

## Герметизаторы на основе магнитной наножидкости для валов химических реакторов

М.С. Сайкин, канд. техн. наук

Рассматриваются герметизаторы на основе магнитных наножидкостей, предназначенные для уплотнения вращающихся валов химических реакторов. На основании проведенных исследований даны рекомендации по магнитным наножидкостям и конструкционным материалам герметизаторов.

*Ключевые слова:* герметизатор, магнитная наножидкость, химический реактор.

## Nanomagnetic Liquids Sealers for Chemical Reactor Shafts

M.S. Saykin, Candidate of Engineering

Nanomagnetic liquids sealers are intended for compacting the rotate shafts of chemical reactors. On the basis of the experiment results recommendations concerning selection of nanomagnetic liquids and construction materials of sealers are given.

*Keywords:* sealers, nanomagnetic liquids, chemical reactor.

**Введение.** Для герметизации валов химических реакторов применяют торцевые уплотнения [1], которые работают с утечкой герметизируемой среды. Поэтому в цехах химических предприятий наблюдается высокая загазованность и превышение ПДК вредных веществ. Кроме того, попадание атмосферного воздуха в химический реактор может привести к браку продукции или взрыву.

Проблема создания абсолютно герметичных уплотнений является важной и актуальной, особенно для химических реакторов с рабочим объемом более 5 м<sup>3</sup> и диаметром валов более 80 мм.

В отличие от герметизаторов на основе магнитных наножидкостей (МНЖГ), предназначенных для герметизации вращающихся валов вакуумного оборудования, герметизаторы химических реакторов работают при биениях вала около 1 мм, воздействии агрессивных сред и повышенной температуре (120–200 °С).

В связи с этим в работе решались следующие проблемы: поиск методов компенсации биений вала и их экспериментальная проверка; повышение стойкости магнитной наножидкости (МНЖ) к воздействию агрессивных сред и повышенных температур; разработка способа защиты МНЖ от контакта с герметизируемой средой; анализ и выбор коррозионноустойчивых материалов для МНЖГ.

**Условия работы элементов конструкции МНЖГ.** Любое МНЖГ содержит следующие основные элементы: постоянный магнит, полюсные приставки и вал, которые образуют замкнутую магнитную цепь. Магнитный поток, проходящий через элементы магнитной цепи, удерживает магнитную наножидкость, заправленную в рабочий зазор герметизатора, образованный между вращающейся и неподвижной частями магнитопровода.

На элементы конструкции МНЖГ и МНЖ действует агрессивная среда реактора: минеральные кислоты, полярные и неполярные растворители. Интенсивность воздействия агрессивной среды определяется ее концентрацией и

температурой. Концентрация химических веществ может быть различной. Температура в химических реакторах большинства производств достигает 120–200 °С. Кроме этого, в реакторе может быть избыточное давление до 3 Ати или разрежение до 0,1 Ати.

**Выбор материала магнитов.** Критический перепад давлений МНЖГ пропорционален значению максимальной индукции в рабочем зазоре, которая, в свою очередь, зависит от величины остаточной индукции постоянного магнита. При повышении температуры происходит уменьшение последней, а следовательно, и критического перепада давлений. Поэтому для МНЖГ, предназначенных для герметизации валов химических реакторов, должны применяться магниты, изготовленные из «закритических» материалов с высокой температурной стабильностью: ферритобариевые магниты марок 15БА300, 16БА190, 22БА220, 25БА170 и др., самарий-кобальтовые магниты марок КС37, КС25 и магниты на основе сплава неодим-железо-бор марки Ч36Р [2, 3, 4]. Ферритобариевые магниты устойчиво работают до температуры 300 °С, самарий-кобальтовые – до 250 °С, а магниты на основе сплава неодим-железо-бор – до температуры 200–230 °С.

Оценки коррозионной стойкости магнитов не требуется, так как конструкция МНЖГ обеспечивает защиту магнитов от химического воздействия уплотняемой среды.

**Выбор материалов для магнитной системы и корпуса МНЖГ.** Большинство химических реакторов имеют верхний привод вала, поэтому полюсные приставки, вал, корпус МНЖГ будут взаимодействовать с парами агрессивной среды химического реактора. В состав МНЖГ также входят подшипники качения, которые не контактируют с агрессивной средой реактора.

Взаимодействие с парами агрессивной среды приводит к различным видам электрохимической коррозии конструктивных элементов уплотнения [5, 6]. Оценка коррозионной стойкости проводится по 10-балльной шкале. Причем наиболь-

шую стойкость проявляют металлы с оценкой «1». МНЖГ реакторов должны обладать высокой надежностью, поэтому для их изготовления необходимо применять именно эти металлы.

В качестве материала корпуса могут использоваться немагнитные стали таких марок, как X18H9T, X18H10T, 03X18H11, 08X18H12B, 10X14Г14Н4Т, 10X14АГ15, ХН55МБЮ, 07Х21Г7АН15 и др., а также алюминий и сплавы на его основе марок А-999, А-995, А-99, АМг3, АМг5, АМг6 и титан марок ВТ5-1, ВТ6С, ВТ14. Для прокладок и шайб можно применять фторопласты марок Ф-4, Ф-40, Ф-42 [7–8].

Для элементов магнитной цепи МНЖГ должны применяться стали, имеющие кроме коррозионной стойкости еще и величину индукции магнитного насыщения 1,6–1,8 Тл [9]. Это стали марок 08Х13, 12Х13, 15Х28, 20Х13, 30Х13, 40Х13.

Выбор того или иного материала следует производить в соответствии с его коррозионной стойкостью к уплотняемой среде. Так, к азотной и серной кислоте коррозионной стойкостью обладают стали следующих марок: 08Х13, 12Х13, 12Х17, 15Х28, 20Х13, 30Х13, 40Х13, Х18Н9Т, Х18Н10Т, 12Х18Н10Т. Эти стали устойчиво работают при температурах от 20 до 60 °С при невысоких и средних концентрациях для азотной кислоты (20–60 %) и высоких концентрациях (90–100 %) для серной кислоты. Кроме того, коррозионной стойкостью к этим кислотам обладают стали ХН55БЮ, ХН40МДТЮ, 06ХН28МДТ. К воздействию фосфорной кислоты устойчивы стали 08Х17Т, 15Х28 при ее различных концентрациях до температуры 60 °С, Х18Н9Т и Х18Н10Т – до температуры 100 °С, 12Х18Н10Т, 02Х18Н11, 10Х17Н13М3Т – при концентрации 40 и температуре до 100 °С. Стали Н70МФВ-ВИ, 08Х21Н6М2Т обладают коррозионной стойкостью до температуры 140 °С при различных концентрациях.

Кроме того, многие из вышеперечисленных сталей обладают коррозионной стойкостью к органическим кислотам. Например, к уксусной кислоте с концентрацией до 50 и при температуре до 50 °С устойчивы стали марок 08Х13, 12Х17, 08Х17Т. К любой концентрации уксусной кислоты устойчивы стали 15Х28, 15Х25Т, ХН50НБЮ до температуры 50 °С, а стали Х18Н9Т и Х18Н10Т – при концентрациях до 80 % и температуре до 100 °С.

Следует отметить, что коррозионная стойкость сталей обычно повышается с улучшением чистоты обработки поверхности.

Приведенные данные показывают, что каждая из сталей обладает коррозионной стойкостью лишь в определенном диапазоне концентраций и температур для различных сред. Поэтому для унификации МНЖГ по коррозионной стойкости к большому числу агрессивных сред необходимо введение защитных конструктивных элементов. Кроме того, большинство сталей обладают коррозионной стойкостью лишь до температуры 100 °С. Поэтому для обеспечения их работоспособности в течение длительного времени должна быть предусмотрена система охлаждения.

**Выбор магнитной наножидакости.** Обязательным требованием, предъявляемым к МНЖ при герметизации агрессивных сред, является отсутствие процессов ее смешения и химического взаимодействия с уплотняемой средой. Для выявления этих процессов и определения стойкости МНЖ к воздействию температур и агрессивных сред проводилось сравнение ее физических характеристик до и после термообработки и воздействия агрессивными средами.

В качестве физических характеристик использовались плотность, пластическая вязкость, намагниченность, кинетическая и агрегативная устойчивость.

Измерение плотности МНЖ проводилось в соответствии с ГОСТ 18995.1-73. Пластическая вязкость определялась на ротационном вискозиметре согласно ГОСТ 26581-85. Намагниченность определялась дифференциально-баллистическим методом. Кинетическая и агрегативная устойчивость МНЖ определялась в неоднородном магнитном поле в соответствии с методиками ТУ.

Проведены термоиспытания МНЖ Ф1-20 и С1-20В [10] в статике и в динамике при температуре 150 °С. Для термоиспытаний в статике использовался сушильный шкаф, в котором температура поддерживалась с помощью электроконтактного термометра. Термоиспытания в динамике проводились в однозубцовом макете МНЖГ. Контроль температуры осуществлялся с помощью термопары, установленной на полюсе герметизатора.

Термоиспытания в статике показали, что намагниченность МНЖ Ф1-20 с течением времени при повышении температуры падает. Это можно объяснить химическим взаимодействием адсорбированного стабилизатора с поверхностным слоем частиц магнитной фазы и уменьшением магнитного момента частиц магнетита. Этот процесс может привести к разгерметизации МНЖГ. Намагниченность МНЖ С1-20В, наоборот, в ходе термоиспытаний возрастает. Это связано с увеличением концентрации магнитной фазы вследствие оттока носителя.

Результаты термоиспытаний в динамике свидетельствуют о том, что ресурс работы МНЖ Ф1-20 при температуре 150 °С недостаточен. За 200 ч работы критический перепад давлений уменьшился до 0. За 180 ч работы МНЖ С1-20В в макете ее критический перепад давлений не изменился.

Для увеличения ресурса работы МНЖ при высоких температурах синтезирована МНЖ на более термостойких фторированных носителях и стабилизаторе.

Испытания взаимодействия МНЖ Ф1-20 с концентрированными неорганическими кислотами показали, что она выдерживает непосредственный контакт с соляной и азотной кислотами в течение двух суток, а с серной кислотой – 2 ч. В среде хлора МНЖ сохраняет свои свойства в течение 65 ч.

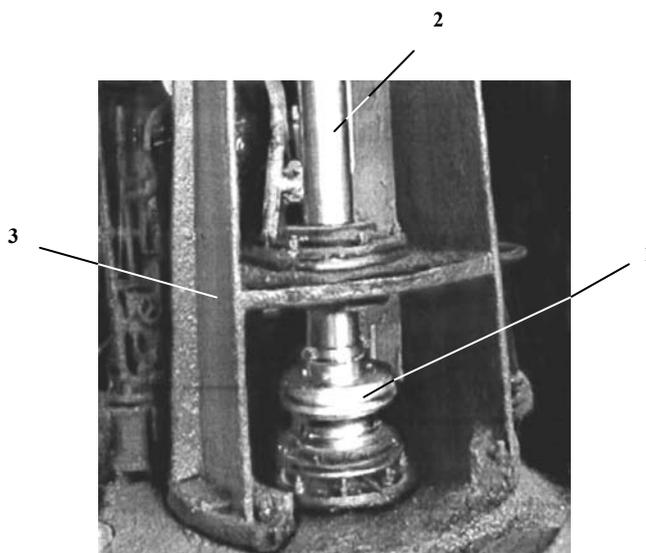
Проведены испытания влияния органических растворителей различной химической природы на физические свойства МНЖ Ф1-20 и С1-20В при времени контакта 1 ч и комнатной температуре. Данные испытания показали, что МНЖ С1-20В в процессе контакта с органическими растворителями выдерживает действие лишь ацетона. Во всех остальных растворителях имеет место коагуляция, на что указывают изменения во всех измеренных физико-химических характеристиках (плотность, пластическая вязкость, намагниченность, агрегативная и кинетическая устойчивость).

МНЖ типа Ф1-20 устойчива к воздействию не только гексана, хлороформа, толуола, ацетона, этилацетата, но и таких высокоактивных растворителей, как N,N-диметилформамид и тетрагидрофуран. На следующем этапе работы изучалось влияние этих сред на стойкость МНЖ в течение 100–300 ч при температуре 150 °С. В ходе изучения стойкости МНЖ к воздействию высоких температур и агрессивных сред для работы в составе МНЖГ химических реакторов была выбрана МНЖ на фторированной основе. Проведена работа по замене компонентов данной МНЖ на более термостойкие. Однако не удалось получить МНЖ, которая является работоспособной при температурах 150–200 °С во всех агрессивных средах. Поэтому необходима защита МНЖ от действия высоких температуры и агрессивных сред.

**Разработка конструкции МНЖГ.** При эксплуатации на химическом оборудовании отрицательное воздействие на работоспособность МНЖГ оказывают следующие факторы: повышенная температура, агрессивность среды и биеение вала.

В целях ограничения воздействия этих факторов в конструкцию МНЖГ введены защитные элементы. Защитный элемент выполнен в виде гидравлического затвора и установлен перед МНЖГ. Это позволяет исключить воздействия агрессивной среды и тепловых потоков реактора непосредственно на детали и МНЖ. Кроме того, МНЖГ содержит устройство, которое находится между валом и вращающимся элементом и компенсирует угловые и осевые колебания вала. В МНЖГ предусмотрена система водяного охлаждения.

На рисунке представлен МНЖГ Ярославского ОАО «Лакокраска», установленный на химический реактор. Он предназначен для герметизации паров толуола при температуре до 150 °С. В цехе №7 установлено четыре МНЖГ, два из которых – на диаметр уплотняемого вала 95 мм и два – на диаметр 110 мм. Объемы реакторов составляют 6 и 10 м<sup>3</sup>.



Общий вид герметизатора химического реактора на основе магнитной наножидкости (МНЖГ): 1 – герметизатор; 2 – вал мешалки реактора; 3 – станина привода

Для защиты МНЖ от контакта с агрессивной средой использован гидрозатвор обратного типа. Все элементы гидрозатвора, контактирующие с агрессивной средой, выполнены из фторопласта. В качестве запорной жидкости используются малоиспаряемые химически стойкие жидкости.

Непременным условием для надежной работы гидрозатвора является абсолютная герметичность динамического уплотнения, что и может быть достигнуто только применением МНЖ.

Валы реакторов, как правило, имеют биеения, многократно превышающие допустимые для МНЖГ. Поэтому прямая герметизация вала реактора невозможна и необходимо устройство, компенсирующее эти биеения. Обычно оно выполняется на основе упругих элементов – сильфонов или резины. Для решения данной задачи сильфоны не подходят, так как не обеспечивают требуемый ресурс из-за ограниченного допустимого числа боковых деформаций (обычно около 1000000), после которых происходит механическое разрушение сильфона.

Разработаны устройства развязки от биеений вала на основе резины. Конструкция одного из них крепится к валу и герметизируется фторопластовым уплотнителем. Для уменьшения воздействия тепла, поступающего от вала, установлено тепловое сопротивление лабиринтного типа. Оно снижает температуру от 200 °С на поверхности вала и до 100 °С в месте установки резины. Таким образом, исключается перегрев резиновых колец, воспринимающих и компенсирующих биеение вала. Одно из них воспринимает аксиальную, а другое радиальную составляющую биеений.

**Проектный и поверочный расчет магнитной цепи МНЖГ.** Одним из основных этапов проектирования МНЖГ является расчет магнитной цепи [11, 12]. Исходными данными при проектировании уплотнения являются: диаметр вала, скорость его вращения, рабочий перепад давлений. Агрессивность среды, высокая температура и требуемый ресурс работы не менее 1 года учитываются выбором повышенного коэффициента запаса по давлению (равного 2). При рабочем перепаде давлений 1 Ати критический перепад давлений МНЖГ должен быть равен 2 Ати. В процессе расчета определяются геометрические размеры системы, выбираются марка и размеры магнита.

Проведены расчеты МНЖГ на диаметры уплотняемых валов 95 и 110 мм для «закритических» магнитов различных марок. В результате расчетов определены размеры постоянных магнитов и основные геометрические размеры зубцовой зоны. Шаг зуба составляет 3 мм, а величина площадки при его основании – 0,2–0,3 мм.

### Заключение

Анализ полученных результатов показывает, что и металлы, и магнитная наножидкость не могут длительное время работать в прямом контакте с агрессивными средами при воздействии температур 150–200 °С. Поэтому при разработке МНЖГ в его конструкцию введены элементы защиты и система охлаждения.

Разработанное МНЖГ представляет собой отдельный модуль, обеспечивающий герметизацию валов реакторов диаметром от 40 до 150 мм и с биениями до 1 мм.

Применение МНЖГ в химических реакторах позволит снизить брак продукции, улучшить экологическую обстановку в цехах химических предприятий, исключить утечки ядови-

тых веществ, уменьшить загрязнение окружающей среды, а также повысить взрыво- и пожаробезопасность оборудования.

### Список литературы

1. **Мельник В.А.** Торцовые уплотнения валов: Справочник. – М.: Машиностроение, 2008.
2. **Пятин Ю.М.** Постоянные магниты: Справочник. – М.: Энергия, 1980.
3. **Сидоров Е.В.** Отливки магнитов с монокристаллической и столбчатой структурами. Теория и практика изготовления. – Владимир: изд-во «Транзит», 2007.
4. **Сайкин М.С.** Особенности выбора постоянных магнитов для магнитоожидкостных герметизаторов технологического оборудования // Вестник научно-промышленного общества. – 2004. – Вып. 7. – С. 15–19.
5. **Томашов Н.Д., Чернова Г.П.,** Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы. – Л.: Химия, 1988.
6. **Сайкин М.С., Бобко Л.А.** Особенности выбора конструкционных материалов и магнитных жидкостей для МЖУ химических аппаратов: Тез. докл. Междунар. науч.-техн. конф. «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (VI Бенардосовские чтения). – Иваново, 1992. – С. 132.
7. **Келоглу Ю.П.** Металлы и сплавы: Справочник. – Кишинёв: Картя Молдовеняскэ, 1977.
8. **Журавлёв В.Н., Николаева О.И.** Машиностроительные стали: Справочник. – М.: Машиностроение, 1992.
9. **Константинов В.В.** Магнитная технологическая оснастка. – М.: Энергия, 1974.
10. **Курченков А.Г.** Магнитные жидкости – новый эффективный материал // Механизация и автоматизация. – 1990. – № 4. – С. 34–35.
11. **Сайкин М.С.** Особенности конечно-элементного моделирования электромеханических магнитоожидкостных герметизаторов: Сб. докл. науч. семинара, посвященного 200-летию открытия электрической дуги В.В. Петровым и 160-летию со дня рождения Н.Н. Бенардоса «Электротехника и прикладная математика». – Иваново, 2003. – С. 42–44.
12. **Лебедев В.Д., Сайкин М.С.** Моделирование магнитного поля магнитоожидкостных герметизаторов в интегрированной среде FEMLAB: Сб. науч. тр. XII Междунар. Плесской конф. по магнитным жидкостям (август – сентябрь 2006 г.). – Плес, 2006. – С. 383–387.

*Сайкин Михаил Сергеевич,*

ГОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,  
кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ электротехники и электротехнологий,  
телефон (4932) 41-60-10,  
e-mail: saikin@ispu.eef.ru