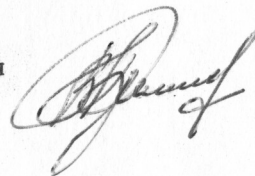


второе  
Р15

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ХОЛОДИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На правах рукописи

РАДИОНОВ Владимир Александрович



ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ВАЛОВ  
ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК С МАГНИТОЖИДКОСТНЫМИ  
УПЛОТНЯЮЩИМИ УСТРОЙСТВАМИ

Специальность 05.04.03 – Гидравлические машины, ма-  
шины и аппараты холодильной и криогенной техники

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

XV 983

Институт холода  
ОНАХТ  
бібліотека

Одесса, 1980 г.

Работа выполнена в Одесском технологическом институте  
холодильной промышленности.

Научный руководитель: заслуженный деятель науки УССР,  
доктор технических наук,  
профессор ЧУМАК И.Г.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор ЗАВИША В.В.,  
лауреат Государственной премии,  
кандидат технических наук,  
доцент ГРИГОРЕНКО В.Я.

Ведущее предприятие - ВНИИхолодмаш.

Защита диссертации состоится "03" июня 1980г.  
в "11" часов на заседании специального Совета КОБВ.27.01  
при Одесском технологическом институте холодильной промышлен-  
ности: 270000, Одесса, ГСП, ул. Петра Великого, 1/3, ОТИХП.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "03" июня 1980г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА  
ДОЦЕНТ

Р.К. НИКУЛЬШИН

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Директивы XXV съезда КПСС отводят научно-техническому прогрессу центральное место в решении главной задачи десятой пятилетки о дальнейшем обеспечении значительного подъема материального и культурного уровня советского народа.

Немалая роль в решении этой задачи отводится совершенствованию и созданию новых видов холодильной техники повышенной надежности и экономичности. Эти качества в значительной мере определяются уплотнениями вращающихся валов холодильных установок. Статистика показывает, что более половины отказов происходит из-за их неисправностей. На протечки через уплотнения затрачивается значительная часть суммарных потерь энергии. Нарушение герметичности уплотнений приводит к снижению холодопроизводительности, отклонению параметров цикла от расчетных, при отсутствии паров хладагента в помещении холодильной установки, проникновению в систему хладагента влаги и воздуха.

В настоящее время достигнуты значительные успехи в совершенствовании традиционных конструкций уплотняющих устройств вращающихся валов холодильных установок. Несмотря на это задача в целом далека еще от своего полного разрешения. Наряду с разработкой традиционных конструкций уплотнений ведутся поиски новых технических решений с целью увеличения долговечности и герметичности, уменьшения износа и габаритов, совершенствования технологии изготовления и монтажа. Анализ отечественных и зарубежных литературных источников показывает, что для решения данной проблемы весьма перспективными могут оказаться магнитокистостные уплотняющие устройства (МКУУ). Одной из основных причин, препятствующих практической реализации МКУУ в различных установ-

ках (в том числе холодильных), является недостаточность сведений о влиянии конструктивного оформления МЖУ, параметров магнитной системы, свойств магнитной жидкости (МЖ), внешних воздействий на удерживающую способность уплотнения. Магнитная жидкость представляет собой коллоидный раствор твердых магнитных частиц (например, частиц магнетита) размером от 30 до 100 Å в жидкости-носителе (керосин, масло, глицерин, вода и т.д.). Для предотвращения коагуляции и агломерации частиц под действием магнитного поля они покрываются поверхностно-активными веществами (ПАВ), например олеиновой кислотой. Сочетание отталкивающих свойств на близком расстоянии (благодаря ПАВ) и теплового движения позволяет получить МЖ, проявляющую свойства непрерывной среды, в которой действуют силы, обусловленные магнитной поляризацией. Магнитная жидкость является хорошим изолятором, не имеет гистерезиса, обладает разнообразными магнитными, электрическими и теплофизическими свойствами, что позволяет применять её для решения различных научно-технических задач.

Цель работы - изучить статические и динамические режимы работы МЖУ вращающихся валов холодильных установок при изменяющихся влияниях различных факторов (параметров магнитного поля, конструктивного исполнения отдельных элементов уплотнения, свойств МЖ, параметров внешней среды) и разработать на базе этих исследований практические рекомендации для проектирования МЖУ, обеспечивающих полную герметизацию и надежность работы холодильных установок.

#### Задачи исследования:

1. Провести теоретические исследования по МЖУ и изучить опыт их использования для систематизации накопленных знаний и разработки классификации МЖУ, а также диаграммы зависимости

долговечности МЖУ от их основных параметров.

2. Получить расчетную зависимость для определения максимального удерживаемого перепада давления.

3. Изучить в комплексе влияние конструктивных параметров магнитной системы МЖУ на максимальный удерживаемый перепад давления при контакте с различными уплотняемыми средами (хладон R-12, хладон R-22, масло, вода, аргон, воздух) и внешних воздействий (вибрация, удар, температура в диапазоне от 223 до 343 К, качка) на удерживающую способность МЖУ.

4. Определить потери мощности при работе МЖУ, изучить влияния величины магнитной индукции в зазоре, свойств жидкой основы МЖ, скорости вращения вала на удерживающую способность МЖУ при применении МЖ с различными жидкими основами и намагниченностью.

#### Научная новизна.

Впервые теоретически и экспериментально исследованы МЖУ вращающихся валов холодильных установок при скоростях вращения вала от 0 до 1000 рад/с и диаметрах вращающегося вала от 20 до 120 мм в зависимости от параметров магнитной системы, свойств МЖ, величины радиального зазора (от 0,1 до  $1,6 \cdot 10^{-3}$  м), внешних условий: климатических (при температуре окружающей среды от 223 до 343 К), вибрации (амплитудах от 0,22 до 5 мм и соответствующих частотах от 3,5 до 36 Гц), ударе (ускорением до 15g), качке от 0 до 45°.

Впервые разработаны и исследованы МЖУ вращающихся валов холодильных установок с наборными магнитными системами, обеспечивающими радиальную намагниченность.

Впервые экспериментально проведены замеры магнитной индукции в зазорах от 0,1 · 10<sup>-3</sup> м и выше МЖУ холодильных установок.

#### В работе защищаются следующие научные положения:

1. Взаимосвязь конструктивных параметров, пондеромоторных и

гидромеханических сил МЖУ обеспечивает практически полную герметизацию вращающихся валов холодильных установок, повышает их надежность и ресурс, снижает массо-габаритные показатели.

2. Использование созданного зонда с чувствительным элементом - миниатюрным датчиком Холла из нитевидных кристаллов антимоида индия позволяет выполнять замеры магнитной индукции в зазорах от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м с точностью до 0,05 Т, низким температурным коэффициентом выходного сигнала и повышенной помехоустойчивостью.

Новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения: № 550499; 616188; 634030; 638809; 653469; 675238; 635283; 700678; 723281 и положительными решениями по заявкам на авторские свидетельства СССР № 2495196/25 от 4.04.77 г.; 2661846/25-08 от 11.09.78 г.; 2697627/28-08 от 30.03.79 г.; 2697735/25-08 от 11.04.79 г.; 2729341/25-08 от 6.04.79 г.; 2747837/25-08 от 09.04.79 г.; 2822060/21 от 27.09.79 г.

#### Наиболее существенные научные результаты

1. Получены расчетные зависимости для определения максимального перепада давления, а также магнитной индукции в зазоре МЖУ вращающихся валов холодильных установок, которые рекомендованы для их расчетов с достаточной для инженерной практики точностью.

2. Экспериментально доказана адекватность расчетной зависимости.

3. Экспериментально доказана стабильность работы МЖУ вращающихся валов холодильных установок при температуре окружающей среды от 223 до 343 К, внешних вибрационных воздействиях при амплитудах от 0,22 до 5 мм и частотах от 3,5 до 35 Гц, ударных нагрузках с ускорением до 15 g, кренах и дифферентах от 0 до 45°, скоростях вращения до 1000 рад/с, диаметрах валов до 120 мм, кон-

такте с уплотняемыми средами (А-12 и А-22, масло, вода, аргон, воздух); при этом обеспечивается практически полная герметизация.

4. Установлено, что для МЖУ вращающихся валов холодильных установок целесообразно применять МЖ с жидкой основой - смазочное масло при контакте с А-12 и А-22, водой и аргоном, намагниченностью МЖ 50-80 кА/м.

5. Экспериментально подтверждена работа МЖУ вращающихся валов холодильных установок с зазорами от 0,1 до 1,6 мм при обеспечении магнитной индукции в зазоре от 1,5 до 1,8 Т.

6. Экспериментально доказано, что разработанная наборная магнитная система с радиальным намагничиванием обеспечивает надежную работу МЖУ вращающихся валов холодильных установок, уменьшает их массо-габаритные характеристики и повышает экономические показатели.

7. Разработана классификация МЖУ холодильных установок.

Практическая ценность. Полученная в работе расчетная зависимость, определяющая максимальный перепад давлений, использована в расчетах МЖУ холодильных компрессоров и насосов.

На основании результатов работы разработаны рекомендации по дальнейшему совершенствованию проектирования МЖУ холодильных установок.

Выявлена целесообразность применения МЖУ в стационарных и транспортных холодильных установках.

Результаты работы могут быть использованы в различных отраслях промышленности при создании механизмов с МЖУ (например: турбины, насосы, компрессоры, лебедки).

#### Реализация в промышленности:

1. Основные результаты, полученные в настоящей работе, ис -

пользуются ведущими предприятиями при проектировании и разра - ботке МЖУ холодильных установок.

2. С помощью предложенной расчетной зависимости и рекоменда - ций по проектированию разработаны механизмы холодильных уста - новок (компрессоры, насосы) с МЖУ. Реальный суммарный годовой экономический эффект по данным ряда предприятий от внедрения МЖУ составляет 65-70 тыс.руб. (акты внедрения указаны в реше - нии Совета института).

3. Решением КНГ Совета Министров СССР № 12-13/339 от 24.10.77 г. организована специальная конструкторско-эксперимен - тальная группа по внедрению результатов работы в промышленность, в том числе и для холодильных установок.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов и приложения. Работа содержит 148 страниц машинописного текста, 62 рисунка, 10 таблиц и приложения. Библиография включает 133 наименования, из которых 34 иностранных.

#### Элементы расчета МЖУ

В основу МЖУ положена идея удержания МЖ в зазоре между вращающимся валом и полюсными наконечниками с помощью магнитно - го поля. Геометрия зазора должна обеспечить области с сильной неоднородностью магнитного поля, под действием которого МЖ со - бирается в минимальном зазоре, образуя герметичный барьер, пре - пятствующий утечкам уплотняемой среды.

Основным показателем работоспособности МЖУ является вели - чина перепада давления между герметизируемой полостью и окружаю - щей средой. Проведенный анализ расчетных зависимостей, определяю - щих перепад давления удерживаемого МЖУ (Р.Е. Розенфрейг, В.А. Бейли, В.Д. Орлов, Е.Е. Бибик), показал, что в них учтено в ос - новном действие пондеромоторных сил конструктивных параметров, а

так как МЖ представляет собой коллоидный раствор, то считаем необходимым учитывать и действие гидромеханических сил (сил поверхностного натяжения). Известно, что силы поверхностного натяжения создают определенную удерживающую способность в зазо - ре и в случае узкой кольцевой щели устанавливается некоторый перепад давления

$$\Delta P = \sigma \lim_{R_2 \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{2\sigma}{\delta}, \quad (I)$$

где  $R_1 = \frac{\delta}{2}$  и  $R_2 = \infty$  - радиусы кривизны;  $\delta$  - зазор;  $\sigma$  - поверхностное натяжение.

Однако это явление не представляется возможным использовать в традиционных уплотняющих устройствах из-за технологических трудностей, связанных с получением малых зазоров, особенно в под - вижных узлах.

Применение МЖ расширяет технологический диапазон, дающий возможность использования действия сил поверхностного натяжения для обеспечения необходимого перепада давления.

В состоянии насыщения МЖ только 60 % частиц магнитного на - полнителя обладают магнитным моментом, выстраиваются вдоль си - ловых линий поля, образуя как бы жесткую арматуру (параллельные решетки), в ячейках которых удерживается жидкая основа МЖ за счет сил поверхностного натяжения. Действие сил поверхностного натяжения зависит от расстояния между частицами, свойств жидкой основы МЖ, прочности арматуры, которая, в свою очередь, зависит от взаимодействия частиц с внешним магнитным полем. Увеличение внешнего магнитного поля способствует увеличению прочности "ре - шеток" только до определенного предела - достижения магнитного насыщения; дальнейшее увеличение поля не приводит к увеличению их прочности и, следовательно, удерживающей способности МЖ.

Для практических расчетов рекомендуется вычислять капиллярную постоянную  $a$  взамен  $b$  по формуле

$$a = \sqrt{\frac{2b}{\rho \cdot g}}, \quad (2)$$

где  $\rho$  - плотность жидкой основы МЖ;

$g$  - ускорение силы тяжести.

В формуле (1)  $b$  заменяем на  $a$  и вводим произведение  $BM$ , т.е. пондеромоторную силу, и коэффициент  $K$ , учитывающий рассеивание магнитного потока, который определяется экспериментально. Выполнив указанные преобразования, получаем зависимость для вычисления максимального удерживаемого перепада давления в МЖУ

$$\Delta p = K \frac{a}{\delta} \cdot BM, \quad (3)$$

где  $M$  - напряженность насыщения МЖ;

$\delta$  - рабочий зазор МЖУ;

$B$  - магнитная индукция в зазоре.

Анализ литературных источников показал, что измерение  $B$  в малых зазорах (от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м) вызывает значительные трудности, связанные с размещением датчиков в зазоре. Известные расчетные зависимости по определению  $B$  дают весьма приближенные результаты, расхождение до 70 %.

В связи с изложенным, нами была разработана уточненная расчетная зависимость по определению  $B$  с использованием методики вторичных источников, которая приводит к системе интегральных уравнений, реализуемых с помощью ЭВМ.

Найденная в результате решения уравнений плотность источников поля используется для расчета поля в зазоре МЖУ путем численного интегрирования по этим источникам:

$$H_s(P) = -\frac{1}{2\pi} \int_{(S_m)} G_n S(P, M) dS - \frac{1}{2\pi} \int_{(S_n)} G_n S(P, M) dS, \quad (4)$$

где  $H_s(P)$  - напряженность магнитного поля в зазоре;

$S$  - ядро интегрального оператора;

$A$  - квадратурные коэффициенты;

$b_m$  - плотность магнитных зазоров на поверхности магнита и полусного наконечника.

Значение  $B$  определяем по известной зависимости

$$B = \mu H_s(P), \quad (5)$$

где  $\mu$  - магнитная проницаемость МЖ.

Значение  $B$ , вычисленное по формуле (5), вводится в уравнение (3). На основе представленной математической модели был разработан алгоритм расчета поля МЖУ, реализованный в виде программы на алгоритмическом языке ФОРТРАН. Она позволяет рассчитывать напряженность магнитного поля в зазоре МЖУ различных конфигураций и геометрических размеров.

Методика исследования и экспериментальная установка

Из анализа литературных источников выявлено, что в настоящее время нет единой теории, объясняющей все явления и учитывающей основные характеристики и конструктивные параметры МЖУ.

Поэтому важное значение приобретают экспериментальные исследования. Однако этим исследованиям посвящено незначительное количество работ. Их результаты охватывают лишь узкую область применения МЖУ.

В соответствии с задачами исследования была разработана классификация МЖУ, диаграмма зависимости долговечности этих устройств от основных параметров МЖУ в их взаимосвязи, спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, состоящая из нескольких стендов-макетов, позволяющих исследовать различные конструкции элементов МЖУ для диаметров валов от 20 до  $120 \cdot 10^{-3}$  м со скоростями вращения от 0 до 1000 рад/с и определять

максимальное удерживаемое давление. Нагрузка на МЖУ создавалась газом (аргон, хладон А-12 и А-22), водой, маслом. Все испытательные стенды-макеты имитировали в натуральную величину соответствующие узлы МЖУ для холодильных установок и удовлетворяли требованиям, составленным на основании анализа литературных данных, изложенных в главе I, теоретических предпосылок (глава 2) и накопленного опыта экспериментирования в области МЖУ. Принципиальная схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

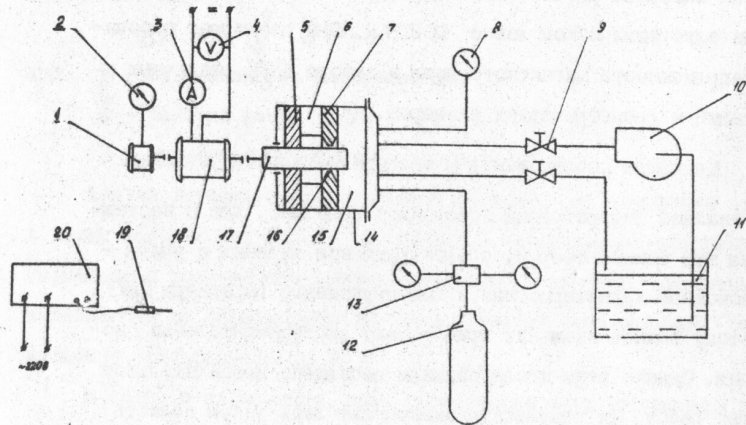


Рис. 1

1- датчик тахометра; 2- измеритель тахометра; 3- омметр; 4- вольтметр; 5- поласный накопитель; 6- поласный накопитель; 7- поласный накопитель; 8- манометр; 9- клапан; 10- насос; 11- бак; 12- баллон; 13- регулятор; 14- локет МЖУ; 15- рабочая камера; 16- рабочий зазор; 17- бак; 18- привод; 19- шуп с датчиком тока; 20- измеритель илбуции.

Методикой предусматривались проверка адекватности теоретической модели, статические и динамические испытания МЖУ.

Выбор количественных значений изучаемых параметров и их сочетания определялись с помощью методики планирования многофакторного эксперимента.

## Экспериментальные исследования

Для проверки адекватности теоретической модели было выполнено две серии опытов. В одной - зазор заполнялся МЖ типа МК-75, а в другой - типа МК-51. Давление создавалось хладоном А-12 и А-22. Контактующие среды, т.е. жидкая основа МЖ и уплотняемая среда, выбирались из условия их несмешивания. Результаты измерений и вычислений по формуле (3) представлены на рис. 2. При ма-

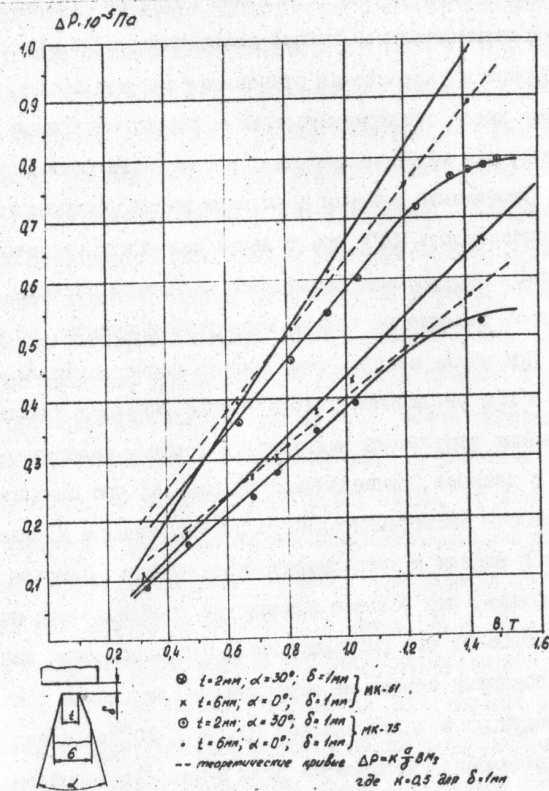


Рис. 2

лых значениях магнитной индукции ( $B = 0,4-0,6$  Т) измеренный удерживаемый перепад давления практически не зависит от формы магнитопровода и несколько ниже ( $\approx 10\%$ ) расчетного значения. С ростом индукции наблюдается расхождение экспериментальных и расчетных кривых. Кривая, соответствующая измерениям перепада давления с большей намагниченностью насыщения МЖ, идет более круто по сравнению с расчетной кривой, однако отклонения не превышают 5-7%. Более сложный характер у кривой при меньшей намагниченности насыщения МЖ. В этом случае отклонение также не превышает 5-7%. Затем у экспериментальной кривой резко уменьшается угол наклона к оси абсцисс и расхождения становятся значительными. Указанный характер имеют экспериментальные и расчетные кривые для обеих МЖ. Различия, как видно из рисунка, носят чисто количественный характер. Отмеченное влияние намагниченности насыщения МЖ на удерживающую способность МЖУ при больших значениях магнитной индукции объясняется наступающим насыщением магнитной системы. В дальнейшем изучалось влияние не только магнитной индукции, но и величины зазора. При малых зазорах зависимость носит почти линейный характер, а при увеличении зазора просматриваются участки насыщения. Полученные результаты находятся в хорошем качественном соответствии с данными, приведенными на рис. 2, что свидетельствует о достоверности экспериментального исследования и адекватности теоретической модели и экспериментальных данных. Одновременно следует отметить, что большое влияние на распределение индукции в зазоре оказывает его равномерность. При выполнении данных исследований возникли серьезные затруднения, связанные с замером магнитной индукции в малых зазорах ( $0,1-0,5 \cdot 10^{-3}$  м) и экспериментальным определением топографии поля в них. Эта проблема решена путем разработки и изготовления специального зонда для из-

мерения магнитной индукции в зазоре. Такие измерения проводились впервые в мировой практике исследования МЖУ холодильных установок.

Дальнейшие исследования были направлены на изучение влияния конструктивного исполнения магнитопроводов. Измерения выполнялись при постоянной магнитной индукции в зазоре. Выявлено, что наиболее рациональная величина ширины полки имеет значения  $t = 0,2-0,4 \cdot 10^{-3}$  м. Такая величина обеспечивает максимальный градиент магнитного поля в зазоре. Монотонное снижение значения удерживаемого перепада давления объясняется уменьшением градиента магнитного поля с увеличением  $t$ . Отмечается линейное снижение удерживаемого перепада давлений с ростом величины зазора, что характерно для всех исследованных конструкций магнитопроводов независимо от их расположения на валу или в корпусе. Обнаруженная закономерность объясняется ослаблением магнитного поля в зазоре при его увеличении. Характер кривых указывает на хорошее соответствие приведенных экспериментальных данных теоретической формуле (3), в которой величина удерживаемого перепада связана с зазором обратной пропорциональностью. Линейность рассматриваемых графиков указывает на постоянство отношения  $K/\delta$  в условиях опыта. Конечно, этот вывод не является достаточно общим, но для определенного класса задач его рационально использовать. Для зазоров, которые применяются в МЖУ вращающихся валов холодильных установок, может быть рекомендована зависимость между  $K$  и  $\delta$ . Данная зависимость имеет явно выраженный линейный характер при зазорах до  $0,9 \cdot 10^{-3}$  м, затем её наклон изменяется. Это говорит о том, что увеличение зазора приводит к росту полей рассеивания, т.е. к потерям напряженности магнитного поля, уменьшению его градиента. Найденное выражение  $K = f(\delta)$  придает теоретически полученной

зависимости (3) однозначность и позволяет использовать её в практических расчётах МЖУ вращающихся валов холодильных установок при оптимальной геометрии зуба.

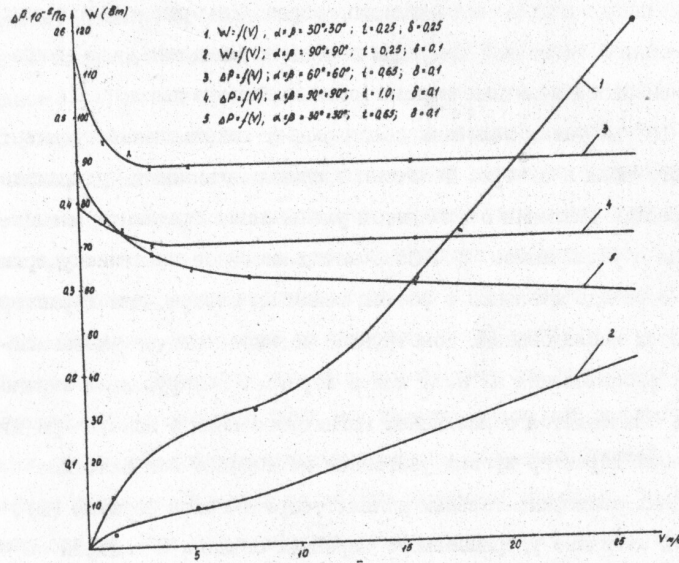


Рис. 3

На рис. 3 показано изменение удерживаемого перепада давления с ростом скорости вращения при различных конструктивных параметрах. Обращает на себя внимание подобие в характере кривых всех исследуемых форм. Основной особенностью рассмотренных зависимостей является заметное снижение удерживаемого перепада давлений в диапазоне значений угловых скоростей от 0 до 100 рад/с, а затем практическая стабилизация удерживаемого перепада давлений, т.е. имеет место "лавинное" влияние шероховатости поверхности.

В процессе исследований установлено, что величина падения перепада давления в указанном диапазоне скоростей находится в пределах 25-30%. Как видно из рис. 3, минимальные потери мощности получены при  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ;  $t = 0,25$  мм и  $\delta = 0,1$  мм и составляют  $\approx 40$  Вт при скорости скольжения 26 м/с. Уменьшение углов  $\alpha$  и  $\beta$  ведет к увеличению потерь и при  $\alpha = \beta = 30^\circ$  и

Зависимость утечки  
от удерживаемого давления

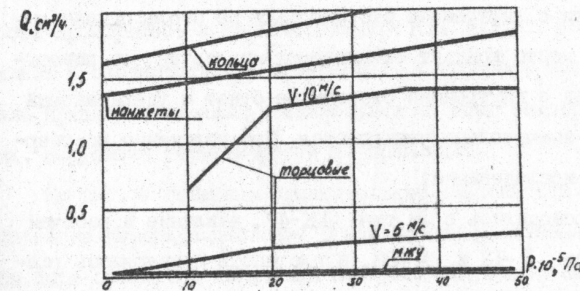


Рис. 4

тех же условиях они достигают 120 Вт. Таким образом, для обеспечения максимально удерживаемого перепада давлений и минимальных потерь мощности рекомендуются следующие конструктивные значения:  $\alpha = \beta = 90^\circ$ ;  $t = 0,3-0,4$  мм;  $\delta = 0,1-0,25$  мм. Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований, не удалось с достаточной степенью точности установить качественную зависимость, описывающую снижение удерживаемого перепада давлений. Однако установлено, что уменьшение удерживаемого перепада, вследствие вращения вала, не превышает 30%. Таким образом, при проектировании МЖУ холодильных установок расчетный перепад давления, полученный по формуле (3), следует увеличивать на 50-60%. Правильность такого вывода подтверждена экспериментальными и эксплуатационными данными и на данной стадии развития МЖУ представля-

ется приемлемой для практических нужд. В соответствии с теоретической моделью МЖУУ величина удерживаемого перепада давления определяется способностью магнитного поля удерживать частицы металла вдоль силовых линий и частицы жидкости между ними силами поверхностного натяжения. Однако эти силы будут существовать только при наличии поверхности раздела контактирующих сред. С одной стороны у МЖУУ холодильных установок такая поверхность всегда будет, так как жидкости, применяемые для изготовления МЖ, практически не смешиваются с воздухом. Однако существование подобной поверхности с внутренней стороны МЖУУ не столь однозначно. Если будет иметь место контакт смешиваемых жидкостей, то поверхности раздела сред с внутренней стороны не будет и удерживаемый перепад давления значительно уменьшается. Это положение подтверждают результаты исследований.

Испытания проводились с МЖ типа МЖК-47, давление в рабочей камере создавалось А-12 и А-22, а плотность проверялась галлоидным течискателем ГТИ-6. В этих условиях МЖУУ проработали по 1500 часов, из них с вращающимся приводом по 450 часов. За этот период утечек рабочей среды обнаружено не было. Аналогичные испытания были проведены с аргоном и водой, результаты те же. При идентичных условиях на МЖ с жидкой основой керосин МЖУУ проработали по 30 часов, после чего произошла полная потеря герметичности. За этот период времени жидкая основа МЖ - керосин испарился. При создании давления трансмиссионным маслом (ТС-14) нарушение плотности происходило через 3-5 часов, вследствие вымывания МЖ (на масляной основе), поэтому можно сделать вывод, что при применении МЖУУ свойства жидкой основы должны отличаться от свойств уплотняемой среды и она должна быть трудноиспаряемая. На следующем этапе исследовались многоступенчатые МЖУУ. Исследо-

вания показали, что последовательное подключение в работу каждой ступени пропорционально увеличивает удерживаемый перепад давлений. Кроме того, была подтверждена способность МЖУУ к самовосстановлению. Количество циклов самовосстановления, наблюдаемое нами, составляет 20-30. При испытаниях на вибрацию, удар, крен-дифферент в камере поддерживалось давление 0,1 МПа, периодически включался и выключался двигатель привода. Нарушение герметичности не произошло.

Влияние климатических факторов на герметизирующую способность проверялось в термобарокамере КТВ 3000/2. Испытания проводились в соответствии с программой. В процессе испытаний двигатель привода включался и выключался на всех температурных уровнях. Нарушение герметичности не произошло.

На рис. 4 показаны сравнительные зависимости утечки от удерживаемого перепада давлений традиционных уплотнений и МЖУУ. Затем были проведены испытания сборной магнитной системы (из магнитных плиток), обеспечивающей радиальное намагничивание. Исследования показали, что такая система способна расширить применение МЖУУ по диаметрам уплотняемых валов, существенно (в 2-3 раза) снизить массо-габаритные характеристики МЖУУ, обеспечивая требуемый перепад давлений, сократить использование материалов (например, кольцевых магнитов больших диаметров).

Рекомендации по проектированию МЖУУ холодильных установок

Выполненные в диссертационной работе теоретические разработки и экспериментальные исследования позволили сформулировать ряд практических указаний по проектированию МЖУУ для холодильных установок. В частности, даются рекомендации относительно рациональных форм, размеров и компоновки отдельных принципиально важных элементов МЖУУ в зависимости от диаметра уплотняемого вала,

частоты его вращения и давления уплотняемой среды, намагниченности насыщения МЖ, индукции в зазоре. Проведен анализ и на основании его сделаны выводы о наиболее целесообразных материалах, которые желательно использовать для изготовления МЖУУ. Рекомендуются условия работы МЖУУ (климатические, уровень вибрации, ударные, качки, расположение оси вала в пространстве), при которых обеспечивается полная герметизация уплотнения в течение расчетного промежутка времени. Предлагаются возможные (из числа проверенных при экспериментальном исследовании) сочетания уплотняемой среды и жидкости-носителя, обосновывается ряд практических рекомендаций, направленных на повышение надежности работы, уменьшение объема обслуживания, стоимости изготовления.

#### Основные результаты и выводы

1. Выявлена целесообразность применения МЖУУ вращающихся валов холодильных установок и экспериментально подтверждена их эффективность при следующих эксплуатационных условиях:

- температуре окружающей среды от 223 до 343 К;
- внешних вибрационных воздействиях при амплитудах от 0,22 до 5 мм и частотах от 0,5 до 35 Гц;
- кренах и дифферентах от 0 до 45°;
- ударах с ускорением до 15g;
- скоростях вращения вала от 0 до 1000 рад/с.

При этом обеспечивается полная герметизация системы.

2. Найдена теоретическая модель МЖУУ.
3. Проведенные экспериментальные исследования показали адекватность теоретической модели.
4. Полученная на основе теоретической модели расчетная зависимость позволяет выполнять практические расчеты МЖУУ холодильных установок с учетом экспериментально полученного коэффициента  $K$ .

5. Для обеспечения практически полной герметизации холодильных установок необходимо применять МЖ с жидкой основой, смешивающейся с уплотняемой средой, с намагниченностью насыщения от 50 до 80 кА/м; при этом магнитная индукция в зазоре должна быть равна 1,5-1,8 Т.

6. Разработанный зонд с чувствительным элементом в виде миниатюрного датчика Холла из нитевидных кристаллов антимонида индия позволяет выполнять замеры магнитной индукции в зазорах от  $0,1 \cdot 10^{-3}$  м.

7. Разработана классификация МЖУУ холодильных установок.

8. Разработаны основы проектирования МЖУУ холодильных установок и рекомендации по их совершенствованию.

9. Результаты исследований внедрены на ряде предприятий. Основные положения диссертации опубликованы в следующих

#### работах

1. Радионов В.А. О некоторых вопросах проектирования магнитогидродинамических подшипнико-уплотняющих устройств. - В кн.: Тезисы докладов девятого рижского совещания по магнитной гидродинамике. Саласпилс, Институт физики АН Латв. ССР, 1978.

2. Радионов В.А., Чумак И.Г. Физические основы процессов в магнитожидкостных уплотнениях. - В кн.: Тезисы докладов Украинского республиканского совещания-семинара "Исследование теплофизических и гидродинамических свойств магнитных жидкостей для новой промышленной технологии и холодильной техники", АН УССР. Николаев, 1979.

3. Радионов В.А. Магнитожидкостные уплотняющие устройства. - "Машиностроитель" 1980, № 3, с. 18-19.

4. Радионов В.А. Николаевское республиканское совещание - семинар "Исследование теплофизических и гидродинамических свойств

магнитных жидкостей для новой промышленной технологии и холодильной техники". - "Магнитная гидродинамика", 1980, № I, с. 145-147.

5. Радионов В.А., Повстемский Ю.А. Магнитожидкостные устройства в холодильной технике. - В кн.: Тезисы докладов Украинского республиканского совещания-семинара "Исследование теплофизических и гидродинамических свойств магнитных жидкостей для новой промышленной технологии и холодильной техники", АН УССР. Николаев, 1979.

6. Радионов В.А. Роль магнитных жидкостей в повышении энергетических показателей холодильных установок. - В кн.: Тезисы докладов девятого рижского совещания по магнитной гидродинамике. Саласпилс, Институт физики АН Латв.ССР, 1978.

7. Радионов В.А., Чумак И.Г. Влияние магнитожидкостной связи на процессы теплообмена холодильной установки. - В кн.: Тезисы докладов Украинского республиканского совещания-семинара "Исследование теплофизических и гидродинамических свойств магнитных жидкостей для новой промышленной технологии и холодильной техники", АН УССР. Николаев, 1979.

8. Радионов В.А., Чумак И.Г., Повстемский Ю.А., Кириличенко С.А. Магнитогидродинамический подшипниковый узел. Авторское свидетельство № 634030. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1978, № 43.

9. Радионов В.А., Нуждин А.С., Цырлин Б.А., Тульчинский Ю.М. Винтовой компрессор. Авторское свидетельство № 635283. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1978, № 44.

10. Радионов В.А., Чумак И.Г., Кириличенко С.А. Магнитогидродинамический подшипниковый узел. Авторское свидетельство № 550499. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1977, № 10.

11. Радионов В.А., Чумак И.Г., Райхельгауз Д.А., Яковлев Л.И. Магнитное уплотнение вращающегося вала. Авторское свидетельство № 616188. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1978, № 27.

12. Радионов В.А., Чумак И.Г., Повстемский Ю.А., Кириличенко С.А. Компрессорная холодильная установка. Авторское свидетельство № 638809. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1979, № 47.

13. Радионов В.А., Чумак И.Г., Бирик Е.Е. Магнитное уплотнение вращающегося вала. Авторское свидетельство № 653469. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1979, № 11.

14. Радионов В.А., Чумак И.Г., Кириличенко С.А., Блиндер С.Н., Поршнева И.В. Узел. Авторское свидетельство № 675238. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1979, № 27.

15. Радионов В.А., Ставинский А.А., Бакуткин Н.И. Электромагнитный компрессор. Авторское свидетельство № 700678. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1979, № 44.

16. Радионов В.А., Кириличенко С.А., Бордах С.И., Борозе В.Г., Повстемский Ю.А. Уплотнение вала. Авторское свидетельство № 723281. - "Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки", 1980, № 11.

Апробация работы: Материалы диссертации докладывались на

1. Совместном совещании Госкомитета по науке и технике Совета Министров СССР и экспертной группы АН СССР под руководством академика Боровик-Романова А.С. (1977 и 1978 гг.).

2. Девятом рижском совещании по магнитной гидродинамике в Институте физики АН Латв.ССР (1978 г.).

3. Первом рижском семинаре по жидким намагничивающимся средам в Институте физики АН Латв.ССР (1977 г.).
4. Постоянно действующем семинаре по жидким намагничивающимся средам в Институте механики МГУ (1979 г.).
5. Подсекции "Термодинамика и теплообмен холодильных установок" научного совета АН УССР по комплексной проблеме теплофизики (1978 г.).
6. Украинском республиканском совещании-семинаре "Исследование теплофизических и гидродинамических свойств магнитных жидкостей для новой промышленной технологии и холодильной техники" (1979 г.).
7. Научно-технической конференции: "Предотвращение загрязнения моря и атмосферы с судов" в Ленинграде (1979 г.).
8. Областном научно-техническом семинаре: "Повышение долговечности работы машин и оборудования с использованием эффекта избирательного переноса и магнитных жидкостей" в г. Николаеве (1979 г.).
9. 46,48-й научных конференциях ОТИХП (1977-1979 гг.).
10. Научно-технических конференциях НИИ (1976, 1977, 1979 и 1980 г.).
11. Техсоветах ряда предприятий и организаций.