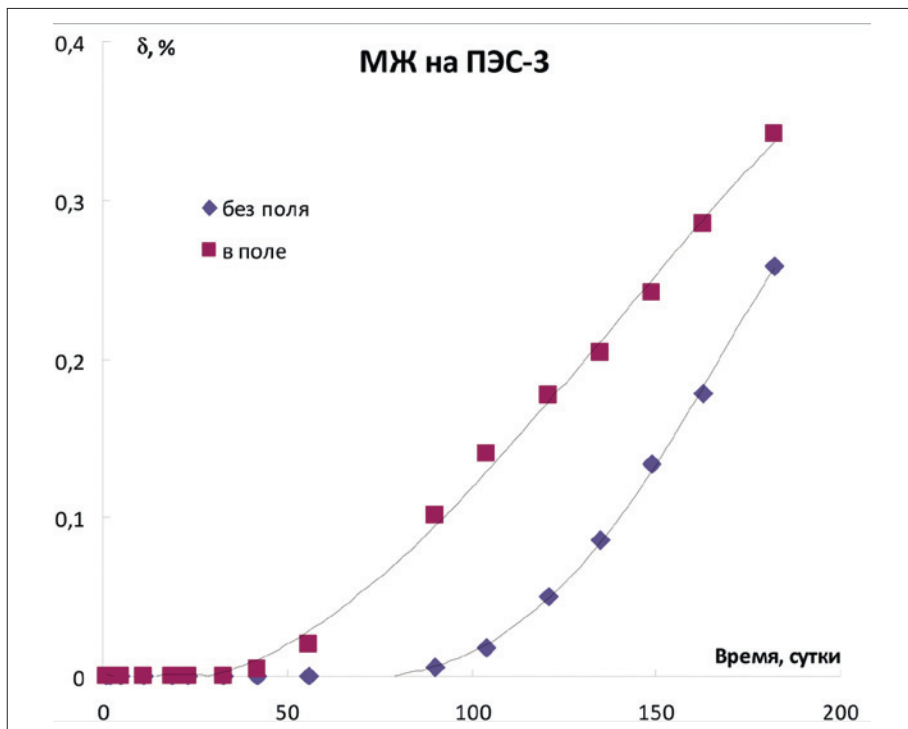


Рис. 1. Временная зависимость относительного изменения массы магнитной жидкости на жидкой основе ВМ-3

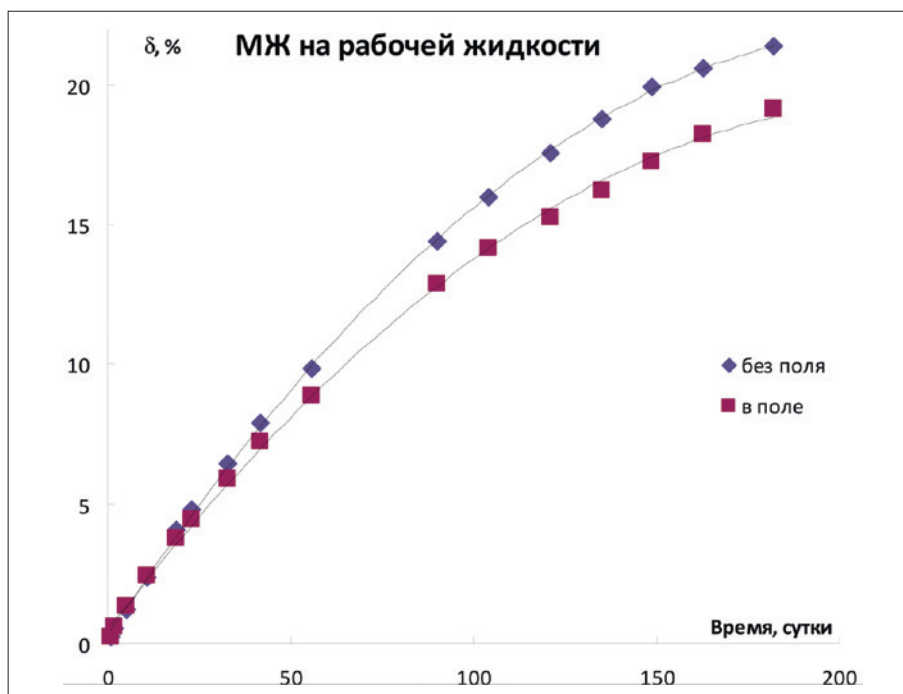


**Рис. 2. Временная зависимость относительного изменения массы магнитной жидкости на основе ПЭС-3**

ности магнитной жидкости в вертикальном магнитном поле отнюдь не горизонтальная и идеально гладкая, что присуще всем жидкостям. При превышении напряженности поля некоторого критического значения на ней начинают зарождаться конические выступы, которые, вытягиваясь вдоль направления поля, образуют характерную «ежевидную» структуру (см. рис. 4).

Причиной этого является зависимость действующей на магнитную жидкость пондеромоторной силы от напряженности макроскопического поля, которая представляет собой сумму напряженностей полей внешних источников и собственного поля магнитной жидкости, зависящего от формы занимаемой полем области пространства. При периодической деформации свободной поверхности напряженность поля под ее буграми вследствие стремления силовых линий замыкается через среду с более высоким значением магнитной проницаемости увеличивается, а под впадинами – уменьшается [24, 25]

Поэтому на следующем этапе было решено исследовать испаряемость выбранных образцов МЖ в условиях, близких к их применению в магнитожидкостных герметизаторах (МЖГ). С учетом того, что температура в зазоре магнитожидкостного герметизатора может изменяться в широких пределах



**Рис. 3. Временная зависимость относительного изменения массы магнитной жидкости на основе жидкости ЛЗ-МГ-2**

(223–373 К), решено было определить скорость испарения образцов магнитной жидкости при различных температурах.

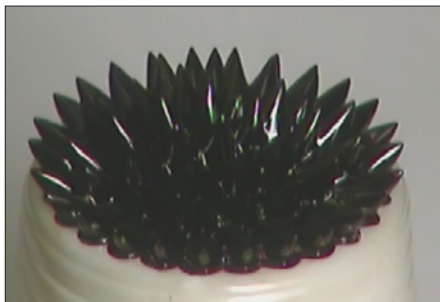
Для проведения экспериментов была использованная емкость (рис. 5), состоящая из двух крышек, соединяемых между собой винтами. С помощью винтов можно было регулировать толщину слоя маг-

нитной жидкости в зазоре между крышками. Между крышками был предусмотрен зазор, связывающий МЖ с окружающей средой.

Наиболее широко МЖГ устанавливались на электродвигатели различных марок для защиты подшипниковых узлов от попадания в них капельной влаги, предотвращения вытекания масла и т. д. При этом рабочая температура в зазоре МЖГ составляет приблизительно 50 °С [26].

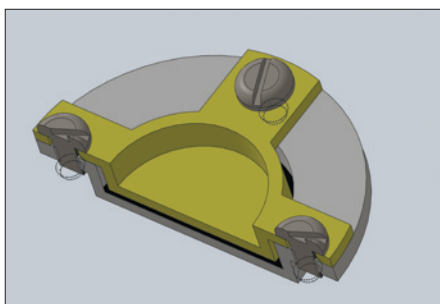
Учитывая это, второй этап исследования испаряемости трех образцов МЖГ проводился в сушильном шкафу при температуре 50 °С. Каждый образец МЖ заливался в емкость, показанную на рис. 5. Одна емкость с МЖ устанавливалась на постоянный магнит, вторая емкость с МЖ устанавливалась без магнитного поля. Шесть образцов МЖ испытывались в сушильном шкафу в течение месяца. Испаряемость определялась по формуле (1), измерения массы для каждого из образцов проводились раз

в сутки. Анализ полученных результатов показал, что испаряемость магнитной жидкости на основе ВМ-3 не изменилась, как в присутствии магнитного поля, так и при его отсутствии. Для магнитной жидкости на основе ПЭС-3 потеря массы на испарение для образца вне магнитного поля составила



**Рис. 4. Магнитная жидкость под действием магнитного поля**

0,03 %, а у емкости, установленной на постоянный магнит испаряемость не изменилась. Изменение



**Рис. 5. Емкость для моделирования испаряемости магнитной жидкости в зазоре герметизатора**

скорости испарения для рабочей жидкости ЛЗ-МГ-2 от времени приведено на рис. 6. Здесь процесс испарения шел значительно интенсивней, чем при комнатной температуре (см. рис. 3). Интенсивность испарения первоначально была выше у образца без магнитного поля. С течением времени ввиду повышения концентрации дисперсной фазы возрастание испаряемости замедлилось и вышло на «насыщение».

Анализ приведенного на рис. 6 графика показывает, что интенсивность испарения МЖ на основе масла рабочей жидкости без магнитного поля на начальном этапе в несколько раз выше, чем у образца, к которому подведено поле. В то же время потеря более 20 % массы жидкости на испарение не позволяет ее применять для относительно высоких температур. Это объясняется тем, что рабочая гидравлическая жидкость ЛЗ-МГ-2 (ТУ 38.101328-81) содержит керосиновые фракции. На данной основе, благодаря отличным низкотемпературным характери-

кам, магнитная жидкость была разработана для аммиачных систем [27], для температур от 50 °С она не применима.

На третьем этапе было решено испытать в сушильном шкафу при практически максимальной для магнитожидкостных устройств температуре, равной 95 °С, образцы магнитной жидкости на основе ВМ-3 и ПЭС-3 по методике, аналогичной применявшейся на втором этапе. Результаты исследований для МЖ на ВМ-3 приведены на рис. 7. Для МЖ на ПЭС-3 графики не проводятся, т. к. их общий вид сохраняет те же тенденции, что и для МЖ на жидкой основе ВМ-3.

Из рассмотрения графиков на рис. 7 можно сделать вывод, что магнитное поле уменьшает скорость испарения жидкости, что является положительным фактором для увеличения времени работы МЖГ. В то же время основным критерием для изготовления МЖ с повышенными требованиями по испаряемости является выбор жидкой основы. Наиболее

## Выводы

1. Работоспособность и техногенная безопасность магнитожидкостного герметизирующего комплекса зависит от испаряемости магнитной жидкости в зазоре герметизатора, как одной из основных эксплуатационных характеристик.

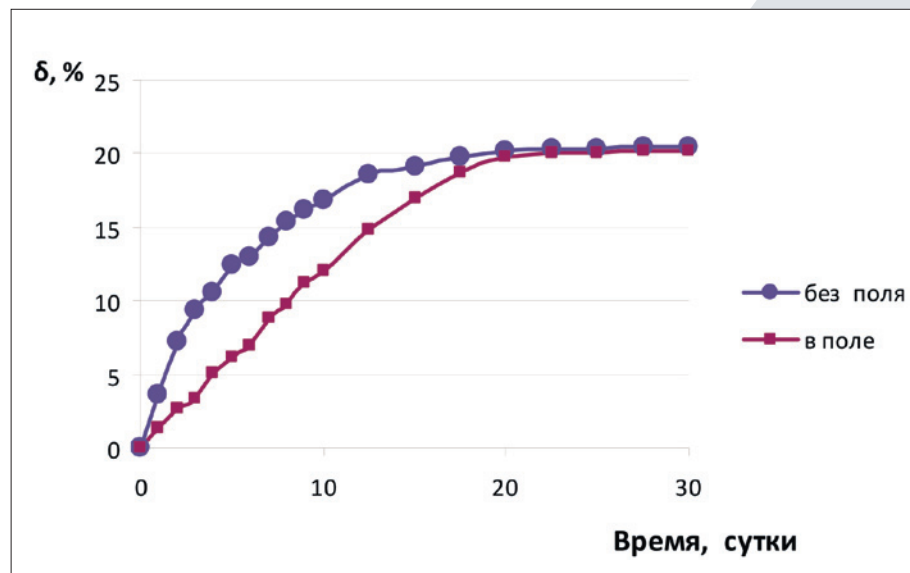
2. Жидкие основы МЖ с низкой испаряемостью имеют более длительный срок службы.

3. Действие магнитного поля замедляет испаряемость магнитной жидкости.

4. Перспективными являются синтез магнитной жидкости на жидких основах Апиезон и Алкарен, т. к. они обогащены парафино-нафтеновыми углеводородами, не содержат легких и средних фракций ароматических углеводородов и поэтому характеризуются низкими показателями испаряемости.

## Список литературы:

1. Надежность технических систем и техногенный риск / [В. А. Акимов, В. Л. Лапин, В. М. По-



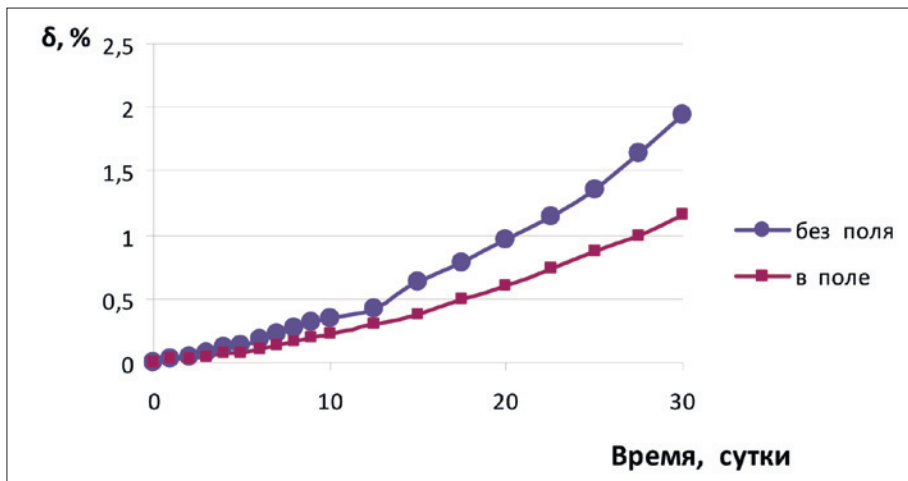
**Рис. 6. Изменение скорости испарения магнитной жидкости на основе жидкости ЛЗ-МГ-2 от времени**

приемлемых результатов следует ожидать от масел, применяемых в вакуумной технике. Только для этих масел испаряемость является важнейшей экологической и эксплуатационной характеристикой, а показатель испаряемости как функция давления насыщенных паров применяется в качестве основного отбраковочного показателя [28].

пов и др.]. – М.: ЗАО ФИД «Деловой Экспресс», 2002. – 368 с.

2. Топоров А. А. Новый подход к анализу техногенноопасных ситуаций на технологических производствах / А. А. Топоров // Наукові праці ДонНТУ. Серія: Хімія і хімічна технологія. – Донецьк, ДонНТУ. – 2005. – Вип. 95. – С. 126–130.

3. Радионов А. В. Магнито-жидкостные герметизирую-



**Рис. 7. Изменение скорости испарения магнитной жидкости на жидкой основе ВМ-3**

щие комплексы / А. В. Радионов, С. С. Рыжков // *Збірник наукових праць НУК. – Николаев, НУК. – 2013. – № 4. – С. 44–51.*

4. Радионов А. В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов в промышленной энергетике / А. В. Радионов // *Гірнична електромеханіка та автотранспорт. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 87. – С. 134–138.*

5. Радионов А. В. Комбинированные магнитожидкостные герметизаторы – эффективная альтернатива бесконтактным уплотнениям подшипниковых узлов с жидкой смазкой / А. В. Радионов, А. Н. Виноградов // *Збагачення корисних копалин: наук. – техн. зб. – 2009. – Вып. 35 (76). – С. 148–155.*

6. Магнитные жидкости в машиностроении / [Д. В. Орлов, Ю. О. Михалев, Н. К. Мышкин и др.]: Под общ. ред. Д. В. Орлова, В. В. Подгоркова. – М.: Машиностроения, 1993. – 271 с.

7. Лебедев-Степанов П. В. Введение в самосборку ансамблей наночастиц / П. В. Лебедев-Степанов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2012. – 184 с.

8. Симоновский А. Я. Проблемы тепло- и массопереноса в нанодисперсных магнитных жидкостях / А. Я. Симоновский, О. А. Гришанина. – Ставрополь: СевКазГТУ, 2010. – 296 с.

9. Chen R. – H. Effect of nanoparticles on nanofluid droplet evaporation / R. – H. Chen, T. X. Phuoc, D. Martello // *Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53. – P. 3677–3682.*

10. Gan Y. Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles unde

natural and forced convection / Y. Gan, L. Qiao // *Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2011. – Vol. 54. – P. 2459–2466.*

11. Терехов В. И. Экспериментальные исследования испарения капель наножидкости в потоке сухого воздуха / В. И. Терехов, Н. Е. Шишкин // *Сборник научных статей «Современная наука». – 2011. – № 2(7). – С. 197–201.*

12. Железный В. П. Перспективы новых рабочих тел на основе наножидкостей для повышения энергоэффективности холодильного оборудования / В. П. Железный, О. Я. Хлиева // *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці: матеріали V Міжнар. наук. – техн. конф. – Миколаїв: НУК, 2014. – С. 307–310.*

13. Козырев А. В. Испарение сферической капли в газе среднего давления / А. В. Козырев, А. Г. Сытников // *Успехи физических наук. – 2001. – Том 171, № 7. – С. 765–775.*

14. Павленко А. М. Кинетика испарения воды из эмульсии / А. М. Павленко, Б. И. Басюк // *Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25. – № 4. – С. 3–6.*

15. Грин Х. Аэрозоли-пыли, дымы и туманы / Х. Грин, В. Лейн. – М.: Химия, 1972. – 270 с. 16.

Фукс Н. А. Испарение и рост капель в газообразной среде (*Итоги науки: физико-математические науки*) / Н. А. Фукс. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 92 с. 17.

Зимон А. Д. Коллоидная химия наночастиц. Часть 1. Особенности и свойства наночастиц / А. Д. Зимон. – М.: МГУТУ, 2010. – 152 с. 18.

Тарасевич Ю. Ю. Качественный анализ закономерностей высыхания капли многокомпонентного раствора на твердой подложке / Ю. Ю. Тарасевич, Д. М. Православ-

нова // *Журнал технической физики. – 2007. – Т. 77(2). – С. 17–21.*

19. Dikansky Yu. Effects of a superparamagnetic state of particles of a paraffin based magnetic colloid / Yu. Dikansky, A. Ispiryan, S. Kunikin, A. Radionov // *Solid State Phenomena. – 2015. – Vol. 233–234. – PP. 297–301.*

20. Пишеничников А. Ф. О силах, действующих на постоянный магнит, помещенный в прямоугольную полость с магнитной жидкостью / А. Ф. Пишеничников, Е. Н. Буркова // *Вычислительная механика сплошных сред. – 2014. – Т. 7. – № 1 – С. 5–14.*

21. Яновский А. А. Влияние магнитного поля на процессы парообразования в кипящей магнитной жидкости / А. А. Яновский, А. Я. Симоновский, В. Д. Холопов // *Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8 (2). – С. 332–337.*

22. Гришанина О. А. Закалочное охлаждение плоских стальных пластин в магнитной жидкости / О. А. Гришанина // *Упрочняющие технологии и покрытия. – 2009. – № 9 (57). – С. 12–20.*

23. Радионов А. В. Повышение техногенной безопасности эксплуатации оборудования с увеличенными радиальными зазорами [*Электронне видання*] / А. В. Радионов, С. А. Куникин, С. А. Полежаева // *Вісник НУК.*

24. Брук Э. Т. «Еж» в стакане / Э. Т. Брук, В. Е. Фертман. – Минск: Выш. школа, 1983. – 253 с. 25.

Коровин В. М. О неустойчивости плоской поверхности магнитной жидкости в цилиндрической полости при наличии вертикального магнитного поля / В. М. Коровин, А. А. Кубасов // *Журнал технической физики. – 1998. – Том 68. – № 1. – С. 23–30.*

26. Радионов А. В. Опыт эксплуатации магнитожидкостных герметизаторов на нефтеперерабатывающих заводах стран СНГ / А. В. Радионов // *Химическая техника. – 2015, № 10. – С. 11–17.*

27. Радионов А. В. Применение магнитожидкостных устройств в холодильной технике / А. В. Радионов // *Вестник Международной Академии Холода. – 1999. – № 4. – С. 45–49.*

28. Аббуд А. Ю. Испаряемость нефтяных масел и ее влияние на экологические аспекты их рационального использования: автореф. дисс. на соискание уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.17.07 «Химическая технология топлива» / А. Ю. Аббуд. – Москва, 1998. – 21 с.