

УДК 621.318:62-762

## МАГНИТОЖИДКОСТНЫЕ УПЛОТНЕНИЯ

Ю. О. Михалев, д.т.н. (СКТБ "Полюс", г. Иваново)

Магнитная жидкость (МЖ) на основе керосина, созданная в середине 1960-х годов американским исследователем Пайпелом, дала толчок к развитию качественно новых материалов, техники и технологии. Уникальные свойства МЖ позволили в последующие годы создать абсолютно герметичные магнитожидкостные уплотнения валов и штоков, быстроразъемные уплотнения крышек и фланцевых соединений для вакуумной, химической и биологической технологий; пылезащитные уплотнения для прецизионного оборудования и приборов; герметичные подшипниковые узлы и зубчатые передачи с магнитожидкостными смазочными материалами (МСМ) для работы в условиях неблагоприятного воздействия пара, морских брызг, широкого диапазона температур; магнитоуправляемые демпферы, виброизоляторы, муфты и тормоза для техники нового поколения; высокоточные магнитожидкостные датчики угла наклона, ускорения и малых перепадов давлений для систем автоматического регулирования и измерения; устройства генерации и передачи звука; магнитные сепараторы и технологические среды для механической обработки материалов. Это лишь малая часть эффективного использования МЖ.

В результате бурного развития магнитожидкостной технологии возникло новое научное направление – феррогидродинамика и созрела необходимость создания конструкторско-технологической организации, предназначенной для внедрения достижений в области магнитожидкостной технологии. В августе 1980 г. по решению Правительства было открыто Специальное конструкторско-технологическое бюро "Полюс" на базе научно-исследовательской лаборатории Ивановского энергетического института, достигшей наибольших успехов в разработке, исследованиях и внедрении МЖ и различных устройств, имеющих большое народнохозяйственное значение.

### 1. Синтез МЖ

Магнитные жидкости представляют собой коллоидный раствор тонкодисперсного магнетика (диаметр около 10 нм) в жидкости-носителе. В качестве магнетика применяют магнетит, железо, никель и кобальт, а в качестве жидкости-носителя – кремнийорганические и фторорганические

жидкости, минеральные и синтетические масла, эфиры, керосин, воду и другие жидкости в зависимости от назначения МЖ. В гравитационном поле магнитные частицы могут отделяться от дисперсионной среды и оседать под действием силы тяжести. Этому противодействует броуновское движение, которое преобладает, если размер частиц достаточно мал. Такие МЖ кинетически устойчивы.

Для ограничения молекулярного и магнитного взаимодействий поверхность частиц покрывают защитной оболочкой поверхностно-активного вещества (ПАВ). При сближении частиц защитные оболочки отталкиваются. Условие агрегативной устойчивости МЖ заключается в преобладании энергии упругого отталкивания защитных оболочек по сравнению с энергией притяжения. Другой способ предотвращения агрегации частиц заключается в создании структурной сетки, фиксирующей частицы на дальних расстояниях. В образовании структурной сетки участвуют как ПАВ, так и жидкость-носитель. Такие МЖ даже в отсутствие магнитного поля обладают явно выраженными тиксотропными свойствами и имеют высокую вязкость.

Дисперсионную среду выбирают в зависимости от назначения МЖ, при этом главными факторами являются ее температурный диапазон работоспособности, испаряемость, вязкость, смазочные свойства, совместимость с магнитной фазой, ПАВ и другими рабочими жидкостями. В машиностроении применяют МЖ на основе силиконов, перфторуглеродов, минеральных и синтетических масел. Наиболее распространенной магнитной фазой является магнетит, получаемый методом осаждения из растворов солей хлорного и сернокислого железа в присутствии аммиака. В качестве ПАВ используют вещества, имеющие короткую функциональную группу (кислотную, щелочную, аминную и др.) и длинную хвостовую цепочку (углеводородную, кремнийводородную, фторуглеродную).

В СКТБ "Полюс" разработаны технология МЖ на основе магнетита и методы управления ее физико-химическими свойствами, определены оптимальные рецептуры, выпущены технологические регламенты и технические условия, подго-

товлено производство и освоен мелкосерийный выпуск МЖ, представленных в таблице. Изучены физико-химические и эксплуатационные характеристики разработанных МЖ: коллоидная устойчивость в гравитационном и магнитном полях, магнитные свойства, реологические характеристики, испаряемость, термо- и морозоустойчивость, химическая стойкость и трибо-технические характеристики [1].

Свойства МЖ, выпускаемых СКТЬ "Полос"

Марка МЖ, стандарт	Рабочая температура, °С	Пластичная динамическая вязкость, Па · с	Намагниченность насыщения, кА/м	Область применения
С1-20, ТУ 49-2-1-85	-50 + +90	0,5+0,6	20+30	Уплотнения вакуума, парогазовых и биологически активных сред
С 1-20Б, ТУ 49-2-2-85	-50 + +90	0,5+0,6	40+50	Статические вакуумные уплотнения
С1-20В, ТУ 49-2-1-88	-60 + +100	До 1	20 + 30	Пылезащитные и парогазовые уплотнения
С2-40М, ТУ 49-2-1-89	-70 + +130	0,12+0,35	30+70	Высокоскоростные уплотнения
Ф1 -20, ТУ 49-2-3-88	-30 + +130	До 10	20+30	Уплотнения для жидких и газовых коррозионных сред
МРС, ТУ 49-2-2-89	-50 + +150	10	300+600	Демпферы, виброизоляторы, муфты, тормоза
СМ- 1, ТУ 49-2-2-88	-50 + +150	До 1,5	15+25	Смазки
Т-40, ТУ 49-2-1-91	-50 + +50	0,03+0,18	40+90	Датчики

**2. Теоретические основы МЖУ**

Магнитожидкостные уплотнения относятся к бесконтактным щелевым уплотнениям, работающим по принципу гидравлического затвора, в котором МЖ удерживается магнитным полем в рабочих зазорах между сопрягаемыми деталями. МЖУ имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с традиционными уплотнениями: обеспечивают практически полную герметичность, что особенно важно при герметизации объемов с коррозионными, ядовитыми и экологически вредными средами, утечки которых недопустимы; выдерживают достаточно высокий перепад давления как в статическом, так и динамическом режимах с малыми собственными потерями на трение; надежны в работе; просты по конструкции и изготовлению.

Простейшая традиционная конструкция МЖУ (рис. 1) состоит из кольцевого постоянного магнита 4 и двух полюсов 1, на рабочих поверхностях которых выполнены кольцевые зубцы. Магнитный поток, возбуждаемый магнитом 4, удерживает МЖ 3 в рабочем зазоре между неподвижными полюсами 1 и подвижным валом 2, обеспечивая его герметизацию относительно неподвижного корпуса 5. Статические зазоры уплотнены прокладками 6. Максимальный перепад внешнего давления, который может удержать МЖУ (критический перепад давления), определяется по формуле

$$P_{кр} = N p_1,$$

где  $N$  — число зубцов на одном полюсе;  $p_1$  — критический перепад давления однозубцового полюса.

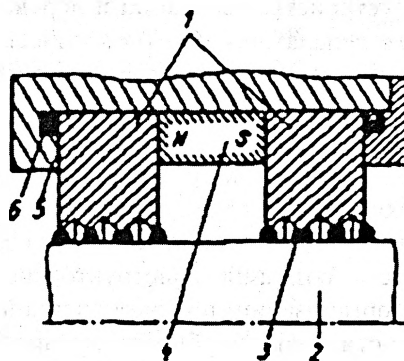


Рис. 1. Простейшая конструкция МЖУ

Рассмотрим однозубцовый полюс, образующий с поверхностью неподвижного вала клиновидный рабочий зазор (рис. 2). Если предположить, что МЖ — гомогенная жидкость (не учитывать взаимодействие частиц и образование структур), то в статическом режиме состояние МЖ описывается уравнением Бернулли

$$p - U_m = \text{const},$$

где  $p$  — давление;  $U_m$  — магнитная энергия.

Магнитная энергия единицы объема МЖ

$$U_m = \mu_0 \int_0^H M dH,$$

где  $\mu_0$  – магнитная постоянная;  $H$  – напряженность магнитного поля;  $M$  – намагниченность МЖ.

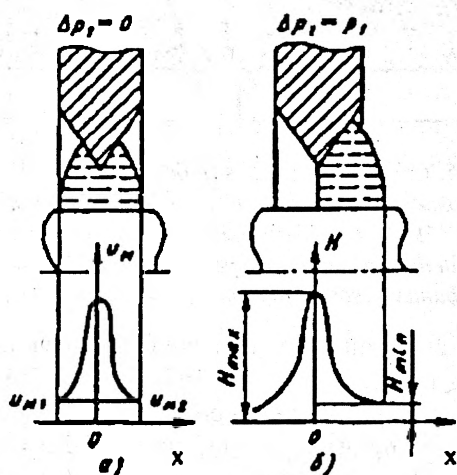


Рис. 2. Положение магнитной жидкости под зубцом при отсутствии внешнего перепада давления (а) и при критическом перепаде давления (б).

Магнитная жидкость, помещенная в неоднородное магнитное поле, образует пробку и стремится занять положение, соответствующее максимуму ее магнитной энергии. Разность магнитных энергий на свободных поверхностях, ограничивающих объем МЖ, равна перепаду внешнего давления в статическом режиме [1]:

$$\Delta p = \Delta U_m = U_{m1} - U_{m2}.$$

При отсутствии перепада внешнего давления ( $\Delta p_1 = 0$ ) МЖ занимает симметричное положение относительно оси полюса, так что значения магнитной энергии на свободных поверхностях одинаковы (см. рис. 2, а). Перепад внешнего давления вызывает смещение МЖ в направлении его действия до критического положения, при котором дальнейшее повышение перепада давления приводит к нарушению герметичности МЖУ (см. рис. 2, б).

Процесс нарушения герметичности МЖ включает три стадии (рис. 3). Сначала со стороны большего давления в сторону меньшего направляется множество мельчайших пузырьков (см. рис. 3, а). При дальнейшем увеличении перепада давления пузырьки сливаются, образуя единый канал (см. рис. 3, б). При этом воздух с шипением уходит в сторону низкого давления – это вторая стадия. На первых двух стадиях не наблюдается выброса МЖ из-под полюса. Когда перепад давления еще увеличивается, поток воздуха резко выбрасывает МЖ, окончательно разрушая магнитожидкостную пробку (см. рис. 3, в). На первых

двух стадиях уменьшение перепада давления приводит к восстановлению герметичности магнитожидкостной пробки, а на третьей – герметичность может восстановиться при  $\Delta p_1 \ll p_1$ , если объем оставшейся МЖ достаточен для перекрытия рабочего зазора. При многократном повторении пробоя магнитожидкостной пробки в течение короткого времени (5 мин) на первой и второй стадиях критический перепад давления остается постоянным:  $p_d = p_1 = \text{const}$ . Таким образом, неразрушающий контроль критического перепада давления достигается при медленном повышении перепада давления так, чтобы пробой магнитожидкостной пробки проходил на первой или, в крайнем случае, на второй стадии.

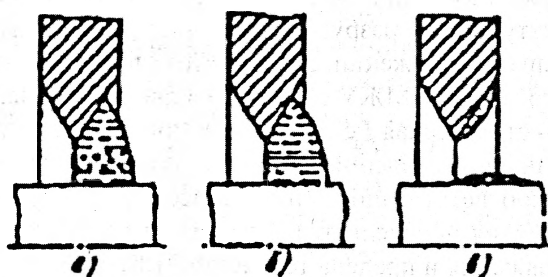


Рис. 3. Схема нарушения герметичности МЖ

В МЖ сразу после ее заправки под зубец происходят диффузионные процессы миграции частиц магнитной фазы. Можно выделить главный, седиментационный поток  $I_1$  (рис. 4), обусловленный основным градиентом магнитного поля. Второстепенные седиментационные потоки к поверхностям зубца ( $I_3$ ) и вала ( $I_5$ ) обусловлены местными градиентами магнитного поля, вызванными уступом на поверхности зубца и микронеровностями поверхностей. Седиментационные потоки приводят к образованию разницы концентраций между различными областями магнитожидкостной пробки. Вслед за этим в соответствии с первым законом Фика появляются диффузионные потоки  $I_2, I_4, I_6$ .

По мере перераспределения концентрации частиц дисперсной фазы происходит ослабление потоков  $I_1, I_3, I_5$  и усиление потоков  $I_2, I_4, I_6$  до условий  $I_1 = I_2, I_3 = I_4, I_5 = I_6$ , при которых наступает равновесное распределение концентрации по всему объему уплотнителя ( $I_x = I_y = 0$ ). При этом в уплотнителе с сечением  $x_1 x_2 y_1 y_2$  можно выделить объем высокой концентрации с сечением  $x_1 x_2 y_1 y_2$  находящийся в зоне максимума градиента магнитного поля (см. рис. 4).

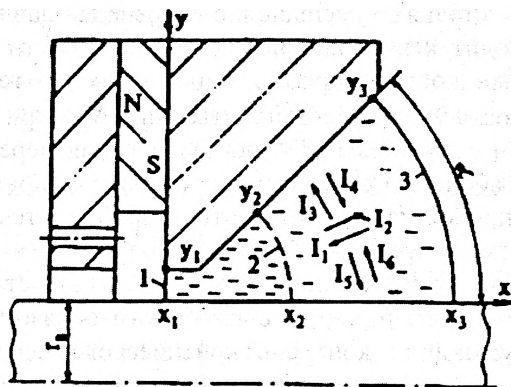


Рис. 4. Схема диффузионных потоков частиц в магнитожидкостной пробке

При вращении вала МЖУ упорядоченная структура МЖ разрушается под действием касательных напряжений. Если частота вращения мала, то в зазоре МЖУ образуются две зоны (рис. 5, а) — статическая *I* с неразрушенной структурой и ламинарного течения *II* с объемными долями частиц соответственно  $C_c$  и  $C_T$ . Высота  $h_p$  разрушаемого слоя определяется равенством касательного напряжения и предела текучести МЖ.

В статической зоне *I* частицы связаны с поверхностью полюса и между собой молекулярными и магнитными силами. Под действием этих сил со временем происходят деформация и разрушение защитных оболочек, агрегация частиц. При этом концентрация частиц в зоне *I* увеличивается, а связи между частицами упрочняются. В зоне *II* частицы стремятся в область максимальной напряженности магнитного поля — на острие зубца полюса в статической зоне *I*. Кроме того, диффузионные процессы, направленные к поверхностям полюса и вала, а также агрегация частиц способствуют уменьшению концентрации  $C_T$  частиц, а следовательно, и намагниченности МЖ в этой зоне. При малой частоте вращения вала постепенно в длительном режиме работы МЖУ формируется еще одна статическая зона (рис. 5, б) — у поверхности вала — из-за диффузии частиц к поверхности вала.

Таким образом, в рабочем зазоре образуется зона, в которой при длительной работе МЖУ уменьшается намагниченность МЖ. Критический перепад давления определяется перепадом, при котором происходит пробой менее прочной зоны — зоны *II* ламинарного течения; поэтому в процессе длительной работы МЖУ уменьшение доли частиц  $C_T$  в зоне ламинарного течения вызывает уменьшение критического перепада давления.

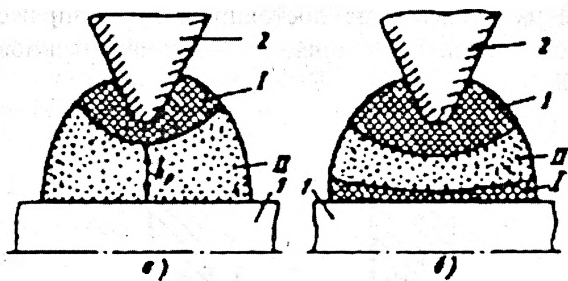


Рис. 5. Структура МЖ в рабочем зазоре после непродолжительной (а) и длительной (б) работы МЖУ: 1 — вал; 2 — полюсная приставка; I — статическая зона с неразрушенной структурой; II — динамическая зона течения

При высокой частоте вращения вала первоначально течение распространяется по всей высоте зазора, однако со временем формируется статическая зона, причем центробежные силы способствуют ее формированию у поверхности полюса, а не у поверхности вала.

При работе в статическом режиме критический перепад давления увеличивается вследствие перераспределения концентрации частиц. Однако из-за наличия дефектов в конструкции, например эксцентриситета вала относительно оси полюса, в области максимального зазора формируется зона с пониженной концентрацией частиц. Механизм образования этой зоны связан с наличием азимутальной составляющей градиента напряженности магнитного поля, направленного в область минимального зазора, под действием которого концентрация магнитных частиц увеличивается в области минимального зазора и уменьшается в области максимального зазора. Поскольку в области максимального зазора уменьшаются напряженность магнитного поля и концентрация магнитных частиц, то пробой МЖУ происходит в этой области и определяет критический перепад давлений.

Естественно, что при длительной работе МЖ возможно уменьшение ее намагниченности вследствие окисления или других изменений дисперсной фазы; существенны и процессы, связанные с испаряемостью и фильтрацией дисперсионной среды, однако основной причиной изменения критического перепада давления является перестройка структуры МЖ и формирование зоны с пониженной концентрацией частиц.

### 3. Применение МЖУ

**Вакуумное технологическое оборудование.** Разработаны МЖУ на диаметр вала от 25 до 1200 мм, предназначенные для вакуумно-плазменного напыления, вакуумной плавки метал-

лов при производстве особо чистых порошков, для установок по выращиванию полупроводниковых кристаллов и получению редкоземельных элементов, а также для различных испытательных комплексов космической техники.

**Технологическое оборудование для биосинтеза.** В биологической промышленности в процессе культивирования клеток и вирусов используют ферментаторы с перемешивающими устройствами, которые должны обеспечивать стерильность процесса и не допускать утечку экологически вредных продуктов. Ранее для герметизации перемешивающих валов в лабораторных ферментаторах применяли магнитные муфты, имеющие малый передаваемый момент вращения, а в промышленных — торцовые механические уплотнения, работающие с утечкой герметизируемой среды.

**Технологическое оборудование для химической и нефтеперерабатывающей промышленности.** Разработана серия МЖУ для химических реакторов с рабочим объемом до 6 м<sup>3</sup> на диаметры перемешивающих валов от 30 до 160 мм. Особенностью этих уплотнений является возможность работы при больших радиальных и осевых биениях вала (до 2 мм) в контакте с агрессивными средами (растворители, кислоты, щелочи). Конструкция автономна, имеет свои опорные подшипники, гибкую герметичную связь магнитного узла МЖУ с рабочим валом или с фланцем герметизируемого объема и защиту от воздействия агрессивной среды.

Разработано МЖУ для подвода охлаждающей воды к шаровой мельнице, предназначенное для предотвращения утечек воды при ее подаче во вращающийся барабан. Конструкция автономна, обладает абсолютной герметичностью и имеет следующие технические характеристики: критический перепад давления — 0,7 МПа, наработка

Созданы МЖУ для насосов, применяемых на химических, нефтеперерабатывающих и лакокрасочных заводах для перекачивания легколетучих углеводородных жидкостей. Это позволило решить важную мировую проблему защиты окружающей среды от загрязнения углеводородами. Прямая замена торцовых уплотнений на МЖУ не представляется возможной вследствие того, что при контакте с жидкостной средой и высокой частоте вращения вала наблюдается вымывание магнитной жидкости. Представляет интерес совместное применение торцового и магнито-жидкостного уплотнений. При этом дополнительно к

торцовому уплотнению, работающему с утечкой герметизируемой углеводородной жидкости в виде паров, устанавливают МЖУ, работающее без утечек, а пары, скапливающиеся в полости между этими уплотнениями, удаляют по трубопроводу в центральный герметичный резервуар и используют как вторичное сырье или сжигают. Торцовое уплотнение гасит основной перепад давления и исключает гидродинамическое взаимодействие перекачиваемой жидкости с магнитной. МЖУ контактирует с парами и не допускает их утечки. Такое применение МЖУ обеспечивает выполнение требований по охране окружающей среды, предъявляемых к насосам. При этом МЖУ может устанавливаться как на действующих насосах, так и на вновь выпускаемых.

**Энергетическое оборудование.** Совместно с НПО "Астрофизика" разработаны МЖУ для газовых лазеров на диаметры валов от 40 до 170 мм.

Разработано и внедрено МЖУ на модели криогенного турбогенератора в НПО "Гелиймаш". Внедрение МЖУ позволило заменить громоздкие масляные уплотнения, требующие специальных масляных и охлаждающих систем, увеличить число контролируемых выводов газа из вращающегося ротора, повысить эффективность выходных валов и ресурс работы герметизируемых агрегатов, снизить собственное энергопотребление системы герметизации.

**Текстильное оборудование.** Совместно с Костромским технологическим институтом разработаны МЖУ для батанной коробки ткацкого станка СТБ-175 и чесальной машины ЧМД-4. Внедрение уплотнений на костромском льнокомбинате им. И. Д. Зворыкина и РПХО "Ригас мануфактура" позволило улучшить качество продукции благодаря исключению утечки масла и попадания его на ткань.

Разработана конструкция герметичного подшипникового узла для сушильных барабанов аспретурно-отделочных линий, работающего в условиях повышенных температур (от 150 до 180 °С) и воздействия пара, применение которого на Яковлевском льнокомбинате позволило в 6 раз увеличить срок службы подшипника и в 500 раз снизить затраты на его техническое обслуживание.

**Пылезащитные МЖУ.** Разработано магнито-жидкостное уплотнение для защиты магнитного диска накопителя памяти винчестерного типа от попадания пыли.

**4. Сравнительные испытания МЖУ, разработанных ведущими фирмами США и России**



В целях определения научно-технического уровня разработанных МЖУ проведены сравнительные испытания вакуумных МЖУ США (Ferrofluidics Corporation) и России (СКТБ "Полус") в Сеульском трибологическом научном центре университета Hong-ik.

Испытания показали, что уплотнения и магнитные жидкости, разработанные в СКТБ "Полус", конкурентоспособны и по техническим характеристикам не уступают зарубежным, а по некоторым характеристикам лучше. Например, собственные потери на трение российских уплотнений на 10-30 % меньше, чем у американских.

**Список литературы**

1. **Магнитные жидкости в машиностроении** / Д. В. Орлов, Ю. О. Михалев, Н. К. Мышкин и др. М.: Машиностроение. 1993. 272 с.
2. **Михалев Ю. О.** Критерии работоспособности магнитоожидкостных уплотнений // Трение и износ. 1991. Т. 12. № 1. С. 5-11.
3. **Kim C. K., Mikhalev Y. O.** Comparative study on the friction torque of highspeed magnetic fluid seals for ultra high vacuum // Тез. докл. VII Международ. Плесской конф. по магнитным жидкостям. Иваново: ИГЭУ, 1996. С. 147-148.

Ж. "Вестник машиностроения" № 5 2002 г.

*Мы должны стремиться не к тому, чтобы нас всякий понимал, а к тому, чтобы нас нельзя было не понять.*

*Никто не может быть ни всезнающим, ни всемогущим.*

*Вергилий*

СТРАНИЦА АВТОМЕХАНИКА

**УДАРИМ АВТОПРОБЕГОМ ПО...**

**ПРОБЛЕМЫ ТРЕНИЯ В СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКЕ  
ДВЕ СТОРОНЫ ОДНОЙ МЕДАЛИ**

(Продолжение. Начало см. в № 2(11) 2001 г. - № 4 (17) 2002 г.)

Повышенная вязкость масла при пуске создает значительное сопротивление проворачиванию деталей в узлах трения и этим затрудняет пуск. Зависимость крутящего момента и частоты вращения коленчатого вала автомобильного двигателя от вязкости масла иллюстрируется на рис. 17 с повышением вязкости крутящий момент увеличивается, а потребная частота вращения снижается, то есть для пуска создаются условия неблагоприятные.

Опытом эксплуатации двигателей и исследованиями установлена, что величина предельно допустимой вязкости смазочных масел при холодном пуске составляет 70-130 Ст.

Для агрегатов трансмиссии пусковая предельно допустимая вязкость в десятки раз выше, чем для двигателей. Так, для большинства автомобилей трогание с места возможно при вязкости трансмиссионного масла не более 4 000 П.

Если температура окружающего воздуха ниже минимально возможной температуры пуска агрегата на данном масле масло подогревают непосредственно в картере или заправляют систему теплым маслом. Категорически запрещается пуск

двигателя или трогание с места с помощью буксировки на масле, вязкость которого выше пусковой, так как это неизбежно приведет к усиленному изнашиванию или поломке отдельных деталей

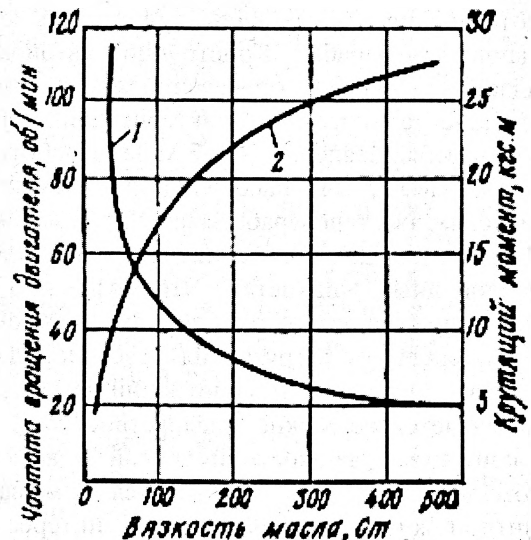


Рис. 17. Зависимость крутящего момента и числа оборотов двигателя в период пуска от вязкости масла: 1 – частота вращения; 2 – крутящий момент.