

А.В. Титенок И.А. Титенок

**СНИЖЕНИЕ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ
ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ И СПАСАТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ**

Брянск 2016

УДК 220.179.112
ББК 34.4
Т45

Титенок, А.В. Снижение трибонапряженности транспортирующей и спасательной техники: монография/А.В. Титенок, И.А. Титенок. – Брянск: БГАУ, 2016. – 258 с.

ISBN 978-5-88517-265-3

Монография предназначена для специалистов в области различных транспортно-технологических процессов и средств их реализации.

Монография будет полезной также и студентам всех форм обучения: по специальности направлениям подготовки: 190109 "Наземные транспортно-технологические средства" (квалификация "специалист"); 190100 "Наземные транспортно-технологические комплексы" (квалификация "бакалавр"); 280700 "Техносферная безопасность" профиль "Безопасность технологических процессов и производств" (квалификация "бакалавр").

Даны фрагменты истории развития и представлены основные положения о трении и обеспечении устойчивости к износу трущихся поверхностей деталей машин. Рассмотрены номенклатура, эксплуатационные характеристики и показатели качества топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей, влияющие на технико-экономические показатели машин.

Рецензенты: д.т.н., академик РАЕН Аксютенков В.Т.;
директор ООО "РТС-ЛИФТ" Карпенков А.И..

ISBN 978-5-88517-265-3

© Титенок А.В., 2016
© Титенок И.А., 2016

ВВЕДЕНИЕ

Термин "трибонапряжения", означает наличие разнообразных технических процессов, в основе которых заложены явления трения и износа. Большинство машин (85...90%) выходит из строя вследствие износа их деталей. Затраты на ремонт и техническое обслуживание машины в несколько раз превышают ее стоимость: для автомобилей в 6 раз, для самолетов до 5 раз, для станков до 8 раз. На ремонт тракторов затрачивается почти в 4 раза больше производственных мощностей, чем на их изготовление.

Трудоемкость ремонта и технического обслуживания многих строительных и дорожных машин за срок их службы примерно в 15 раз превышает трудоемкость изготовления новых изделий. Создание машин, не требующих капитальных ремонтов за весь срок их службы, и значительное сокращение текущих ремонтов по своей технико-экономической эффективности равноценны удвоению мощности машиностроительных заводов и увеличению выпуска металлов на многие миллионы тонн в год.

Одна треть станочного парка находится на балансе ремонтных предприятий. На запасные части расходуется более одной пятой выплаваемого металла. Снижение негативного влияния трения и износа в машиностроении является актуальным направлением инженерной деятельности.

РЕТРОФРАГМЕНТЫ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ

Трение никогда не существует само по себе. Оно вторично. Трение – это ограничение, явление, накладываемое на идеальную модель и выражающее необратимость процессов, происходящих в реальном мире. История развития трения изложена И.В. Крагельским. М.К. Усков и В.А. Максимов рассмотрели этапы развития и современное состояние гидродинамической теории смазки, основоположником которой считают Н.П. Петрова. История науки о трении развивалась как понятие о сопротивлении относительному перемещению тел.

С трением давно связано много задач, часть которых не решена до сих пор. Практические задачи, определяющие развитие механики, связаны с трением. Люди издавна перетаскивали волоком гигантские каменные глыбы, необходимые, например, для сооружения древних могильников и святилищ. Начальный период развития технической мысли сопровождался получением огня трением (эпоха палеолита), заменой трения скольжения трением качения (изобретение колеса в VI тысячелетии до н.э. – цивилизация Шумеров), созданием конструкций подшипников скольжения в древних колесницах. Уже в то время подшипники смазывали. В гробнице Юки и Туйи была найдена колесница. На ее оси сохранился смазочный материал, нанесенный около 1400 г. до н.э.

Трение не только тормоз движению, это главная причина износа контактирующих поверхностей. При раскопках Урука, одного из древнейших шумерских городов, были обнаружены остатки массивных деревянных колес, обитые медными гвоздями для защиты ободов от изнашивания. Древние римляне сберегали подошвы обуви и копыта лошадей, используя железные гвозди. При раскопках в северо-западных областях Европы были обнаружены деревянные плуги XIV–XV веков, лемехи и отвалы которых были защищены от изнашивания путем укрепления рабочих поверхностей мелкими камешками, обладающими высокой твердостью.

Более 2000 лет назад Аристотель в своей механике подлунных (земных) писал о сопротивлении внешней среды движению тел.

Г. Галилей (1564–1642 гг.) предопределил открытие закона инерции и показал, что сопротивление перемещению в условиях равномерного движения оказывают силы трения.

Художник и мыслитель Леонардо да Винчи (1452–1519 гг.) стал автором конструкции подшипников качения и скольжения, провел корректно поставленные эксперименты по исследованию трения, результаты которых сохранились в Мадридском кодексе. Он установил, что сила трения зависит от материала соприкасающихся поверхностей, от

степени их обработки и не зависит от площади соприкасающихся поверхностей, что она прямо пропорциональна нагрузке, прижимающей одно трущееся тело к другому, и может быть уменьшена путем введения промежуточных тел качения (шариков или роликов) или смазочных материалов между трущимися поверхностями. Сила, необходимая для того, чтобы сдвинуть тело, лежащее на горизонтальной плоскости, согласно результатам исследований Леонардо да Винчи, составляет около четверти его веса.

Наши предки, воздвигавшие огромные здания из тщательно обработанных камней, знали, что сопротивление перетаскиванию не зависит от того, лежат камни плашмя или на ребре. Причину этого явления объяснил французский ученый Гильом Амонтон, возведя его в 1699 г. в ранг закона природы – закона линейной зависимости силы трения от нагрузки.

Паран (1666–1716 гг.) установил, что при движении тела по наклонной плоскости с углом наклона α отношение тангенциальной силы к нормальной силе (коэффициент трения) равно $tg \alpha$. Это позволило рассматривать трение как результат подъема одного трущегося тела по неровностям другого тела, моделируемого в виде наклонных плоскостей, и связать потери на трение с углом наклона неровностей контактирующих тел. Раскрытая в XVII веке тайна механического движения была связана с отчетливым пониманием истинной роли трения.

Закон Амонтона, подкрепленный столетие спустя опытами другого француза – выдающегося ученого Шарля Кулона, позволил объяснить таинственное ослабление тяги у первых паровозов даже при пологих подъемах в гору. Кулона считают создателем науки о трении. Он провел исследования в области трения скольжения и качения, рассмотрел аспекты трения покоя. Уточнив закон Амонтона, Кулон предложил двучленный закон трения и закономерность трения покоя от продолжительности контакта. Физический смысл закона Амонтона-Кулона не совсем ясен даже в наше время.

Высока роль трения в становлении учения об электричестве. Слово "электрон" происходит от греческого названия янтаря. В классических опытах Бенжамена Франклина трение служило простейшим способом перераспределения электричества в твердых телах. До открытия Майклом Фарадеем явления индукции магнитным полем тока в проводнике трение служило единственным средством превращения механической энергии в энергию электрическую.

Англичанин Дж. Т. Деагюлье (1683–1744 гг.) предположил, что трение в значительной степени определяется адгезией контактирующих тел по поверхности контакта.

Большинство ученых того времени считали, что причиной трения является подъем одного трущегося тела по неровностям другого. Л. Эйлер

(1707–1783 гг.) тоже придерживался механических представлений. В 1745 г. он получил уравнения для расчета коэффициента трения тела, равноускоренно спускающегося по наклонной плоскости. Эйлер развил теорию трения гибкой нити о круглый цилиндр, определил зависимость трения в условиях равноускоренного скольжения тела и первый отметил, что сопротивление срагиванию (трение покоя) всегда больше, чем сопротивление скольжению.

Представления М. В. Ломоносова (1711–1765 гг.) о молекулярной теории тел, объясняющей особенности строения и движения их свойствами составляющих атомов и молекул, стали основой для выяснения природы трения.

При трении механическая энергия превращается в теплоту. Экспериментально в 1798 г. Б. Румфорд доказал, что это явление происходит путем диссипативности процесса трения.

Р. Майер (1842 г.) и Д. Джоуль (1843 г.) выдвинули принцип эквивалентности механической энергии и теплоты, а в 1847 г. Г. Гельмгольц сформулировал в наиболее общем виде закон сохранения энергии. Р. Клаузиусом были заложены основы механической теории теплоты и введено понятие энтропии, физический смысл которой как степень неупорядоченности системы раскрыл в конце XIX в. Л. Больцман – создатель статистической термодинамики.

Физическая природа трения была объяснена Ц.Р. Бриллюэном, который исходил из дискретности контакта трущихся тел. Он показал принципиальную возможность диссипации энергии при последовательном образовании и разрыве адгезионных связей. Идея диссипации энергии при прохождении процесса обмена связями была развита в различных теориях трения нашими учеными В.Д. Кузнецовым и Г.И. Бартеневым, англичанином Д.А. Томплинсоном и другими.

В XIX-м веке были заложены основы теории гидродинамической смазки. Родоначальником гидродинамической теории смазки считают Н.П. Петрова и О. Рейнольдса. В 1847 г. Г.А. Хирн (1815–1890 гг.) экспериментально установил, что трение в подшипниках скольжения, смазанных маслами, не подчиняется закону Амонтона для твердых тел. Оно зависит от свойств смазочного материала и уменьшается с ростом температуры.

В 1883 г. была опубликована статья Н.П. Петрова (1836–1920 гг.), где были изложены основы гидродинамической теории смазки: сопротивление относительно перемещению при вращении одного цилиндра в другом, концентричном первом, разделенных тонким слоем смазочной жидкости, определяется внутренним трением этой жидкости. Н.П. Петров вывел простую формулу для расчета силы трения на поверхности шипа, связывающую эту величину с вязкостью масла. Впервые в истории науки о трении удалось связать силу трения с фундаментальной характеристикой материала – вязкостью масла).

Формула Н.П. Петрова до настоящего времени используется для оценки силы трения в подшипниках скольжения.

Работы Г.А. Хирна и Н.П. Петрова позволили отказаться от применения в узлах трения растительных масел и перейти к более дешевым и эффективным маслам нефтяного происхождения, осуществляя их подбор по критерию вязкости. В 1880–1881 гг. Д.И. Менделеев разработал научные основы производства смазочных масел из мазута тяжелых кавказских нефтей.

Режим трения определяется отсутствием (сухое трение) или наличием смазочной прослойки, когда устанавливается жидкостная смазка, подчиняющаяся законам гидродинамики. Сейчас это развитая теория, позволяющая рассчитать толщину масляного слоя и прогнозировать режимы трения трущихся деталей новых машин. В ее создание внесли вклад Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин, А.К. Дьячков, М.В. Коровчинский и другие.

При недостаточности смазочного материала трущиеся поверхности контактируют в условиях граничной смазки, закономерности которой раскрыты в трудах В. Гарди, Ф. Боудена, Б.В. Дерягина, В.П. Лазарева, Р.М. Матвеевского, А.С. Ахматова и др. Закономерности сухого трения выявлены М.М. Хрущевым, И.В. Крагельским, А.П. Семеновым и др.

Первые фундаментальные исследования в области теории трения качения принадлежат Ш. Кулону в 1785 г. В 1876 г. вышла классическая работа О. Рейнольдса о связи сопротивления качению с проскальзыванием на площадке контакта. Прогресс в развитии теории трения качения связан также с развитием представлений о том, что в основе трения качения лежит явление несовершенной упругости взаимодействующих тел (гистерезисные потери), теории развиты Д. Тейбором, Д. Гринвудом и др. Значительный вклад в развитие трения качения принадлежит А.Ю. Ишлинскому, Н.И. Глаголеву, К. Джонсону, С.В. Пинегину, А.В. Орлову, И.Г. Горячевой, Ю.М. Лужкову и др.

В 1961 г. Д.М. Толстой экспериментальным путем показал, что с увеличением скорости скольжения поверхностей трения происходит их взаимное отжатие в пределах их сближения при статическом нагружении. В дальнейшем Ф.Р. Геккер и С.И. Хайралиев это явление оценили расчетным путем. Начиная с работ М. Финка в 1930 г., проводятся исследования трибохимических реакций в процессе окисления рабочих поверхностей трущихся тел. Окисление при трении и роль кислорода в трибологическом процессе исследовали Б.И. Костецкий, Г.В. Виноградов, И.В. Крагельский и др.

Уже в первой половине XX века стало ясно, что классическая теория гидродинамической смазки не может быть применена при расчете тяжело нагруженных узлов трения и, прежде всего, зубчатых передач вследствие того, что в этих условиях деформируются контактирующие тела и

меняется вязкость масла.

Учет действия этих факторов позволил расширить область применимости теории жидкостной смазки на условия высоких давлений, которые вызывают повышение вязкости смазочных материалов и упругую деформацию контактирующих тел.

Эту упруго-гидродинамическую теорию смазки предложили и развили наши ученые А.М. Эртель в 1939 г., А.Н. Грубин в 1949 г., А.И. Петрусевиц в 1951 г., Д.С. Коднир в 1963 г., М.В. Коровчинский в 1964 г., И.А. Тодер в 1970 г., а также зарубежные исследователи Д. Даусон и Г.В. Хиггинсон в 1950 г., Х. Кшеминьски-Фреда в 1969 г. и др.

Значительное влияние на трибологические процессы оказывают конструкция узла трения, материалы трущихся тел и смазочные материалы. В XX веке удалось повысить несущую способность узлов трения, обеспечить их высокую долговечность и надежность, снизить материалоемкость и уменьшить энергетические потери в этих сопряжениях благодаря оптимизации состава и структуры антифрикционных сплавов (М.М. Хрущёв, Н.А. Буше, А.Д. Курицына и др.), созданию и применению углеродных антифрикционных материалов, включая силицированные графиты (Ю.Н. Васильев, З. Бройде, Е.А. Марченко), антифрикционных самосмазывающихся материалов типа АМАН (В.В. Коршак, И.А. Грибова, А.П. Краснов и др.), металлополимерных систем (В.А. Белый, Ю.М. Плескачевский, А.И. Свиреденок и др.), углеродуглеродных композиционных материалов (В.И. Костиков, М.В. Малютин, А.В. Суворов, В.В. Кулаков, Г.Е. Лазарев, С.С. Коконин и др.).

Спецификой трибологии является также создание композиционных материалов, используемых для обеспечения высокого трения в тормозах, муфтах сцепления и т.д. Такими материалами являются фрикционные полимерные материалы и порошковые материалы (Г.А. Георгиевский, И.В. Крагельский, А.В. Чичинадзе, М.М. Бородулин, М.В. Левит, В.П. Мигунов, С.С. Каконин, М.В. Малютин, В.Г. Иноземцев, Л.А. Вуколов, А.В. Суворов и др.).

Закономерности изнашивания рассмотрены в трудах М. М. Хрущева, И. В. Крагельского, А. Д. Курицыной, А. П. Семенова, Б. И. Костецкого, В. Н. Кащеева, В. В. Кислика, Ю. А. Евдокимова, А. В. Чичинадзе, Н. Б. Демкина, Д. Мура, Ф. Боудена и других. Негативные явления от трения в узлах машины связаны также с возникновением недопустимых вибраций, которые при определенных условиях могут существенно влиять на функциональные качества машин, вплоть до разрушения узлов трения. Борьба с потерями энергии и выходом из строя машин и оборудования от трения и износа во многих странах стала государственной задачей.

Являясь непременным спутником трения, изнашивание зависит от него довольно сложным и неоднозначным образом. Трение меняется в сравнительно узких пределах. Износ может при этом возрастать или

уменьшаться порою в десятки, а то и сотни раз даже при незначительных колебаниях внешней среды, например при повышенных влажности или температуре. Это свидетельствует о том, что трение и изнашивание хотя и сопутствуют друг другу, но физически – это разные явления, имеющие свои особые законы и механизмы. Смазочный материал признан полноправным конструкционным компонентом узла трения.

Трибология связана с химмотологией – отраслью знаний о свойствах, качестве и рациональном использовании топлив, смазочных материалов и специальных жидкостей. В создании новых высокоэффективных смазочных материалов, изучении механизма их действия и разработки теоретических основ смазки большое действие оказали работы Н.И. Черножукова, К.С. Рамайя, Б.В. Лосикова, С.Э. Крейна, Г.И. Фукса, П.П. Санина, Ю.Н. Шехтера, Г.И. Шора, В.Л. Лашхи, Г.В. Виноградова и др.

Рост публикаций (рис. 1, адаптировано по Johnson R.L.), изданных более чем за столетие по вопросам, вызванным трением, коррозией и изнашиванием, отражает динамику уровня интереса к упомянутым разделам науки.

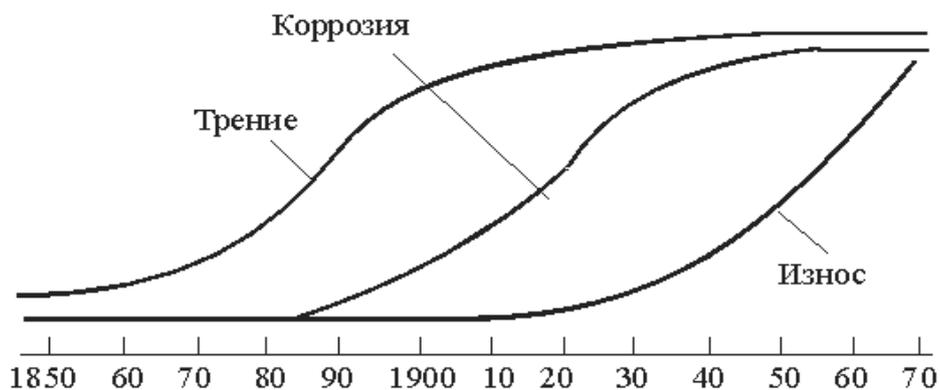


Рис. 1

Объединение процессов трения и изнашивания оказывается под силу новой теории, называемой "синергетика" (гр. "синергос" – "вместе действующий"), которая занимается изучением самоорганизации, устойчивости и распада структур различной природы, происходящих в неравновесных системах на основе соединения принципа материального единства мира с принципом развития. С этой позиции деформируемый материал поверхностного слоя может рассматриваться как функциональная система, которая в условиях непрерывного притока энергии извне начинает проявлять признаки живой материи: обнаруживаются эффекты памяти, наследственности, самоорганизации, фазовых превращений, реакции системы на изменения внешних факторов и т.д. Синергетический подход рассматривает разрушение материала поверхностного слоя как следствие катаклизмов, когда система или ее

локальные составляющие достигают точки бифуркации – неустойчивости, предшествующей смене диссипативного механизма.

РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О ФАКТИЧЕСКИХ ПЛОЩАДЯХ КОНТАКТА

Процесс трения реализуется в контакте взаимодействующих поверхностей. Дискретность контакта следовала уже из представлений Г. Амонтона, Л. Эйлера и др. Явления, происходящие в этом случае, невозможны без развития представлений о площади фактического контакта этих тел, и в 1882 г. начало теории было предложено Г. Герцем решением задачи об упругом контакте криволинейных твердых тел. Работы Ф.П. Боудена и Д. Тейбора позволили установить, что фактический контакт твердых тел из-за неизбежных неровностей поверхностей имеет дискретный характер и показать экспериментально, что фактическая площадь контакта составляет весьма малую долю от номинальной площади.

Б.Ф. Белидор в 1731 г. смоделировал поверхности трения твердых тел множеством полусферических выступов и впадин, которые, однако, предполагал абсолютно жесткими. Первые современные модели поверхностей трения были созданы И.В. Крагельским. Они учитывали дискретность контакта, распределение выступов по высоте и упругость шероховатого слоя. Теоретические и экспериментальные работы в этой области были выполнены В.А. Журавлевым, П.Е. Дьяченко, Дж.Ф. Арчардом и др. Значительный вклад в представления о фактической площади контакта внесли Н.Б. Демкин, Э.В. Рыжов, Я.И. Рудзит и др.

Трением сопровождается каждое механическое движение, и это обстоятельство имеет существенное следствие в современном техническом прогрессе. Тела, перемещающиеся с трением друг относительно друга, должны соприкасаться поверхностями или двигаться одно в среде другого. Движения тел друг относительно друга может и не возникнуть из-за наличия трения, если движущая сила меньше максимальной силы трения покоя. Сила трения есть сила сопротивления движению соприкасающихся тел друг относительно друга.

Трение объясняется двумя причинами: неровностями трущихся поверхностей тел и молекулярным взаимодействием между ними. Если выйти за пределы механики, то следует сказать, что силы трения имеют электромагнитное происхождение, как и силы упругости, о которых речь пойдет позже. Известны несколько видов трения, в числе которых трение покоя, трение скольжения, трение качения, сопротивление среды. Каждая из указанных двух причин трения в разных случаях проявляет себя в разной мере. Так, если соприкасающиеся поверхности твердых трущихся тел имеют значительные неровности, то основная слагаемая в воз-

никающей здесь силе трения будет обусловлена именно данным обстоятельством, т. е. неровностью, шероховатостью поверхностей трущихся тел.

Если соприкасающиеся поверхности твердых трущихся тел отлично отшлифованы и гладки, то основная слагаемая возникающей при этом силы трения будет определяться молекулярным сцеплением между трущимися поверхностями тел.

Трение в жизни человека, в природе, быту и технике выполняет двойственную роль: в одних случаях – положительную, в других – отрицательную. Очень часто трение является полезным, вследствие чего оно широко используется в быту и в технике. Так, именно трение подошв обуви о пол зданий, о дороги и землю обеспечивают возможность передвижения, хождения человека.

Трение об опору – землю, дороги, рельсы, движущих колес различных видов транспорта создает возможность движения автомобилей, трамваев, троллейбусов, поездов, самоходных сельскохозяйственных машин и т. д. С помощью трения обеспечивается передача движения в самых различных, так называемых фрикционных устройствах, например, в муфтах сцепления автомобилей, тракторов и тепловозов, имеющих механическую силовую передачу от двигателей к движущим осям и колесам.

Трение настолько необходимо и мы настолько сжились с ним, что мир без трения показался бы нам просто фантастическим. Сила трения скольжения элементарно определяется по известной формуле Амонтона. Рассмотрим более детально процесс возникновения сил трения скольжения и покоя на стыке двух соприкасающихся тел. Если посмотреть на поверхности тел под микроскопом, то будут видны микронеровности, которые мы изобразим в увеличенном виде (рис. 2, а). Рассмотрим взаимодействие соприкасающихся тел на примере одной пары неровностей (гребень и впадина) (рис. 2, б).

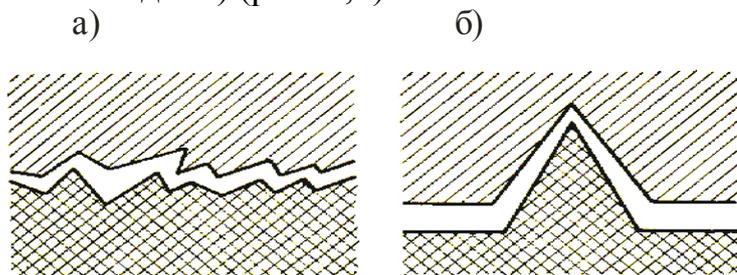


Рис. 2

Когда силы, пытающейся вызвать движение, нет, характер взаимодействия на обоих склонах микронеровностей аналогичный. При таком характере взаимодействия горизонтальные составляющие силы взаимодействия уравновешивают друг друга, а вертикальные силы суммируются и составляют силу N (реакция опоры) (рис. 3, а).

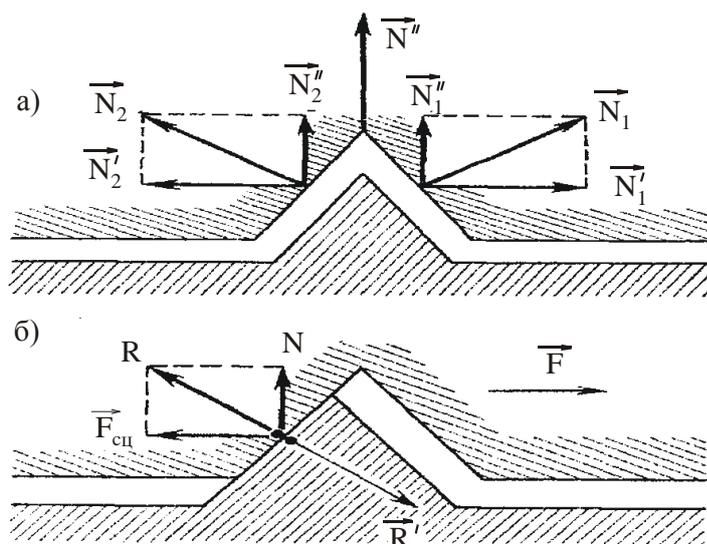


Рис. 3

Иная картина взаимодействия тел получается, когда на одно из тел начинает действовать сила. В этом случае точки контакта будут преимущественно на левых по рисунку "склонах". Первое тело будет давить на второе. Интенсивность этого давления характеризуется силой R' . Второе тело в соответствии с третьим законом Ньютона будет действовать на первое тело.

Интенсивность этого действия характеризуется силой R' (реакция опоры). Силу R' можно разложить на составляющие: силу N , направленную перпендикулярно поверхности соприкосновения тел, и силу $F_{си}$, направленную против действия силы F (рис. 3, б). После рассмотрения взаимодействия тел следует обратить внимание на два момента:

1) при взаимодействии двух тел в соответствии с третьим законом Ньютона возникают две силы R и R' ; силу R для удобства ее учета при решении задач мы раскладываем на составляющие N и $F_{си}$, ($F_{тр}$ в случае движения).

2) силы N и $F_{тр}$ имеют одну и ту же природу (электромагнитное взаимодействие); иначе и быть не могло, так как это составляющие одной и той же силы R .

Весьма важное значение в современной технике для снижения вредного влияния сил трения имеет замена трения скольжения трением качения. Заметим, что коэффициент трения качения, в отличие от коэффициента трения скольжения, именованная величина и выражается в единицах длины – метрах. Заменяется трение скольжения трением качения, в необходимых и возможных случаях, заменой подшипников скольжения на подшипники качения.

Поверхности реальных тел не являются идеально гладкими. Даже при разделении кристалла слюды по плоскости спайности на образованных поверхностях наблюдаются ступеньки высотой в несколько десятков ангстрем. В процессе технологической обработки машиностроительных материалов на их поверхностях возникает микрорельеф – технологическая шероховатость. При эксплуатации этот микрорельеф не исчезает, хотя и претерпевает определенные изменения. Различают два вида микроотклонений от идеального профиля поверхности: шероховатость и волнистость.

При соприкосновении двух таких поверхностей контакт не будет сплошным. Лишь отдельные участки поверхности будут воспринимать приложенную к телам нагрузку. Сумма таких дискретных площадок контакта образует фактическую площадь контакта (ФПК), которая определяет ту область поверхности соприкасающихся тел, где реализуется их силовое взаимодействие. Следовательно, при прочих равных условиях сила трения будет тем больше, чем больше площадь фактического контакта. При решении тепловой задачи трения площадь фактического контакта определяет размеры источника тепла, где происходят процессы превращения механической энергии в тепловую с последующей диссипацией ее.

Поверхностное разрушение твердых тел в процессе трения (износ) связано с величиной ФПК, так как ее размерами определяются наиболее нагруженные объемы приповерхностных слоев. Формирование ФПК под нагрузкой происходит в результате внедрения или смятия отдельных микронеровностей. Чем больше эти деформации, тем больше ФПК. Определение контактных деформаций оказалось важным не только для расчетов фактических площадей. Установлено, что при удельных нагрузках, обычно используемых в машиностроении, именно деформации, развивающиеся в области стыка, в основном определяют изменение взаимного положения взаимодействующих деталей.

В 1939 г. было опубликовано исследование Ф. Боудена и Д. Табора, которое сыграло важную роль в раскрытии механизма формирования ФПК и впервые представило эмпирические данные о ее размерах. Используя метод электропроводности, они установили, что фактическая площадь контакта A_R изменяется прямо пропорционально нагрузке N . Этот результат был интерпретирован как безусловное доказательство существования пластического контакта, ибо, как полагали авторы, при упругом контакте $A_R \sim N^{2/3}$. В дальнейшем этот результат был обобщен практически на все случаи металлического контакта, что привело авторов к формуле $A_R \sim N / p_t$, где p_t – давление текучести более мягкого материала; N – нагрузка. Следует учесть, что давление текучести может изменяться в зависимости от конфигурации микронеровностей и вида деформации (смятие, внедрение), поэтому соотношение $p_t = HB$ является частным случаем. Эта формула до сих пор не потеряла своего значения. Первое соотношение справедливо, если вершины сферических выступов лежат на одном уровне (вырожденное распределение), что не реально. Однако еще многие более поздние исследования строились на этом законе (Лодж, Хоувэлл, Рубинштейн).

И. В. Крагельский в 1948 г. создал модель поверхности трения. Она представляла собой массивную плиту с 50 плунжерами, каждый из которых оканчивался заделанным в него шариком. Гайкой можно было

менять затяжку пружины, что позволяло изменять положение плунжера относительно плиты. Благодаря этому можно было расположить сферические наконечники на разном уровне и менять жесткость всей модели. В этой модели нашли отражение такие принципиально важные особенности контакта, как дискретность контакта, распределение выступов по высоте и упругость шероховатого слоя.

В дальнейшем идея о расположении вершин неровностей на разных уровнях получила всеобщее признание и, несомненно, явилась важным шагом в развитии расчетных методов. Первая работа в этом направлении была выполнена В. А. Журавлевым. Она была опубликована в канун Второй мировой войны (1940 г.) и долгое время оставалась незамеченной. Журавлев произвел расчет ФПК при упругом контакте двух шероховатых тел с микронеровностями в виде сферических сегментов одинакового радиуса. Задаваясь линейным законом распределения вершин, он получил формулу:

$$A_R = k ((1 - \mu^2 / \pi E)^{10/11} N^{10/11},$$

где k – коэффициент; μ – коэффициент Пуассона.

Важный результат этого исследования состоит в том, что обнаружена почти прямая пропорциональность ФПК и нагрузки при упругом контакте. Дальнейшее развитие учения о ФПК твердых тел шло по пути совершенствования моделей шероховатой поверхности. Простые модели позволяли получать очень наглядные результаты и, как показали дальнейшие теоретические и экспериментальные исследования, во всяком случае качественно верно описывали процесс формирования ФПК. Линкольн, изучая трение текстильных нитей, представлял поверхность в виде цилиндра с продольно расположенными рифлями. Считая деформацию упругой, он показал, что $A_R = k N^{8/9}$. Такую же формулу приводят Лодж и Хоувэлл для образца, на котором расположены сферы меньшего размера.

Анализ таких моделей изложен в работах Арчарда. Им было показано, что если модель шероховатой поверхности построена так, что с увеличением нагрузки растет как число пятен, так и средний размер их, то при упругом контакте $A_R = \text{const} (N / E)^n$, где n – зависит от строения модели. Арчард рассчитал целую гамму "многоэтажных" моделей "сфера на сфере" (рис. 4) и пришел к выводу, что средний размер единичных пятен контакта, их число и величина ФПК подчиняются зависимостям: а) $A_R \sim N^{2\Phi}$ И; б) $n_R \sim N^{1-3\Phi}$; в) $A_R \sim N^{1-\Phi}$, где Φ – величина, близкая к $1/3$, если рост площади с нагрузкой происходит главным образом за счет увеличения размера существующих пятен контакта, и $\Phi \rightarrow 0$, когда доминирующую роль в этом процессе играют вновь образуемые пятна контакта. Как показали исследования И. В. Крагельского, Л. Ф. Бессонова, Е. М. Швецовой, рост ФПК с нагрузкой обусловлен главным образом этим

последним процессом. Результат был получен с помощью метода, предполагающего использование двух прозрачных образцов из одного материала. К такому же выводу пришли Дайсон и Хирст, используя метод фазового контраста.

Вильямсон обнаружил слияние отдельных пятен контакта при очень высоких удельных нагрузках. В его экспериментах зафиксировано критическое значение нагрузки, выше которой число контактов остается

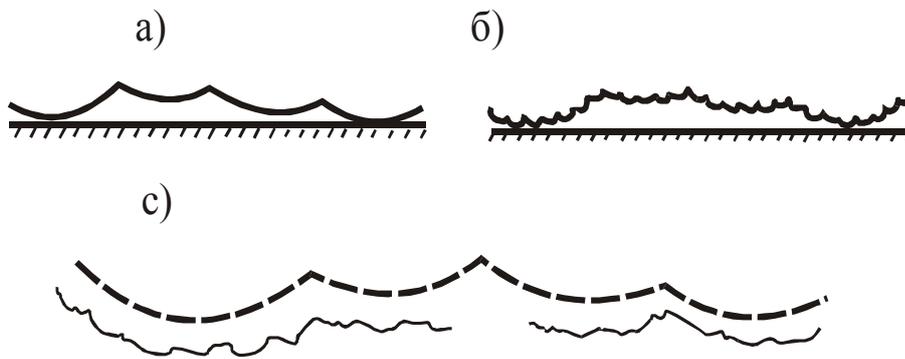


Рис. 4. Модели Арчарда:

а) $A_R \sim N^{4/5}$; б) $A_R \sim N^{14/15}$; в) $A_R \sim N^{44/45}$

постоянным, хотя ФПК возрастает. Было показано, что выше некоторой нагрузки процесс агрегирования пятен имеет большую скорость, чем процесс возникновения новых микроконтактов.

В результате, начиная с некоторой нагрузки, число пятен контакта с ростом нагрузки падает. Модели Арчарда не позволяли получить показатель степени в формуле $n > 1$. Является ли это свойство универсальным или оно определяется характеристиками модели? В экспериментах П. Е. Дьяченко для стальных поверхностей 8 и 10-го классов шероховатости в отдельных случаях получили показатель степени > 1 . Molgard показал, что если вершины неровностей расположены по закону $N_i = d \exp(jz_i)$, где N_i – число неровностей, заключенных в промежутке между $z = 0$ и $z = z_i$; d и j – постоянные, то ФПК прямо пропорциональна действующей нагрузке, что равносильно утверждению о постоянстве средних давлений на контакте. Полученный результат интересно сопоставить с экспериментальными данными И. В. Крагельского. Располагая вершины плунжеров описанной модели поверхности трения по закону "с" (см. рис. 4), он получил постоянство коэффициента трения во всем диапазоне нагрузок (0,26...5,00 кгс). Для модели, у которой число неровностей по мере увеличения z будет расти быстрее, чем по закону, даже при упругом контакте $n > 1$.

И. В. Крагельский в 1943 г. предложил для анализа закономерностей трения стержневую и сферическую модели шероховатой поверхности. Модели определялись следующими параметрами: плотностью неровностей γ (число неровностей, приходящихся на единицу площади) и величиной нормального отклонения вершин неровностей σ . Кроме того, для сферической модели был введен радиус закругления вершин неровностей $r = \text{const}$. Отсутствие в то время мощной вычислительной техники не поз-

волило провести достаточно полный анализ этой модели. Спустя 20 лет (1966 г.) Гринвуд и Вильямсон вновь обратились к этой модели. Предполагая контакт упругим, они получили формулы для расчета характеристик контакта в зависимости от вида функции распределения

$$A_R = \pi \gamma A_a r \sigma F_1(h); \quad n_R = \gamma A_a F_0(h); \quad n = 4/3 \gamma A_a E' r^{1/2} \sigma^{3/2};$$

где n_R – число контактирующих выступов;

N – нормальная нагрузка;

E' – приведенный модуль упругости;

$E' = (1 - \mu_1^2) / E_1 + (1 - \mu_2^2) / E_2$;

$$F_n(h) = \int_h^{\infty} (s - h)^n \Phi(s) ds ,$$

где $\Phi(s)$ – нормированная плотность распределения высот;

$h = a / \sigma$ – безразмерная величина сближения (a – абсолютное сближение).

Более полное описание рельефа поверхности можно получить, используя аппарат случайных функций. С такой постановкой задачи мы встречаемся в исследовании Уайтхауза и Арчарда, которые описывают рельеф поверхности вероятностным законом распределения высот (считая его нормальным) и экспоненциальной автокорреляционной функцией. Для полного описания такой модели нужны два параметра: σ – стандартное отклонение и β – показатель степени корреляционной функции. Из этой модели следовало, что радиус закругления вершин неровностей не является постоянным, а определяется уровнем сечения. Позднее на основе модели Уайтхауза–Арчарда был выполнен расчет ФПК шероховатых тел в предположении об упругих деформациях в зоне контакта. Более общая постановка задачи для оценки радиуса закругления вершин неровностей профиля изложена в работе Г. М. Харача и Л.И. Экслера, которые получили двумерный закон распределения вершин неровностей и их радиусов закругления. Стержневая модель И.В. Крагельского была использована им для того, чтобы установить связь между ФПК и сближением для двух шероховатых поверхностей.

Боуден и Табор, учитывая эффект упрочнения материала в процессе деформации, пришли к выводу, что при пластическом контакте показатель степени при нагрузке равен 1 для неупрочняющихся или предельно наклепанных материалов. Во всех остальных случаях он < 1 . Н. Б. Демкин, используя эмпирический закон Манера, приходит к аналогичному выводу. Из-за того, что вершины неровностей расположены на разных уровнях их

деформации, а следовательно, и напряженные состояния могут различаться. Впервые это обстоятельство было отмечено в работе Хольма, который считал, что среднее напряжение на контакте равно $K \times HB$, где $K < 1$ из-за того, что часть выступов находится в условиях упругих деформаций.

В общем случае по виду деформации все контакты можно разбить на три группы: упругие, пластические и промежуточные – упругопластические. Поскольку закономерности на таких контактах будут различными, важно знать условия, при которых реализуется тот или иной вид контакта. Зарождение пластических деформаций при вдавливании жесткой сферы начинается тогда, когда $p_a = 2,76\tau_y$, где p_a – давление в центре площадки; τ_y – предельное касательное напряжение. Отсюда следует, что условие перехода от упругого к упругопластическому контакту может быть оценено критерием h/r и наблюдается при выполнении условия $(h/r) \geq 16 (\tau_y/E)$, где h – внедрение сферы; r – ее радиус. По Табору критическое внедрение определяется соотношением $h_{KP} = 0,89r (HB/E)^2$, где HB – твердость.

Критерий перехода к пластическим деформациям выводят из условия существования некоторого критического значения средних нормальных напряжений на контакте, при которых материал полностью переходит в состояние пластического течения. Для сферической модели неровностей этот путь ведет к зависимости

$$A/r = k_n (\sigma_T (1 - \mu^2) / E),$$

где $2a$ – диаметр пятна контакта;

k_n – коэффициент, зависящий от соотношения между σ_T и критическими напряжениями на пятне контакта. По данным Холлидея и Айнбиндера $k_n = 7 \dots 12$, Левин приводит значение $k_n = 6,78$.

Экспериментальная проверка этого критерия была предпринята Холлидеем. Гринвуд и Вильямсон ввели индекс пластичности в виде

$$\psi = E' / HB (\sigma / r)^{1/2},$$

где σ – стандартное отклонение профиля. По утверждению авторов, если $\psi < 0,6$, то во всем диапазоне практически употребительных удельных нагрузок реализуется упругий контакт, при $\psi > 1$ – контакт пластический.

Исходя из постоянства объема материала и полагая, что весь выдавленный материал равномерным слоем распределяется по профилю поверхности, Вильямсон получил выражение для ФПК

$$\eta / (1 - \eta) = p_a / HB,$$

где $\eta = A_R/A_a$ – относительная величина ФПК.

Эта формула учитывает эффект выдавливания материала при пластической деформации. При очень высоких удельных нагрузках, достигающих давления текучести материала, наряду с этим эффектом большое значение приобретает эффект интерференции пластических зон. Аппал и Проберт сообщают о том, что при очень высокой плотности контакта изменяется эффективное давление текучести неровностей. В результате ФПК с увеличением нагрузки растет медленнее, чем предсказывает теория Вильямсона [1,2].

1. МАКРОМЕХАНИЗМ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ

Внешним трением называют явление сопротивления относительному перемещению, возникающее между двумя телами в зонах соприкосновения поверхностей по касательным к ним, сопровождаемое диссипацией энергии.

Поверхность трения – часть поверхности тела, участвующая в трении.

Сила трения – сила сопротивления при относительном перемещении одного тела по поверхности другого под действием внешней силы, направленной по касательной к общей границе между этими телами.

Силу трения Кулон классифицировал как силу трения покоя и силу трения движения. Первая из них – это трение двух тел при микроперемещениях до перехода к их относительному движению. Вторая – трение двух тел, находящихся в относительном движении.

Смазочный материал вводится на поверхности трения для уменьшения силы трения и (или) интенсивности изнашивания.

Смазывание – подведение смазочного материала к поверхности трения.

Смазка – это действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и (или) интенсивность их изнашивания.

Трение со смазочным материалом (жидкостное) – трение двух тел при наличии на поверхности трения введенного смазочного материала любого вида.

Трение без смазочного материала (сухое), происходит при отсутствии на поверхности трения введенного смазочного материала.

Различают три основных вида взаимодействия контактирующих тел: в состоянии покоя; одно тело скользит по поверхности другого или же перекатывается по этой поверхности.

Экспериментально доказано, что силы трения покоя $F_{ТР.П}$; скольжения $F_{ТР.С}$ и качения $F_{ТР.К}$ различны для конкретного материала: $F_{ТР.П} > F_{ТР.С} > F_{ТР.К}$.

Рассмотрим и сравним основные виды взаимодействия

контактирующих поверхностей [2].

1.1. Неподвижный контакт двух тел

Пусть тело 1 покоится на поверхности тела 2 (рис. 5) и действует на нее силой тяжести $F_S = mg$, которую назовем нормальной силой действия, где m – масса тела, которую условно примем единичной, например, $m = 1$ кг; $g = 9,81$ кг·м/с² – ускорение свободного падения.

В соответствии с первым законом Ньютона: "всякому действию есть равное и противоположно направленное противодействие", реакция со стороны поверхности тела 2 равна $F_{II} = F_S$, которую назовем силой сопротивления. Считаем, что силы F_{II} и F_S равномерно распределены по поверхности контакта (эпюра a-b-c-d).

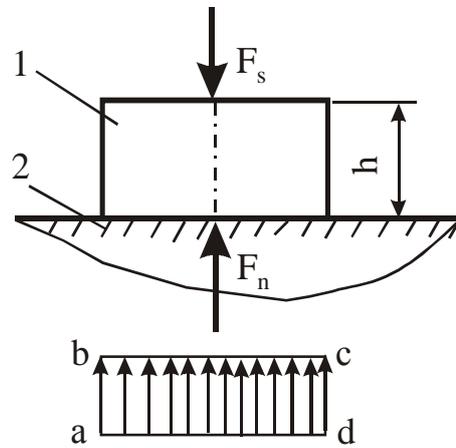


Рис. 5.

Следует отметить условность последнего утверждения. В 30-х годах 20-го века в Кембридже английский исследователь Ф.П. Боуден доказал, что контакт двух твердых тел происходит на малых площадках касания, составляющих ничтожную долю от номинальной площади соприкосновения. Различают три площади контакта: номинальную A_A , контурную A_C и фактическую A_R (рис.6). Для металлов A_C обычно составляет 5...10 % от A_A , а A_R – 0,01...0,1 % от A_A . Для полимеров контурная и фактическая площади много больше.

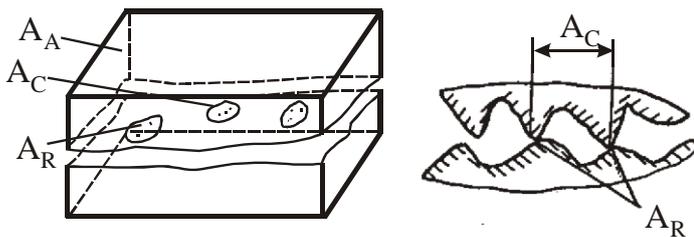


Рис. 6

Номинальная площадь контактирующих поверхностей обусловлена наличием макроотклонений на поверхностях деталей машин и равна сумме отдельных

номинальных площадок A_{AI} . Сумма отдельных контурных площадок A_{CI} , расположенных на номинальных, приводит к образованию контурной площади контакта. Контакт деталей машин происходит по фактическим площадкам A_{RI} , обусловленным наличием на поверхности деталей машин шероховатостей, которые в сумме составляют фактическую площадь контакта. Поскольку фактические площадки контакта не сконцентрированы в одном месте, а размещаются по всей номинальной площади, то равномерность распределения сил F_{II} и F_S в соответствии с

эпюр a-b-c-d можно считать достоверной. Так как рассматривается макромеханизм внешнего трения, то в дальнейшем будем использовать не двухчленный закон, в котором указано на возможность проявления сил атомно-молекулярного сцепления и не молекулярно-механическую (адгезионно-деформационную) или иную современную теорию трения, а закон Амонтона, несмотря на то, что применение его для решения практических задач современности не всегда эффективно:

$$F_{TR} = f F_{\Pi}, \quad (1.1)$$

где f – коэффициент трения.

Такой подход обусловлен следующими причинами:

- исследование макромеханизма (атомно-молекулярного притяжения, деформации поверхностного слоя и т.п.) выходит за рамки поставленной задачи (идеализация предмета совершенствования);
- закон Амонтона по своей сущности может служить базой для анализа макромеханизма внешнего трения, так как отражает соотношение сил на контактной поверхности, а выражение (1.1) удобно для анализа.

Для рассматриваемой схемы сила трения покоя $F_{TR.П} = 0$, силы F_{Π} и F_S взаимно уравновешены, уравнение статики имеет вид

$$\Sigma F_Y = 0 \Rightarrow F_{\Pi} - F_S = 0. \quad (1.2)$$

Коэффициент трения f , устанавливающий пропорциональность напряжений, приложенных к номинальной поверхности контакта, одновременно отражает несовершенство, дискретность контакта и относительность прочностных свойств взаимодействующих материалов при температурно-скоростных условиях осуществляющегося процесса трения.

Таким образом, коэффициент трения ($f = F_{TR} / F_{\Pi}$) количественно характеризует величину силы трения F_{TR} в зависимости от нормальной силы реакции F_{Π} , а качественно – состояние контактирующих поверхностей. Следовательно, если сила трения покоя равна нулю, что может быть при отсутствии хотя бы минимальная касательной (сдвигающей) силы, то в этом случае и коэффициент трения покоя равен нулю. Когда речь идет о коэффициенте трения покоя (f_{Π}), обычно подразумевают коэффициент "максимальной силы трения покоя", что не противоречит его минимальному численному значению, равному нулю.

Приложим к телу 1, находящемуся в состоянии покоя на поверхности тела 2 (рис. 7), нормальную F_S и касательную F_T силы действия. Реакция на F_T со стороны поверхности тела 2 – сила трения покоя $F_{TR.П}$.

Перенесем действие всех сил в точку (m) и запишем уравнения

статики для рассматриваемой системы:

$$\left. \begin{aligned} \sum F_X = 0 &\Rightarrow F_T - F_{TP} = 0; \\ \sum F_Y = 0 &\Rightarrow F_{\Pi} - F_S = 0; \\ \sum M_m = 0 &\Rightarrow M_1 - M_2 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

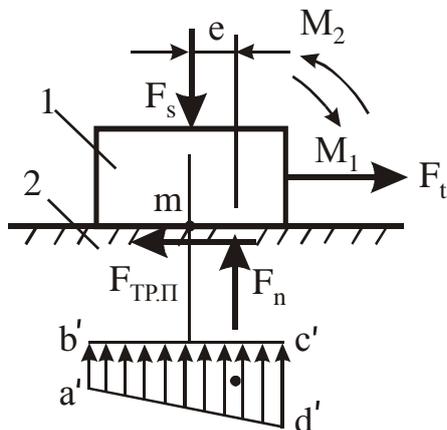


Рис. 7

где $M_1 = F_T k h$ – момент, записанный согласно известной из теоретической механики лемме Пуансо;

$k = 0...1$ – коэффициент, характеризующий величину расстояния от точки приложения силы F_T до поверхности тела 2;

h – высота тела 2;

$M_2 = F_n e$ – момент, записанный из предположения о нарушении распределения нагрузки между контактирующими поверхностями и смещением центра тяжести эпюр этой нагрузки ($a'-b'-c'-d'$) в сторону силы действия F_T от центра площадки контакта тел

1 и 2.

Так как в рассматриваемом случае тело 1 не является подвижным, то $F_{тр.п}$ и F_T взаимно уравновешены: $F_{тр.п} = F_T$, следовательно, из последнего уравнения системы (1.3), с учетом (1.1), имеем

$$f_{\Pi} = e / kh. \quad (1.4)$$

Таким образом, коэффициент трения f количественно характеризует не только соотношение сил ($f_{\Pi} = F_{тр.п} / F_{\Pi}$), но и моментов M_1 и M_2 через расстояния (e и h).

1.2. Непосредственное скольжение двух тел

Рассмотрим взаимодействие тел без смазочного материала или иного промежуточного тела при их перемещении друг относительно друга. Пусть к телу 1 приложена касательная сила действия F_T посредством упругого элемента 3 (рис. 8).

Обозначим суммарную силу действия через F_D ; ее можно вычислить с помощью выражения

$$(F_S^2 + F_T^2)^{1/2}. \quad (1.5)$$

Результирующую силу сопротивления F_C перемещению тела 1 со стороны поверхности тела 2 можно определить по формуле

$$F_C = F_{\Pi} (1 + f^2)^{1/2}. \quad (1.6)$$

Если растягивать упругий элемент 3, перемещаясь в направлении действия силы F_T с постоянной скоростью до тех пор, пока сила трения покоя не достигнет максимального значения

$$F_{II} = F_I + F_{TR.C}, \quad (1.7)$$

где $F_I = ma$ – сила инерции тела 1 (m – масса тела 1; a – ускорение); $F_{TR.C} = f_c F_{II}$ – сопротивление сдвигу со стороны микронеровностей шероховатой поверхности зоны контакта (сила трения скольжения); f_c – коэффициент трения скольжения ($f_c < f_{II}^{max}$).

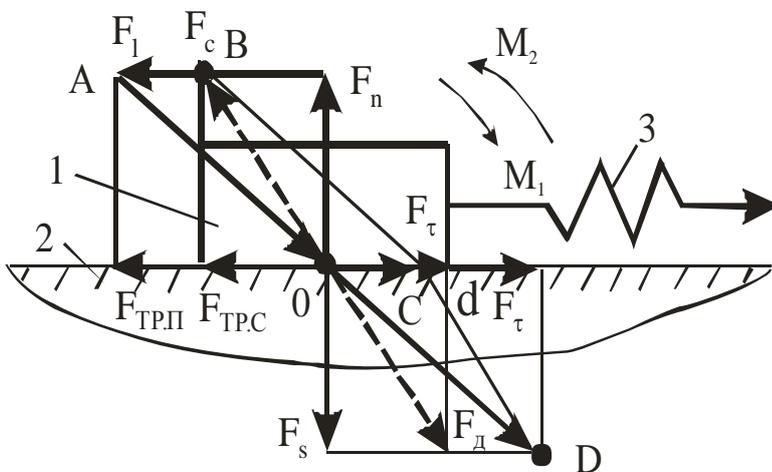


Рис. 8

Дальнейшее растяжение упругого элемента 3 сообщит приращение (dF_T) касательной силы действия F_T , которая превысит значение критической силы трения покоя $F_{TR.C}^{max}$: $(F_T + dF_T) > F_{TR.C}^{max}$. Произойдет срыв тела 1 и его резкое перемещение вдоль линии действия силы F_T , что полностью соответствует модели катастрофического явления.

явления.

В данном случае телу 1 будет сообщен импульс $F = ma$, направленный на преодоление сил инерции F_I . Дальнейшее поведение тела может иметь варианты.

Так, набрав скорость V_{max} , большую ранее приложенной скорости v , тело 1, возможно, пройдет путь L_1 , больший, чем величина сжатия (укорочения) упругого элемента 3 за тот же момент времени, т.е. предвосхитит на какой-то момент процесс сжатия упругого элемента 3, ведущий к дальнейшему перемещению, и на миг остановится. В таком случае следующий срыв опять произойдет при условии, когда

$$(F_T + dF_T) > F_{TR.C}^{max}.$$

Если путь L_1 окажется меньше деформации упругого элемента, то тело 1 будет перемещаться по поверхности тела 2 без остановок, но при этом скорость перемещения не будет постоянной. Это явление в технике носит название механических (фрикционных) автоколебаний.

Наличие двух разных по характеру движений соприкасающихся тел

(совместного и относительного) составляет основную особенность автоколебаний. В литературе нет убедительного объяснения сущности этого явления. Причиной их появления считают положительную разность между силами трения покоя и скольжения, но это следствие, а не причина колебаний.

Наблюдения показали, что колебания наблюдаются и при движении объекта в среде, причем частота и амплитуда колебаний меняется с ростом скорости, например, колебания тела в жидкости при вынужденном перемещении. Резание корнеплодов также сопровождается прерывистым движением лезвия, причиной которого считают сжатие материала перед режущей кромкой лезвия до достижения им предельного напряженного состояния. В результате появляется опережающая трещина и осуществляется интенсивное перемещение ножа в направлении резания. Продвижение обрабатываемого тела в осевом направлении стана винтовой прокатки также осуществляется не непрерывно, а рывками.

Более полно раскрывает физический смысл автоколебаний их определение как поддерживаемых поступлением энергии от неколебательного источника, причем эта энергия регулируется движением самой системы. Под регулированием понимается, что силы, подводимые к системе от источника энергии, меняются во времени в зависимости от самого движения системы и при отсутствии движения равны нулю. Характеристики движения определяются свойствами самой системы.

Действительно, как было показано выше, сила инерции тела 1 не является постоянной, что ведет к изменению числового значения всех сил, проявляющихся при работе трибосистемы (исключение составляет сила тяжести F_S). Распределение сил характеризуется силовым треугольником ОАВ (рис. 8). Треугольник показывает естественное направление сил инерции F_I в момент срыва (ВА), а сумма сил, определяемая по правилу параллелограмма (ОС), равна силе, которую надо приложить к телу 1 для преодоления его инертности. Значения сил постоянно меняются, колеблются вокруг конкретной средней величины, то увеличиваясь, то уменьшаясь, стремясь уравновесить друг друга. Если рассматривать такую трибосистему с точки зрения аксиомы инерции, то происходящий процесс можно охарактеризовать выражениями

$$\left. \begin{aligned} \sum F_X = 0 &\Rightarrow F_T - F_{TP} \rightarrow 0; \\ \sum F_Y = 0 &\Rightarrow F_{II} - F_S \rightarrow 0; \\ \sum M_m = 0 &\Rightarrow M_1 - M_2 \rightarrow 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

которые качественно отличаются от (1.3). В триботехнике фрикционные автоколебания описывают уравнением (теория Н.Л. Кайдановского и С.Э. Хайкина)

$$mx'' + kx = F(x'), \quad (1.9)$$

которое подобно формуле (1.7). Здесь mx'' – сила инерции; kx – упругая сила; $F(x')$ – сила трения.

Если $F(x')$ велика, то характер движения определяется именно ею и силой упругости kx , а сила инерции mx'' существенного влияния на характер движения не оказывает, т.е.: $kx = F(x')$. В данном случае колебания системы носят релаксационный характер (m – масса ползуна, k – жесткость привода, x – малые перемещения). В дальнейшем И.В. Крагельским и А.Ю. Ишлинским было доказано, что сила статического трения зависит от времени неподвижного контакта, поэтому первый скачок обычно больше последующих.

Из формулы (1.7) можно сделать вывод, что, кроме упомянутой зависимости силы трения от величины неподвижности контакта, следует обратить внимание на тот факт, что при перемещении тело 1 не обязательно движется с остановками. Тело, движущееся с замедлением, менее инертно, чем покоящееся – требуется меньшее усилие для его перемещения после замедления, чем при выводе из состояния покоя. Этим также можно объяснить причину максимального значения величины первого срыва (скачка) при перемещении тела 1 по поверхности тела 2, что дополняет известную теорию.

Поверхности деталей машин имеют микро- и макроотклонения. К последним относятся несистематические отклонения от идеального профиля. Микроотклонения – волнистость и шероховатость, подразделяют на технологические и эксплуатационные. Появление технологической волнистости связано с недостаточной жесткостью обрабатываемой системы и неоднородностью механических свойств обрабатываемых материалов. Эксплуатационная волнистость вызвана реологическими явлениями и динамическими нагрузками. Шероховатость обусловлена геометрией взаимодействующих тел, свойствами соприкасающихся материалов.

Предполагают, и это подтверждается опытами, что бугорки шероховатых поверхностей обладают более высокими физико-механическими свойствами в направлении приложенной нагрузки. Возможно, что свойства бугорков и их структура более однородны, чем окружающая их среда, поэтому выступы шероховатости более устойчивы к силовому воздействию. Волнистость и шероховатость являются причиной незначительной фактической площади контакта соприкасающихся тел. В процессе фрикционных автоколебаний перемещение осуществляется в виде серии импульсов. В классическом курсе механики импульсом силы называют физическую величину, равную произведению силы F на промежуток времени t , а импульс тела

(количеством движения) – физическая величина, равная произведению массы m тела на его скорость v . Закон сохранения импульса имеет вид

$$Ft = mv. \quad (1.10)$$

Рассмотрим частный случай (рис. 8) движения тела 1 по поверхности тела 2 в реальных условиях, с учетом трения, значительной суммарной составляющей силы действия F_D и результирующей силой сопротивления F_C . Закон сохранения импульса примет вид

$$F_{II}(1 + f^2)^{1/2} = mv / t. \quad (1.11)$$

Подставив в (1.11) значение $F_{II} = mg$, проведя элементарные преобразования, получим выражение для определения коэффициента трения

$$f_C = (0,01039 a^2 - 1)^{1/2}, \quad (1.12)$$

где коэффициент 0,01039 имеет размерность, обратную размерности квадрата ускорения (a). Формула (1.12) имеет смысл при $a \geq g$ и показывает, что при $a \neq const$ значение коэффициента трения также не является величиной постоянной.

Попытаемся идеализировать частный случай. Пусть тело 1 перемещается в невесомости на границе раздела двух сред. Среда 2 имеет сферическую форму радиусом $R \rightarrow \infty$ и находится внутри среды 3, причем физико-механические свойства обеих сред различны. В таком случае ($F_S = 0$ и $F_{II} = 0$) результирующая сила сопротивления перемещению тела 1 равна

$$F_C = f_C F_D. \quad (1.13)$$

Подставим (1.13) в (1.10), представив последнее в виде

$$f_C F_D t / m = L / t. \quad (1.14)$$

Интегрируя обе части (1.14) по L , получим

$$f_C F_D L = mL^2 / 2 t^2. \quad (1.15)$$

или

$$f_C F_D L = mv^2 / 2, \quad (1.16)$$

где $v = L / t$ – скорость перемещения тела 1.

Формула (1.16) верна, если тело движется прямолинейно и

равномерно, в соответствии с известной аксиомой инерции. В процессе фрикционных автоколебаний $V \neq const$, что дает основание записать (1.16) в виде

$$f_c F_d L = m(V^2 - V_0^2) / 2, \quad (1.17)$$

где V и V_0 – пределы изменения скорости в период цикла колебаний.

Введем обозначения: $A_d = F_d L$ – работа силы действия F_d на перемещении L ; $A_c = f_c F_d L$ – работа силы сопротивления; $\Delta K = m(v^2 - v_0^2)/2$ – изменение кинетической энергии трибосистемы на перемещении L .

Выражение (1.17) согласовывается с теоремой об изменении кинетической энергии механической системы, согласно которой это изменение на некотором перемещении равно сумме работ внешних и внутренних сил на том же перемещении: $\Delta K = \Sigma A_I$ при любом перемещении неизменяемой системы. Но $A_d \leq \Pi_d$, где Π_d – потенциальная энергия силы действия F_d ; работа диссипативной силы всегда отрицательна и никогда не равна нулю на любой замкнутой траектории $A_c < 0$. С учетом изложенного, из (1.17) следует, что работа сил трения характеризуется изменением кинетической энергии циклов перемещения тела 1, а выражение

$$f_c = \Delta K / \Pi_d \quad (1.18)$$

характеризует коэффициент трения скольжения f_c с энергетической точки зрения.

Так как Π_d по своей сути затраченная энергия, а ΔK – полезная энергия, то коэффициент трения в своем физическом смысле аналогичен коэффициенту полезного действия (КПД) механической системы, но с позиции диссипации энергии. Иначе говоря, коэффициент трения характеризует эффективность действия сил трения в процессе рассеивания энергии. Следовательно, μ – КПД элементарной механической системы, работа которой связана с возбуждением трения на поверхностях контактирующих деталях, предположительно, равен

$$\mu = (1 - f)\mu_{др}, \quad (1.19)$$

где $\mu_{др}$ – КПД, учитывающий потери, не связанные с трением.

При перемещении одного тела по поверхности другого тела происходят колебания масс в горизонтальном и вертикальном направлениях. В литературе нет убедительного объяснения причин отрыва одного тела от поверхности другого в процессе трения. Этот факт можно объяснить проявлением действия моментов M_1 и M_2 – см. (1.8). В рассмотренной схеме (рис. 8) перемещение тела 1 ограничено жесткой поверхностью тела 2, опираясь о которую, под действием взаимно неуравновешенных моментов

M_1 и M_2 , оно стремится повернуться вокруг потенциальной оси вращения, проходящей через центр масс тела 1, что ведет к его отрыву от поверхности тела 2.

Таким образом, причина возбуждения фрикционных автоколебаний – неуравновешенность полей силовых факторов, проявляющихся при работе трибосистемы, а колебания тела происходят не только в горизонтальном и вертикальном направлениях, но и вокруг предполагаемой оси вращения.

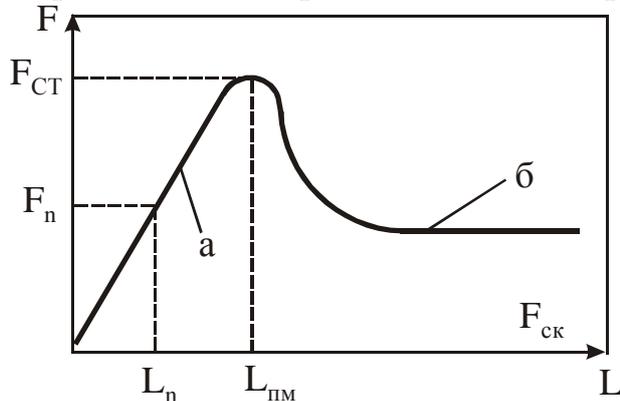


Рис. 9

Под трением понимают сопротивление, возникающее при перемещении одного тела относительно другого, прижатого к первому. При этом различают трение покоя, скольжения и качения. На рис. 9 представлены характерные случаи формирования сил трения: а – сила трения покоя; б – сила трения скольжения.

Силой трения покоя (F_n) называют сдвиговое усилие, прикладываемое к контактирующим телам, и не вызывающее их взаимного скольжения. При этом взаимное перемещение (L_n) достигается за счет деформации материала выступов шероховатости в зоне контакта и называется предварительным смещением. Оно носит в основном упругий характер и исчезает при снятии сдвигающего усилия. Однако по мере роста сдвигающего усилия предварительное смещение приобретает пластический характер и становится частично необратимым. На рис. 9 показана предельная величина предварительного смещения (L_{nm}) и соответственно предельное значение силы трения покоя, которое называют статической силой трения. При дальнейшем увеличении перемещения начинается скольжение.

Механизм возникновения трения объясняет молекулярно-механическая теория трения. В соответствии с этой теорией трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу. Силу трения можно представить как сумму молекулярной (адгезионной) и механической (деформационной) составляющих.

Молекулярная составляющая обусловлена сопротивлением разрыву молекулярных либо межатомных связей, которые возникают между контактирующими телами. Механизм этого процесса аналогичен разрушению кристаллической решетки при сдвиге. Рассеяние работы трения в теплоту связано с упругой деформацией кристаллических решеток. Работа внешней силы переходит в потенциальную энергию решеток. После разрыва связи потенциальная энергия переходит в энергию колебаний атомов, т.е. – во внутреннюю энергию.

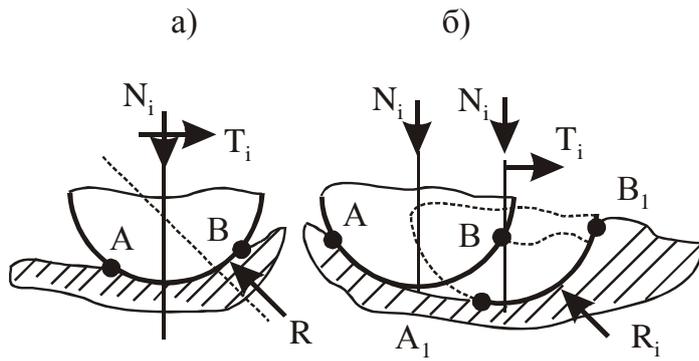


Рис. 10

вязкоупругому полупространству. Материал после прохода выступа из-за запаздывания деформации по отношению к нагрузке не успевает восстанавливать форму. Поэтому выступы перед индентором и после несимметричны, а реакция опоры, приложенная в центре контактной поверхности, не совпадает по направлению с нормальным усилием. Это явление характеризуется гистерезисом деформации.

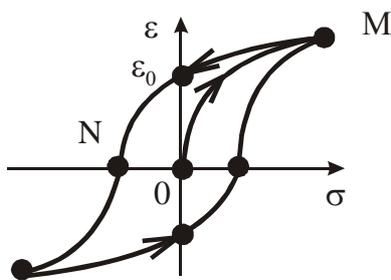


Рис. 11

На рис. 10,б показано поведение жесткого выступа при скольжении по пластической среде. В начале, пока скольжение отсутствует, под действием нормального усилия выступ заглубляется. Контактная кривая AB симметрична. При скольжении задняя граница выступа отрывается от лунки. Вся нагрузка сосредотачивается на передней границе, а дуга контакта занимает положение A_1B_1 . Впереди возникает валик оттесняемого материала. Реакция опоры не совпадает по направлению с нормальным усилием. На рис. 11 показана кривая гистерезиса при растяжении-сжатии вязкоупругого стержня. Кривая OM отражает процесс нагружения, а кривая MN – процесс разгрузки. Из-за запаздывания деформации в тот момент, когда напряжение равно нулю, деформация не исчезает и равна ϵ_0 . Поэтому след, оставшийся при движении выступа, не успевает восстанавливаться полностью, чего следовало бы ожидать для идеальной упругой среды.

1.3. Трение качения

Качение – это движение контактирующих поверхностей, с некоторой относительной угловой скоростью, вокруг оси, лежащей в касательной плоскости. В системе отсчета, движущейся вместе с точкой контакта, поверхности "протекают" через область контакта с тангенциальными скоростями v_1 и v_2 . Тела также имеют составляющие угловых скоростей вращения относительно общей нормали к поверхности ω_1 и ω_2 . Если v_1 и v_2 различны, то качение сопровождается проскальзыванием; если угловые

Механическая составляющая вызвана сопротивлением упругому и пластическому оттеснению выступов контактирующих тел, внедрившихся при движении в контроповерхности (рис. 10). На рис. 10,а показано скольжение жесткого сферического выступа по

скорости ω_1 и ω_2 различны, то качение сопровождается верчением. Верчение (спин) – это движение с относительной скоростью вокруг общей нормали.

Качение без проскальзывания и верчения называют свободным. Трением качения называют сопротивление, возникающее при перекатывании одного тела по поверхности другого (рис. 12). Цилиндр будет перекатываться по плоскости без скольжения, если выполняется условие

$$f_c F_{\Pi} \geq F_T \geq k F_{\Pi} / r,$$

где f_c – коэффициент трения скольжения; F_{Π} – нормальная сила реакции; F_T – касательная сила действия; k – коэффициент момента силы трения качения (имеет размерность длины); r – радиус цилиндра.

Безразмерное соотношение $f_k = k/r$ (по своей сути – коэффициент трения качения) много меньше, чем коэффициент трения скольжения f_c (или коэффициент трения покоя в случае, когда на тело действует сдвигающая сила), для которого выведена аналогичная формула (1.4). По своей сущности, схемы изображенные на рис. 7, 8 и 13, аналогичны, а особенность протекания процессов взаимодействия тел: покой, скольжение или качение определяется формой этих тел.

Считают, что перемещения шара по плоскости осуществляется без возбуждения колебаний, но в литературе есть сведения о том, что если шар перемешать без вращения, то происходит возбуждение фрикционных автоколебаний также, как и для плоского тела. Сравнивая результаты экспериментов при определении твердости тел методом царапания, В.Д. Кузнецов отмечает различный характер колебаний при использовании вращающихся и неподвижных конусов прибора. "Совершенно непостижимым образом ученые сосредоточили свое внимание на "мухе" – мизерных потерях при качении, упорно не желая видеть "слона": практическое исчезновение трения при переходе в равных условиях от скольжения к качению... потери на трение уменьшаются ... примерно в сто тысяч раз... Ученые ... считали, что скольжение и качение – это два самостоятельных и не сводимых друг к другу вида контактного взаимодействия. ...оба явления изучались порознь без всякой связи друг с другом... подобный метод типичный для науки периода и классификации фактов... Д. Томлинсон впервые понял простой факт: при скольжении адгезионные связи на контакте обмениваются одновременно ..., а при качении – последовательно и притом весьма малыми порциями.... при скольжении все связи рвутся одновременно, а при качении – последовательно одна за другой".

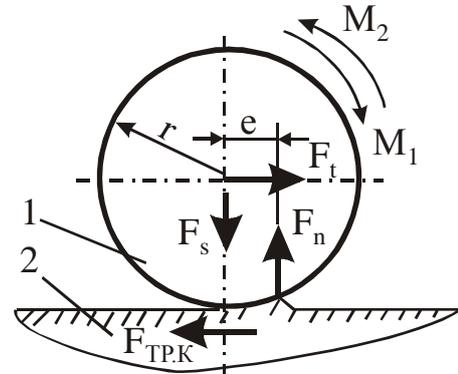


Рис. 12

1.4. Избирательный перенос при трении

Явление избирательного переноса (авторы открытия – Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский) осуществляется на поверхностях трущихся деталей из стали и меди или ее сплавов, а также при наличии в смазочном материале специальных присадок: на поверхности взаимодействия формируется тончайшая медная пленка, снижающая силу трения в несколько раз и значительно снижающая износ поверхности деталей. При работе системы в режиме избирательного переноса коэффициенты трения для твердых тел сравнимы с коэффициентами трения при гидродинамической смазке.

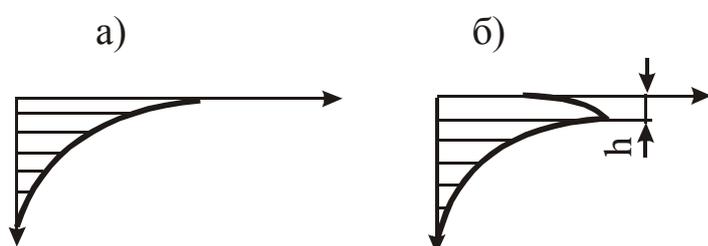
Это объясняется тем, что различными факторами обеспечиваются малые силы трения. Давление поверхностей осуществляется через пластически деформируемый мягкий и тонкий слой меди. Площадь фактического контакта возрастает в десятки раз, а материал деталей узла трения испытывает только упругие деформации. Толщина пленки достигает 1...2 мкм, что соответствует размерам неровностей большинства деталей общего машиностроения. Если при граничной смазке взаимодействие неровностей поверхностей вызывает усталое изнашивание, то при избирательном переносе трение непрерывное, площадки контакта ровные.

Продукты износа, состоящие из частиц меди, могут переноситься с одной поверхности на другую и схватываться, не вызывая повреждений этих поверхностей.

Медная пленка снижает нагрузки до уровней, при которых образование водорода, диффундирующего в процессе трения вглубь металла, практически не происходит. А водородное изнашивание занимает одно из первых мест среди всех видов изнашивания. Формирующаяся у границ раздела пленка обладает пористой структурой, высокой несущей способностью и малым сопротивлением сдвигу.

Пары трения, на поверхности которых нанесен слой меди, характеризуются отсутствием механических колебаний, либо неустойчивым их характером. Но в жидком состоянии медь снижает прочность железа.

Известны факты хрупкого разрушения, сопровождаемого появлением жидкой меди при работе подшипников, изготовленных из различных бронз. Распределение деформации контактирующего материала по глубине характеризуется двумя видами кривых зависимостей: с максимумом на поверхности (рис. 13, а) или на некоторой глубине h (рис. 13, б).



Поверхностная зона составляет примерно 10% от величины полной глубины распространения

Рис. 13

деформации. Она является очень опасной для хрупких и высокопластичных материалов.

Глубинная опасная зона, которая с увеличением силы выходит на поверхность, обнаружена при изучении таких металлов, как медь и алюминий. Изложенное дает основание для формулировки гипотез:

- одной из не упомянутых в специальной литературе причиной увеличения долговечности пар трения при реализации избирательного переноса является отсутствие автоколебаний из-за наличия на поверхностях деталей медной пленки;

- вторая причина увеличения долговечности деталей заключается в том, что незначительная толщина медной пленки не позволяет деформациям (следовательно, и напряжениям) глубинной опасной для меди зоны достигнуть критического значения; в то же время, увеличение фактической площади контакта из-за наличия медной пленки и, как следствие, снижение воздействия на поверхность основного металла, из которого изготовлена деталь, не дает возможности достижения критических напряжений для поверхностного слоя основного материала детали.

Резюме:

Макромеханизм внешнего трения имеет особенности:

- объемы материала, заключенного между сопряженными поверхностями, имеют тенденции к вращению при работе трибосистемы;

- механизм трения скольжения аналогичен механизму трения качения и лишь форма тел определяет характер процесса их взаимного перемещения;

- оптимальный размер и сферическая форма микрочастиц износа повышают эффективность трибосистемы путем снижения коэффициента трения;

- идеальная форма (сферическая) частиц износа в естественных условиях образуется лишь при наличии соответствующих режимов работы трибосистемы;

- реализация избирательного переноса между трущимися поверхностями практически исключает фрикционные автоколебания и увеличивает фактическую площадь контакта, что значительно повышает эффективность трибосистемы.

2. МЕХАНИЗМ ИЗНОСА КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Под изнашиванием подразумевается процесс разрушения и отделения материала с поверхности твердого тела и (или) накопления его остаточной деформации при трении, проявляющегося в постепенном изме-

нении размеров и (или) формы тела. Износ является результатом изнашивания, определяемого в установленных единицах.

2.1. Элементарные понятия

В соответствии с ГОСТом различают следующие виды изнашивания:

- механическое – в результате механических воздействий;
 - коррозионно-механическое – в результате механического воздействия и химического контакта материала со средой;
 - абразивное – механическое изнашивание при режущем и царапающем действия твердых частиц, находящихся в свободном или закрепленном состоянии;
 - эрозионное – механическое изнашивание в результате воздействия потока жидкости и (или) газа;
 - гидроэрозионное (газоэрозионное) – эрозионное изнашивание вследствие воздействия потока жидкости;
 - гидроабразивное (абразивное) – эрозионное изнашивание вследствие воздействия потока жидкости и абразивных частиц;
 - усталостное – механическое изнашивание в результате усталостных разрушений при повторных деформациях микрообъемов материала поверхностного слоя;
 - кавитационное – гидроэрозионное изнашивание при движении твердого тела относительно жидкости, при котором пузырьки газа захлопываются вблизи поверхности, что создает повышение давления или температуры;
 - при заедании – изнашивание в результате схватывания, глубинного вырывания материала, переноса его с одной поверхности на другую и воздействия возникших неровностей на сопряженную поверхность;
 - окислительное – коррозионно-механическое изнашивание, при котором основное влияние на изнашивание имеет химическая реакция материала с кислородом или окисляющей окружающей средой;
 - изнашивание при фретинге – механическое изнашивание соприкасающихся тел при малых колебательных и относительных перемещениях;
 - изнашивание при фретинг-коррозии;
 - электроэрозионное – эрозионное изнашивание поверхности в результате воздействия разрядов при прохождении электрического тока.
- Этим же стандартом (ГОСТ 23.002-78) устанавливаются некоторые определения характеристик износа:
- предельный износ – износ, соответствующий предельному состоянию;

- допустимый износ – износ, при котором изделие сохраняет работоспособность;
- местный износ – износ на отдельном участке;
- эпюра износа – графическое изображение распределения местного износа по поверхности трения или по определенному ее сечению.

Базой физической модели фрикционного контактного взаимодействия твердых тел являются три положения.

- *Двойственная молекулярно-механическая (учитывающая адгезию и деформации) природа внешнего трения.*

Трение обусловлено как преодолением молекулярного взаимодействия между сближенными поверхностями (в пределе – это "мостики сварки"), так и упругим или пластическим деформированием поверхностных слоев. Учет двойственной природы нашел место еще в 1939 году в работе И. В. Крагельского.

- *Правило положительного градиента тангенциального сопротивления.*

Поскольку между двумя поверхностями всегда возникает "схватывание", для обеспечения внешнего трения процессы деформирования и повреждения контактирующих неровностей должны быть сосредоточены как можно ближе к поверхности твердого тела. В связи с этим обязательным условием внешнего трения является формирование на поверхности твердого тела тонкой пленки, менее прочной, чем глубже лежащие слои. Измененный тонкий поверхностный называли еще в 1939 г. "третьим телом". Изменение знака градиента приводит к "задиру" – повреждению поверхностей трения.

- *Формирование на поверхности трения шероховатости.*

Внешнее трение невозможно для идеально гладких однородных поверхностей, так как в этом случае не будет взаимодействия с окружающей средой, необходимой для формирования третьего тела. Оно также невозможно для очень шероховатых тел, так как вместо трения будет зацепление (реечный эффект), поэтому шероховатость должна иметь некоторое промежуточное значение.

Принято различать (классификация И. В. Крагельского) пять фрикционных связей, которые исчерпывают все случаи взаимодействия поверхностей.

При 1-й связи в процессе внедрения неровностей осуществляется *микрорезание*.

2-я фрикционная связь характеризует *пластическое оттеснение*, которое проявляется при малом значении сил адгезии, когда при данной степени пластической деформации еще не достигается схватывания.

3-я фрикционная связь относится к *упругому оттеснению*, т. е. на контактируемых поверхностях осуществляется взаимодействие в условиях упругой деформации.

При 4-й связи осуществляется *пластическая деформация и адгезионное взаимодействие в тонком поверхностном слое*, когда $d\tau/dh > 0$. Именно этот вид фрикционной связи известен как положительный градиент механических свойств, когда вышележащие слои менее прочны, чем нижележащие. Если трущиеся поверхности подчиняются указанному правилу, наблюдается наименьшая повреждаемость – износ и трение в узле. Это правило положено в основу выбора многих материалов трущихся пар.

В 5-й фрикционной связи осуществляется глубинное разрушение поверхностей в результате схватывания, когда $d\tau/dh < 0$.

Как правило, в процессе трения одновременно наблюдается несколько видов изнашивания. Тем не менее, в большинстве случаев проявляется ведущий вид изнашивания, ответственный за характер и размер износа.

В процессе изнашивания образуются единичные разрушения в малом объеме материала, который удаляется из зоны трения в виде частиц износа. Различают износ при трении без смазки, при граничной смазке и абразивное изнашивание. По характеру деформирования износ протекает при упругом контакте, пластическом и в условиях микрорезания.

Количественной относительной характеристикой износа является интенсивность изнашивания, которая определяется как отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходило изнашивание, или объему выполненной работы. Интенсивность линейного износа I_h определяется толщиной изношенного слоя, приходящейся на единицу пути трения

$$I_h = \Delta h / L_T, \quad (2.1)$$

или по изменению объема или массы истираемого тела:

$$I_h = \Delta V / L_T A_T; \quad (2.2)$$

$$I_h = \Delta M / \rho L_T A_T, \quad (2.3)$$

где ρ – плотность изнашиваемого материала; ΔV , ΔM – изменение объема и массы истираемого тела (абсолютный износ) A_T – площадь поверхности истираемого элемента.

При неизменном значении площади изнашивания, например на участке стационарного износа, целесообразно пользоваться интенсивностью износа по массе

$$L_M = \Delta M L_T, \quad (2.4)$$

или по объему

$$I_V = \Delta V L_T. \quad (2.5)$$

Интенсивность линейного, объемного и массового износов находится между собой в следующей зависимости:

$$I_h = \Delta V / A_T = \Delta M / \rho A_T . \quad (2.6)$$

Интенсивность изнашивания и абсолютный износ изменяются от времени работы трущихся деталей или пути трения. Скорость изнашивания определяют графическим дифференцированием как тангенс угла наклона касательной, проведенной в точке графика соответствующей времени T . В технике часто применяют термин "износостойкость", являющийся величиной, обратной скорости износа. Износостойкость характеризует способность трущихся поверхностей сопротивляться изнашиванию. Процесс износа обычно происходит в три стадии.

Типичная характеристика износа во времени представлена на рис. 14. На первой стадии осуществляется приработка, занимающая небольшой отрезок времени, при этом наблюдается нестационарный режим износа с высокой, но постепенно убывающей скоростью изнашивания. Вторая стадия является самой продолжительной, происходит стабилизация процесса изнашивания, скорость изнашивания небольшая и примерно одинаковая. Этот участок характеризует нормальную работу узла после приработки. Постепенное изменение размеров трущихся деталей может привести к ухудшению условий эксплуатации, в результате чего скорость изнашивания возрастет и может наступить катастрофический износ, характеризующийся третьей стадией износа.

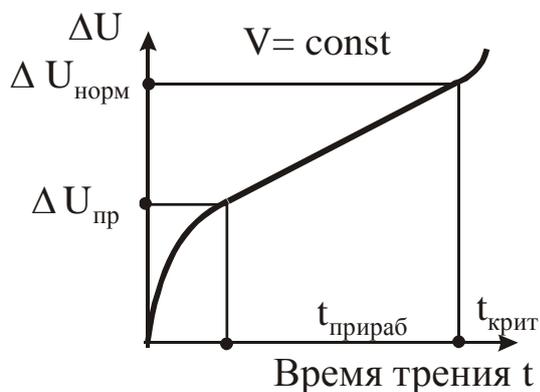


Рис. 14

К усталостному изнашиванию относят случаи, когда при работе узлов трения отсутствуют аномальные повреждения (схватывания, задиры, микрорезание, прижоги поверхностей и т.п.), трение протекает в нормальных условиях, имеется смазка, но вследствие трения материал поверхностного слоя "устает" и начинает отделяться в виде частиц износа. Здесь проводится аналогия с понятием "усталостная прочность".

Различают усталостное изнашивание двух видов: многоцикловое и малоцикловое. Многоцикловое изнашивание возникает при упругом контактировании.

При малоцикловом изнашивании совместное действие нормальной и касательной нагрузок при трении приводит к тому, что максимальное касательное напряжение возникает не на поверхности, а под пятном контакта на небольшой глубине, где накапливаются повреждения и образуются трещины. Особым проявлением многоциклового изнашивания

является так называемый питтинг (англ. pit – углубление), возникающий на дорожках качения подшипников при пульсации нагрузки.

Абразивные частицы производят на поверхностях трения разрушительное действие в двух основных формах. Острые абразивные частицы царапают, совершают хаотический процесс микрорезания, что наблюдается, например, при работе почвообрабатывающих или горных машин. Второй характерный механизм изнашивания – деформационное действие "тупых" абразивных частиц, которые не царапают, а выдавливают лунки или бороздки и вызывают при многократном повторении локальные усталостные разрушения.

При отсутствии абразивных частиц в струях жидкостей или газов наблюдается эрозионный износ. К данной разновидности изнашивания близок кавитационный износ. Кавитационный износ возникает, когда жидкость обтекает края препятствий, например лопаток насосов, турбин. На краях препятствий резко изменяется скорость течения, образуются разрывы в кавитационные образования, заполненные паром, которые, захлопываясь, создают ударные волны. Многократное ударное воздействие расшатывает кристаллы металлической поверхности, которые через некоторое время выкрашиваются.

Агрессивной формой окислительного износа является фреттинг-коррозия (англ. Fret – разъедать). Фреттинг-коррозия обычно наблюдается в номинально неподвижных соединениях, подверженных вибрации.

При фреттинг-коррозии циклические микроперемещения в контакте вызывают локальные тепловые флуктуации, многократное пластическое деформирование, интенсивное накопление дефектов структуры, образование микро- и макротрещин, по которым в глубину от поверхностей диффундирует кислород и другие активные компоненты среды. Отделившиеся частицы абразивно воздействуют на поверхность. Характерные объекты подобного изнашивания – лопатки различных турбин, резьбовые соединения и другие детали машин, работающие в динамически напряженных условиях.

2.2. Факторы, влияющие на изнашивание поверхности деталей машин

В процессе изнашивания значение имеет состояние поверхностей деталей, определяемое качеством их механической и термической обработки, твердостью, наличием смазочных материалов, окислов и пленок и другими факторами. Существенное влияние оказывает абсолютная величина нагрузки, воспринимаемая или передаваемая узлом или деталью. В условиях высоких скоростей движения одной детали относительно другой, больших удельных нагрузок, недостаточности смазочного материала изнашивание поверхностей трения происходит

более интенсивно.

При высоком качестве механической обработки, оцениваемой чистотой поверхности и остаточными напряжениями в поверхностных слоях деталей, менее интенсивно протекает изнашивание, особенно в начальные периоды использования машин. Приработка деталей с относительно высоким классом чистоты поверхностей трения сопровождается незначительным образованием продуктов изнашивания, умеренным повышением температуры и заканчивается в течение короткого времени. Но не для всех сопряжений необходимо иметь детали, поверхности трения которых обработаны по очень высокому классу чистоты.

Для конкретных условий работы деталей наиболее оптимальной считается определенная шероховатость поверхностей трения, снижение которой приводит к изменению характера и интенсивности изнашивания. Поэтому сначала может быть повышенная интенсивность изнашивания деталей, обработанных по требованиям высокой чистоты поверхностей, с постепенным понижением интенсивности до величины, соответствующей оптимальной шероховатости поверхности. В этой связи не следует обрабатывать детали по необоснованно высокому классу чистоты, приводящему к повышению затрат на изготовление и не оказывающему существенного влияния на уменьшение интенсивности изнашивания.

2.3. Предельные износы и долговечность деталей машин

Изнашивание деталей машин приводит к изменению их геометрических размеров или накоплению усталостных повреждений. В сопряжениях деталей увеличиваются зазоры, вызывающие ухудшение работы отдельных узлов и агрегатов или машины в целом. По мере роста износа работа машины становится менее надежной, снижаются технико-экономические показатели ее использования. В одних случаях повышение износа сверх определенного значения вызывает существенное понижение прочности или жесткости деталей, в других обуславливает появление недопустимых динамических нагрузок.

К серьезным последствиям могут привести большие износы деталей крановых механизмов, обеспечивающих подъем груза или изменение вылета стрелы. Снижение прочности деталей этих механизмов в результате изнашивания ни в коем случае не должно приводить к падению груза или стрелы, а также к любым нарушениям условий безопасности труда обслуживающего персонала. Учитывая серьезность последствий из-за недостаточной прочности изношенных деталей крановых механизмов предельные износы зубчатых колес и шестерен в механизмах подъема груза и изменения вылета стрелы,

грузовых канатов, крюков особо регламентируются "Правилами устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов" Ростехнадзора РФ. Предельный износ крюка в зеве не должен превышать 10 % первоначальной высоты сечения.

Для большинства зубчатых колес и шестерен в механизмах подъема груза и изменения вылета стрелы кранов уменьшение толщины зуба на диаметре делительной окружности не должно превышать 10 %, а для других механизмов кранов предельные износы зубьев допускаются до 20 – 25 % первоначального значения.

Под предельным износом понимают такие значения, которые соответствуют предельному состоянию изнашивающей машины или ее составных частей. Условно можно считать, что при увеличении износа детали сверх предельного характер процесса изнашивания изменяется и становится форсированным.

Нарушение нормального функционирования отдельных деталей погрузочно-разгрузочных машин приводит к неодинаковым последствиям. Обрыв грузоподъемного каната козлового или стрелового крана по характеру и серьезности последствия не может сравниться с разрушением реборды колеса, например, механизма передвижения козлового крана. Поэтому при установлении предельных износов необходимо руководствоваться различными соображениями.

При назначении предельных износов большинства деталей погрузочно-разгрузочных машин следует принимать во внимание один из следующих критериев: безопасности труда, технический, экономический. Предельный износ деталей, удовлетворяющий требованиям обеспечения безопасной эксплуатации машин, выбирается с таким расчетом, чтобы его превышение не приводило к нарушению условий безопасности труда, т. е. предусматривается запас прочности в зависимости от ответственности деталей.

Независимо от значения запаса прочности эксплуатация машин с износом деталей, превышающим установленные предельные значения, должна быть исключена. При обосновании предельных износов по показателю безопасности труда каждая ответственная деталь погрузочно-разгрузочной машины должна быть проверена по условиям прочности исходя из того, что при достижении предельного износа необходимо обеспечивать нормальную работоспособность машины при номинальных режимах нагружения. Если расчетное значение предельного износа окажется ниже значения, установленного по другим соображениям, то за норму принимается это расчетное значение.

Техническими критериями при выборе предельных значений износов руководствуются в тех случаях, если срок службы деталей ограничивается наступлением форсированного их изнашивания. На основе технического критерия устанавливают допустимые износы подшипников скольжения,

деталей редукторов, используемых в механизме передвижения крана и др. Ограничение службы деталей в этом случае производится вследствие изменения характера изнашивания или нарушения нормального функционирования узла или агрегата.

Согласно гидродинамической теории смазки жидкостное трение возникает в подшипниках скольжения только при строго определенном зазоре между вкладышем и валом. Значительное изменение зазора приводит к нарушению работы сопряжения. Для создания масляного клина, кроме нормального зазора, необходимо обеспечить соответствующую скорость вращения вала. Отклонение числа оборотов вала от определенного значения и изменение износа нарушают условия создания масляного клина, способствуя развитию естественного процесса изнашивания.

По мере роста зазора в сопряжении и достижения предельного износа процесс изнашивания становится форсированным. Этим моментом ограничивается срок службы сопряжения.

Экономический критерий оценки предельного износа примеряется для определения степени износа узлов или агрегатов, снижающего эффективность использования машины в целом. В результате изнашивания деталей машины ухудшаются ее экономические показатели до таких значений, ниже которых дальнейшая эксплуатация нецелесообразна. Ограничение времени использования машин с учетом понижения её эффективности служит основанием для установления предельных износов.

При работе двигателя внутреннего сгорания в результате износа деталей снижается эффективная мощность, увеличивается расход топлива и смазочного материала, падает производительность машины, повышаются эксплуатационные расходы. Возникает необходимость выбора такого срока службы двигателя, когда замена или ремонт его деталей были бы оправданными. Оценка времени работы двигателя проводится по экономическому критерию при сопоставлении затрат на дальнейшую эксплуатацию и выполнение ремонта.

Обосновывать предельно допустимые износы одних и тех же деталей можно с использованием нескольких критериев. В этом случае окончательное решение принимают с учетом показателя, согласно которому предельный износ имеет меньшее числовое значение. Независимо от характера ограничения срока службы деталей предельный износ лимитируется фактором, оказывающим влияние первым по сравнению с другими факторами.

Оптимальная долговечность машины – это экономически обоснованный срок её эксплуатации до капитального ремонта или списания. Срок дальнейшей эксплуатации ограничен факторами:

- техническим состоянием;

- с экономической позиции;
- с позиции безопасности.

Оптимальное значение наработки (часов) до капитального ремонта или списания определяют формулой:

$$T_0 = \alpha^{+1} \sqrt{\frac{(\alpha + 1)C_a Z}{\alpha \omega}},$$

где C_a – себестоимость машины;

Z – коэффициент перехода от себестоимости машины к стоимости её приобретения;

ω – эмпирическая величина, зависящая от условий эксплуатации, уровня безотказности и ремонтпригодности машины.

При определении оптимальной долговечности машины следует учесть её моральный износ. Это явление обусловлено техническим прогрессом.

3. СМАЗКА

Согласно действующим государственным стандартам различают трение без смазочного материала и трение со смазочным материалом. Первый вид трения наблюдается при эксплуатации тормозных систем, фрикционных соединительных муфт и других устройств, передающих или гасящих крутящий момент с использованием сил внешнего трения. Вторым видом трения встречается в подшипниках скольжения, имеющих номинальный радиальный зазор при определенной скорости вращения вала. Слой смазочного материала за счет гидродинамических свойств воспринимает радиальную нагрузку от вала и поддерживает его без соприкосновений с поверхностью вкладыша.

3.1. Влияние смазки на поверхностное изнашивание

При трении со смазочным материалом создаются наиболее благоприятные условия для повышения срока службы деталей в сопряжениях машин. Изнашивание деталей протекает относительно равномерно с низкими скоростями. Достигать такого положения можно только в результате своевременного проведения смазочных операций. Влияние смазки на долговечность работы детали показано на рис. 15.

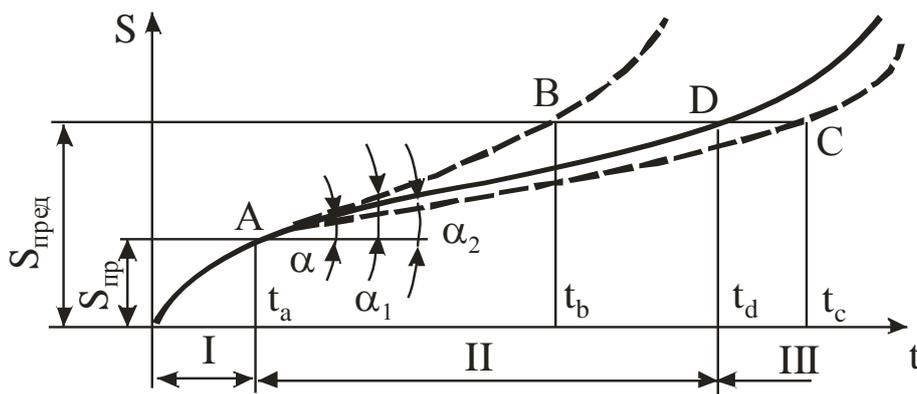


Рис. 15

После окончания приработки деталей за точкой *A* начинается участок II, соответствующий нормальному периоду эксплуатации. Если работа сопряжения происходит в средних условиях смазки, то интенсивность изнашивания равна $tg\alpha$. Период форсированного изнашивания начинается в точке *D* по истечении времени t_d . Если условия смазки неудовлетворительны, то изнашивание протекает с повышенной скоростью: $tg\alpha_1 > tg\alpha$. Нормальный период работы сопряжения сокращается на $(t_d - t_b)$. С улучшением условий смазки сопряжения скорость изнашивания деталей уменьшается: $tg\alpha_1 < tg\alpha$, а срок службы достигает максимального значения t_c . Форсированный характер процесс изнашивания приобретает после точки *C*, соответствующей окончанию срока службы деталей при наиболее благоприятных условиях смазки. Период работы деталей сопряжения в результате удлиняется в сравнении со средним значением на $(t_c - t_d)$. Условно можно считать, что участку нормального периода эксплуатации при правильном режиме смазки соответствует жидкостное трение. Ухудшение смазки приводит к нарушению условий жидкостного трения, в результате чего наблюдаются повышенное изнашивание и сокращение сроков службы деталей.

3.2. Макромеханизм жидкостного трения

Между металлическими поверхностями элементов трибосистем могут образовываться прочные соединения. Их разрыв осуществляется разными способами: в плоскости соединения, вырыванием более прочного металла, а также отрывом менее прочного металла и прилипанием его к более прочному металлу. При любой форме взаимодействия сопряженные поверхности подвержены процессу изнашивания, который обычно проходит три стадии: приработка, с высокой, но постепенно убывающей скоростью износа; установившийся износ – скорость изнашивания небольшая и примерно одинаковая; катастрофический износ. Смазочный материал является сильным препятствием изнашиванию поверхностей трущихся деталей. В соответствии со стандартной терминологией,

жидкостная (гидродинамическая) смазка возникает при полном разделении поверхностей трения, осуществляемом в результате давления, возникающего в слое смазочного материала при относительном перемещении трущихся поверхностей. В слое смазочного материала возникает внутреннее трение, определяемое, в основном, вязкостью этого материала.

Согласно теории гидродинамической смазки, основателем которой считают Н.П. Петрова, для получения жидкостного трения необходимо наличие условий: зазор между скользящими поверхностями должен иметь клиновидную форму; смазочный материал должен заполнять зазор и непрерывно поступать в требуемом количестве; скорость относительного перемещения одной из поверхностей должна быть такой, чтобы в масляном слое создавалось внутреннее давление за счет заклинивания смазочного материала; смазочный материал должен полностью разделять контактирующие поверхности. Вязкую жидкость, текущую по твердой поверхности, можно представить состоящей из тонких слоев. Тогда, при простом сдвиге, геометрические точки движутся по параллельным прямым, не испытывая вращения.

Если рассматривать элементарные объемы жидкости, то, кроме поступательного движения, они еще и вращаются относительно их первоначального положения, образуя вихри. Свойства жидкости таковы, что ее течение невозможно без вращения элементарных объемов.

М. Рейнер приводит пример из повседневной жизни, когда разливают чай из чайника: струя имеет тенденцию течь не по баллистической кривой, а течет либо по нижней части носика чайника, либо по "антибаллистической" кривой. Это не является следствием "прилипания" жидкости, потому что, когда носик чайника покрыт слоем водоотталкивающего материала, характер течения струи не меняется. М. Рейнер назвал такое явление "teapot-эффектом" (1956 г): вращение элементарных объемов текучей жидкости не математическая абстракция, а физическая реальность.

Вследствие кинетической энергии вращения вихрей появляются силы воздействия объемов жидкости на твердую поверхность. Завихрения образуются не только в случае простого сдвига, но и при обтекании жидкостью различных неровностей, причем завихрения жидкости способствуют обтеканию неровностей.

Во впадинах микронеровностей движение жидкости пульсирующее, вихревое, оно периодически изменяет свои параметры. Для образования вихрей в потоке жидкости необходимо наличие градиента скоростей, который характеризуется интенсивностью энергообмена во взаимодействующих средах.

Размеры вихрей определяются величиной градиента, свойствами и параметрами среды и условиями их возникновения: свободная среда или

ограниченная твердой поверхностью.

По мере уменьшения толщины пограничного слоя, что имеет место при увеличении скорости потока, обтекающего твердую поверхность, наибольшие возможные размеры вихрей сокращаются и в пределе оказываются равными размерам впадин неровной поверхности. Это может относиться как к макро-, так и к микронеровностям.

Силовое воздействие движущейся жидкости на поверхность определяется характером и параметрами движения во впадинах. Эрозионное разрушение материала происходит именно в результате взаимодействия с ним вихревых объемов, возникающих у поверхности. Жидкость во впадине приходит во вращательное движение, а внешние вихри, срываясь с вершин бугорков, проникают во впадину, увеличивая количество находящейся там жидкости, что в определенный момент нарушает состояние ее равновесия с внешним потоком. В результате происходит выброс избытка масс.

Около неровностей неоптимальной формы при движении основного вихря образуются вторичные вихри. Они, взаимодействуя с потоком, сглаживают неровности. В процессе эрозионного разрушения бугорки шероховатой поверхности приобретают оптимальную форму – округлую, которой соответствуют меньшие потери энергии. Вихревое движение происходит даже вблизи кавитационных пузырьков. Когда течение воздушных пузырьков в воде происходит при частоте, близкой к резонансной, потоки могут достигать скорости до 50 м/с.

Основываясь на приведенных материалах, в 1995-м году ***была выдвинута гипотеза о том, что теория гидродинамической подъемной силы масляных клиньев требует дальнейшего анализа и развития, что в процессе жидкостного трения из смазочного материала путем завихрения образуются микросферы, упругие свойства которых и создают значительный положительный эффект (автор гипотезы – Титенок А.В.).*** В развитие этой гипотезы получено несколько патентов на изобретения и с использованием теории показан потенциальный положительный эффект.

В смазочном материале постоянно в определенном для конкретных условий количестве содержатся частицы износа. Они делают смазочный материал более вязким. На вязкость жидкости влияют форма, размер и масса частиц, их концентрация; термодинамические условия, в которых работает система; наличие электростатических, магнитных или других полей. Различают три области зависимости вязкости от концентрации частиц.

Область собственной вязкости – очень разбавленные жидкости, в которых вязкость аддитивна, суммируется из вкладов каждой суспензированной частицы. В разбавленных суспензиях рассматривают нелинейную зависимость вязкости от концентрации частиц. Эта зависимость

обусловлена гидродинамическим взаимодействием между частицами, которое приводит к существованию критической концентрации. При концентрациях, меньших критической, суспендированные частицы кинетически независимы.

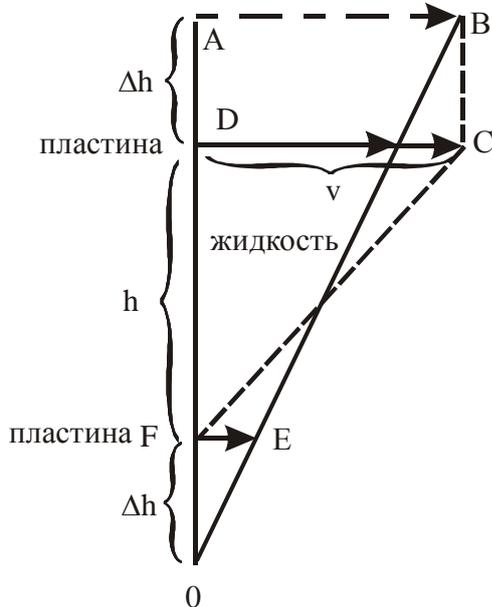
Взаимодействие между частицами резко увеличивается при больших концентрациях и приобретает первостепенное значение. Вязкость суспензии несферических частиц зависит от их ориентации относительно направления скорости течения жидкости. Она обусловлена вращением частиц по направлению течения, наличием барьеров, препятствующих свободному вращению. Удлиненные частицы образуют центры турбулентности.

Гидродинамическое взаимодействие удлиненных частиц гораздо сильнее, чем у частиц, имеющих форму сферы, оно возрастает по мере отклонения от шарообразной формы.

Впервые теория вязкости очень разбавленной жидкости, содержащей частицы в виде жестких сфер, была разработана А. Эйнштейном. Согласно теории, относительная вязкость жидкости зависит от объемной концентрации в ней сферических частиц. В дальнейшем теория была обобщена на случаи, в которых учтено влияние стенок, где сферы не являются жесткими, где возникает скольжение жидкости вдоль поверхностей сфер и увеличение концентрации сфер [2].

3.3. Вязкость

Течение жидкости может быть либо турбулентным, либо ламинарным. Изначально предполагали, что скольжение жидкости по поверхности тела не зависит от поверхностной характеристики тела. Кулон первым поставил этот тезис под сомнение, наблюдая за постепенным затуханием колебаний горизонтального диска, подвешенного на нити и помещенного в жидкости. Кулон доказал, что при незначительной шероховатости поверхностей, в сравнении с расстоянием между ними, затухание носит элементарный характер, так как эти параметры несопоставимы. На эффект затухания влияет также состояние



поверхностей, например смачиваемые они или несмачиваемые жидкостью. Пусть между пластиной и несмачивающей ее жидкостью появляется скольжение. Тогда скорость частиц жидкости, прилегающей к пластине будет меньше скорости жидкости. Уменьшение градиента скорости будет тем больше, чем сильнее скольжение.

Определим это скольжение из рис. 16, продолжив прямолинейный профиль

скоростей $DC b FE$ вверх и вниз до достижения скоростей соответственно V_{AB} (вверху) и V_0 (внизу). Расстояния Δh вверху и внизу характеризуют влияние скольжения. Уменьшение из-за скольжения градиента скоростей в зазоре между пластинами, следовательно, и силы трения, будет равно $(h/(h+2\Delta h))$. Если h много больше Δh , то влияние скольжения будет незаметным.

Опыты показали, что в жидкостях, даже не смачивающих пластинку, например, в случае ртути и стекла и при Δh меньше микрона, скольжение будет оказывать влияние только при трении жидкости в капиллярах.

Д. М. Толстой определил, что большее по величине скольжение может наблюдаться между твердой стенкой и консистентными смазками, по своим свойствам занимающими положение, промежуточное между жидкостями и твердыми телами.

Гаген (Hagen, 1839 г.) первым исследовал законы ламинарного течения в трубе и сделал очень интересное предположение, состоящее в том, что распределение скоростей по толщине капилляра представлено треугольной эпюрой с вершиной по оси капилляра (рис. 17,а – неверное; рис. 17,б – верное), в отличие от треугольного распределения, еще много лет предполагаемое некоторыми учеными, например, Фройндлихом и Шалеком (Freundlich, Schalek – 1924 г.).

Для правильного определения распределения скорости исходят из определения градиента скорости – неизвестной функции от радиуса r . Оказалось, что распределение скорости параболическое (рис. 17,б). Наибольшая скорость – на оси (при $r = 0$). Она определяется по формуле:

$$V_0 = (\Delta p R^2) / (4l\eta), \quad (3.1)$$

где Δp – перепад давления, отнесенный к единице площади; l , R – длина и радиус цилиндра; η – коэффициент пропорциональности.

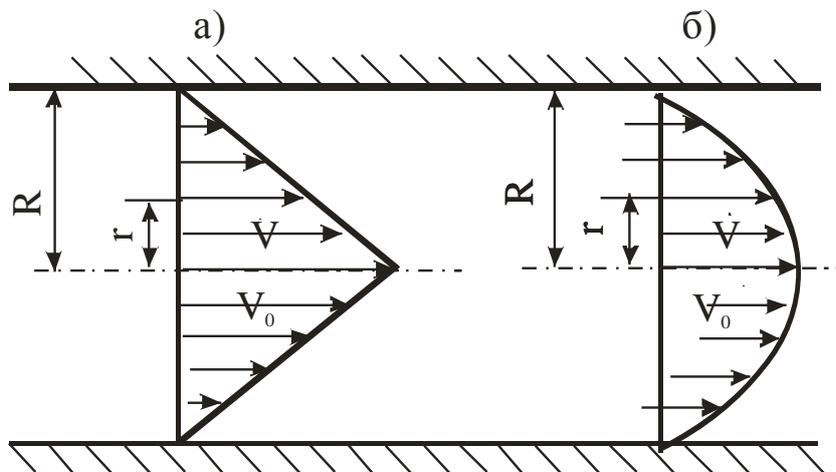


Рис. 17

Рассмотрим относительное перемещение двух параллельных

пластин. Пусть сила трения F_{mp} пропорциональна градиенту скорости (dv/dz) жидкости в зазоре между пластинами и равномерно распределена по всем участкам поверхности каждой пластины, т.е., действует на любой участок пропорционально его площади с коэффициентом пропорциональности η :

$$F_{mp} = \eta A (dv/dz). \quad (3.2)$$

Это закон жидкостного трения.

Коэффициент η зависит от природы жидкой среды и от температуры. Его называют коэффициентом внутреннего трения (вязкостью жидкости).

- *Вязкость – это тангенциальная сила, приложенная к единице поверхности сдвигаемого слоя:*

$$\eta = (F_{mp}/A)(dv/dz) \quad (3.3)$$

– *физический смысл вязкости.*

Определенная в таком опыте вязкость называется *динамической вязкостью*. В СИ она имеет размерность – масса×длина×время⁻¹ (Н·с/м², или Па·с) и в таком виде используется при расчете подшипников. Динамическая вязкость распространенных смазочных масел соотносится с вязкостью в единицах СГС в диапазоне 2...400 сПз (сантипуаз). (Пуаз – название в честь фр. ученого Пуазейля). На практике удобно использовать понятие *кинематической вязкости*

$$\nu = \eta/\rho, \quad (3.4)$$

где ρ – плотность смазочного материала. В СИ кинематическая вязкость, как и температуропроводность, измеряется в м²/с. В СГС она измеряется в стоксах (англ. ученый Стокс) – 1Ст = 1 см²/с. 1сСт – это кинематическая вязкость воды при комнатной температуре.

3.4. Измерение вязкости

В лабораторной практике закон Пуазейля дает наиболее простой и точный способ измерения коэффициента внутреннего трения жидкостей. Почти все определения динамической вязкости в лабораторных условиях можно выполнить с применением приборов, в которых исследуемая жидкость течет по капиллярам определенного сечения. Используют формулу:

$$Q = (\pi r^2 \Delta p) / (8l\eta), \quad (3.5)$$

где Q – расход жидкости, т.е., ее объем, протекающий в единицу времени; r , l – радиус и длина капилляра; Δp – перепад давлений на его концах; η – вязкость жидкости.

Схема одного из таких приборов – капиллярного вискозиметра представлена на рис. 18. Это двухколенная трубка с двумя расположенными в обоих коленах на разных уровнях расширениями в виде одинакового размера шариков *A* и *B*. Выше и ниже верхнего шарика *A* имеются сужения – в местах *a* и *b*. В левом колене под шариком *A* впаян капилляр. Исследуемая жидкость засасывается в вискозиметр так, что занимает заштрихованный объем.

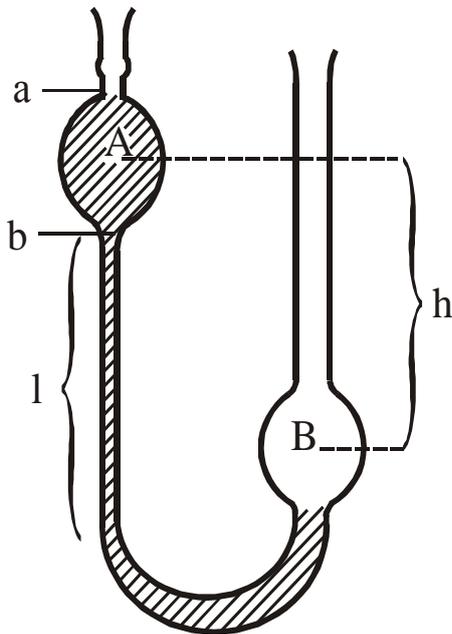


Рис. 18

Отключая засасывающее приспособление, наблюдают течение жидкости под влиянием собственного веса, стремящегося сравнять уровни жидкости в обоих коленах сосуда. При этом замечают время *t*, затрачиваемое мениском жидкости, в левом колене для того, чтобы спуститься от сужения *a* до *b*. Зная емкость вискозиметра между сужениями *a* и *b* и для ее на время истечения *t*, находят объемную скорость

истечения *Q*.

Перепад давления Δp , под действием которого происходит течение жидкости, вычисляется по разности уровня жидкости в обоих коленах вискозиметра. Если длина *l* и радиус *r* капилляра известны, то при помощи формулы (3.4) легко рассчитать вязкость жидкости. Трудно подобрать капилляр так, чтобы сечение его по всей длине было строго одинаково; кроме того, часть сопротивления движению жидкости зависит от трубок, присоединенных к капилляру. Все это затрудняет непосредственное определение вязкости по формуле (3.5). Если в приборе этого типа измерена при определенной температуре вязкость жидкости, например воды, то определение вязкости других жидкостей можно вести в любом капиллярном вискозиметре, пренебрегая этими трудностями, следующим образом. Заменяя в уравнении (3.5) *Q* через *V/t*, можно после простых преобразований получить уравнение

$$\eta = \pi r^4 \Delta p t / (8 l V), \quad (3.6)$$

Из этого уравнения следует, что произведение перепада давления Δp , под которым происходит течение жидкости, на время истечения *t* будет для прибора данных размеров пропорционально вязкости жидкости. Таким образом, можно эту формулу переписать так:

$$\eta = C \Delta p t, \quad (3.7)$$

где $C = \eta_e / (\Delta p t) = \text{const}$ для данного прибора, не зависящая от природы

жидкости (η_6 – вязкость воды).

Если произвести опыт с водой, вязкость которой была ранее измерена с большой точностью и определить постоянную C , то прибор проградуирован, и им можно пользоваться для определения вязкости любой другой жидкости. Если надо измерить вязкость жидкости при разных температурах, то такой капиллярный вискозиметр погружают в сосуд с водой, в котором температура может меняться и поддерживаться на любом требуемом уровне. Таким способом было произведено измерение вязкости большого числа химических соединений при различных температурах. Основным результатом, который при этом следует отметить, это то, что вязкость всех без исключения жидкостей с повышением температуры убывает, в особенности быстро убывает вязкость с температурой для очень вязких жидкостей, к которым принадлежат смазочные масла.

Известно много современных методов измерения кинематической вязкости жидкостей, например, у смазочных материалов ее определяют по ГОСТ 33-2000 (ИСО 3104-94). Этот стандарт предполагает метод определения кинематической вязкости, заключающийся в измерении времени истечения определенного объема жидкости под действием силы тяжести через калиброванный стеклянный капиллярный вискозиметр. Для вискозиметров используют стекла с малым коэффициентом температурного расширения. Результаты определения кинематической вязкости применимы к ньютоновским жидкостям, для которых напряжение сдвига пропорционально скорости деформации, а вязкость не зависит от касательного напряжения и градиента скорости. Капиллярные вискозиметры выпускают нескольких типов для различных диапазонов вязкости масла.

На рис. 19 показан прибор для определения кинематической вязкости смазочного материала (масла) с вискозиметром Пинкевича (1 – термометр; 2 – мешалка; 3,4 – колена; 5 – отводная трубка; 6 – расширение; 7 – резиновая груша; 8 – электронагреватель; 9 – капилляр вискозиметра; 10 – термостатирующая жидкость; M_1, M_2 – метки).

Вязкость определяют следующим образом. На отводную трубку 5 вискозиметра надевают резиновую трубку. Затем, зажав пальцем колено 4 и перевернув вискозиметр, погружают колено 3 в смазочный материал и засасывают его до метки M_2 при помощи резиновой груши. Когда уровень смазочного материала достигнет метки M_2 , вискозиметр вынимают и переворачивают.

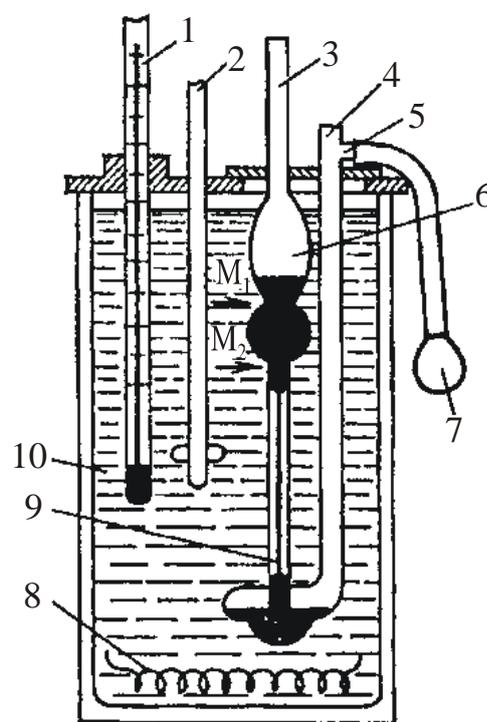


Рис. 19

Снимают с конца колена 3 избыток смазочного материала. Затем на этот конец надевают резиновую трубку и устанавливают вискозиметр в термостат так, чтобы расширение находилось ниже уровня термостатирующей жидкости. Засасывают нефтепродукт в колено 3 примерно на 1/3 высоты расширения б. Сообщив колено 3 с атмосферой, измеряют время перемещения мениска нефтепродукта от метки M_1 до метки M_2 . Рассчитывают кинематическую вязкость ν ($\text{мм}^2/\text{с}$) испытуемого смазочного материала по формуле

$$\nu = C t , \quad (3.8)$$

где C – калибровочная постоянная вискозиметра, $\text{мм}^2/\text{с}^2$ (сСт/с);

t – среднее арифметическое значение времени истечения, с.

3.5. Виды смазки

В практике эксплуатации различных машин может встречаться несколько видов смазки, обеспечивающих понижение интенсивности изнашивания их деталей. При этом под смазкой понимают действие смазочного материала, в результате которого между двумя поверхностями уменьшается сила трения и интенсивность изнашивания. Различают следующие основные виды смазки:

- газодинамическую и газостатическую, гидродинамическую и гидростатическую, упруго-гидродинамическую, граничную и полужидкостную – по виду разделения поверхностей смазочным слоем;
- газовую, жидкостную, твердую – по физическому состоянию смазочного материала.

Газовой называют смазку, при которой разделение поверхностей трения деталей осуществляется газовым смазочным материалом. Смазка этого вида для сопряжений дорожно-строительных и подъемно-транспортных машин не характерна.

При наличии между деталями жидкостной смазки имеет место полное разделение поверхностей трения, осуществляемое жидким смазочным материалом. Жидкостную смазку используют для некоторых типов опор скольжения, подшипников и редукторов дорожно-строительных и грузоподъемных машин. Сила трения в условиях жидкостной смазки определяется формулой

$$F_{mp.} = \eta A v / h , \quad (3.9)$$

где η – динамическая вязкость смазочного материала; A – номинальная площадь трущихся поверхностей; v – скорость относительного перемещения поверхностей; h – толщина слоя смазочного материала.

Если разделение поверхностей трения деталей выполняется твердым

смазочным материалом, то такую смазку поверхностей деталей машин считают твердой. Такая смазка нашла ограниченное применение в сопряжениях дорожно-строительных и грузоподъемных машин, она является перспективной.

Гидростатической называют жидкостную смазку, при которой разделение поверхностей трения деталей, находящихся в относительном движении или покое, осуществляется в результате поступления жидкости в зазор между поверхностями трения под внешним давлением. Для этой смазки необходимы сложные системы подачи смазочного материала. Для дорожно-строительных и грузоподъемных машин ее применяют редко.

Гидродинамическая смазка – это жидкостная смазка, при которой полное разделение поверхностей трения осуществляется в результате давления, самопроизвольно возникающего в слое жидкости при относительном движении поверхностей.

Упругогидродинамическая смазка – это смазка, при которой характеристики трения и толщина пленки жидкого смазочного материала между двумя поверхностями, находящимися в относительном движении, обусловлены упругими свойствами материалов тел, а также реологическими свойствами смазочного материала. Реологические свойства определяют характер течения и деформации смазочного материала, обладающего структурной вязкостью, и, таким образом, характеризуют процесс формирования смазочной пленки в зазоре.

Полужидкостной называют смазку, при которой частично осуществляется жидкостная смазка. Полужидкостная смазка занимает промежуточное положение между жидкостной и граничной смазкой.

Граничной называют смазку, при которой трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, обусловлены свойствами поверхностей и свойствами смазочного материала, отличными от объемных.

В сопряжениях при изменении режима работы (температуры, скорости или давления) происходит плавный переход от смазки одного вида к смазке другого вида.

Характер трения поверхностей деталей машин и вид их смазки определяются не только количеством смазочного материала и его вязкостью, но и режимом работы узла трения. В зависимости от скорости относительного перемещения рабочих поверхностей, нагрузки и соотношения этих величин в сопряжении может наблюдаться граничная полужидкостная или жидкостная смазка. Количественно режим работы сопряжения характеризует соотношение $\eta v / N$, (η – динамическая вязкость смазочного материала; N – нормальная нагрузка или давление).

Графической характеристикой трения рабочих поверхностей деталей в присутствии смазочного материала является так называемая диаграмма Герси–Штрибека, представляющая собой зависимость коэффициента трения f от параметра $\eta v / N$ – рис. 20. Максимальный коэффициент трения f_n соответствует нулевому значению параметра $\eta v / N$ при трении покоя. При сравнительно легких нагрузочном и скоростном режимах работы сопряжения на поверхностях трения деталей вследствие молекулярной адсорбции образуются и прочно удерживаются тончайшие слои смазочного материала. Толщина слоя смазочного материала в зоне трения настолько мала, что объемные реологические свойства масла как жидкости практически не проявляются. Таким образом, создаются условия, характерные для граничной смазки (рис. 20, зона I). Коэффициент трения в

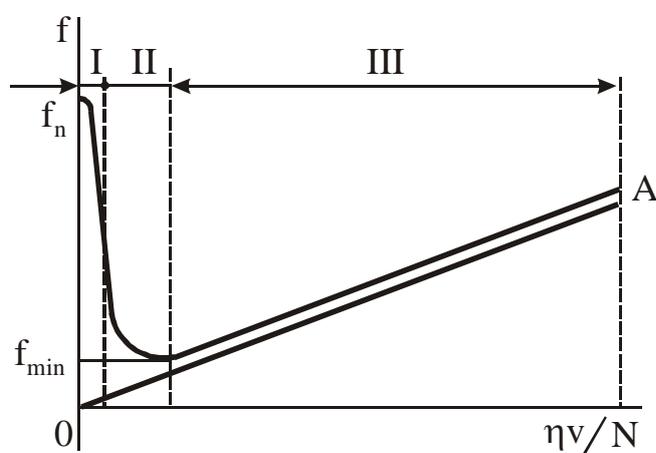


Рис. 20

условиях граничной смазки для металлических поверхностей приблизительно равен 0,1. Относительно высокий коэффициент трения объясняется наличием механического взаимодействия поверхностей. В таком режиме трения обычно работают опоры скольжения и некоторые элементы зубчатых передач.

При увеличении слоя смазочного материала, разделяющего поверхности трения, уменьшается механическое взаимодействие выступов неровностей. При этом снижается также молекулярная составляющая силы трения. В результате наблюдается значительное уменьшение коэффициента трения и создаются условия взаимодействия поверхностей, характерные для полужидкостной смазки. На диаграмме Герси–Штрибека эта область соответствует минимуму кривой (рис. 20, зона II). Полужидкостная смазка характерна для большинства зубчатых передач и подшипников качения.

В зоне III (рис. 20) твердые поверхности полностью разделены слоем смазочного материала, толщина которого значительно превышает высоту неровностей профиля. В этих условиях характер взаимодействия элементов сопряжения определяется объемными свойствами масла. Сопротивление относительно перемещению деталей сопряжения обусловлено внутренним трением смазочного материала. Коэффициент трения равен 0,01...0,05. Такие условия взаимодействия поверхностей характерны для жидкостной смазки и чаще всего встречаются в подшипниках скольжения, сопряжениях вал–втулка.

Жидкостная смазка обеспечивает устойчивый режим работы

сопряжения. Увеличение коэффициента трения приводит к повышению температуры масла. Это вызывает снижение вязкости и, следовательно, параметра $\eta\nu/N$. Если условия работы при этом соответствуют зоне III (рис. 20), то уменьшение параметра $\eta\nu/N$ вызовет уменьшение коэффициента трения. Таким образом, режим работы восстанавливается. Увеличение коэффициента трения в зонах I или II также влечет за собой уменьшение параметра $\eta\nu/N$, значение которого и без того невелико. Это вызывает дальнейшее увеличение f и ухудшение условий работы сопряжения. Таким образом, граничная (зона I) и полужидкостная (зона II) смазки не обеспечивают устойчивого режима трения. Для достижения максимальной долговечности сопряжения необходимо стремиться к формированию условий жидкостной смазки и ее разновидностей (гидродинамической и упруго-гидродинамической смазки), что позволит значительно сократить энергетические затраты на преодоление сил трения и обеспечит наиболее стабильные условия взаимодействия деталей. Для сопряжений дорожно-строительных и грузоподъемных машин наиболее характерны гидродинамическая, упруго-гидродинамическая, полужидкостная и граничная смазки.

3.5.1. Гидродинамическая смазка

Как было отмечено, гидродинамическая смазка – это разновидность жидкостной смазки, при которой полное разделение поверхностей трения достигается в результате давления, самопроизвольно возникающего в слое жидкости при относительном движении поверхностей. Особенность этой смазки – наличие смазочной пленки между трущимися поверхностями деталей машин. Гидродинамическое давление в ней появляется в результате сопротивления нормальной нагрузке. Рассмотрим этот процесс (рис. 21).

Если жидкость втекает в зазор между двумя поверхностями, одна из которых *A* неподвижна, то слой жидкости, непосредственно прилегающий к поверхности *A*, остается неподвижным, а прилегающий к поверхности *B* слой движется со скоростью v этой поверхности. Вследствие вязкости другие слои, занимающие промежуточное положение между двумя упомянутыми слоями, вовлекаются в движение.

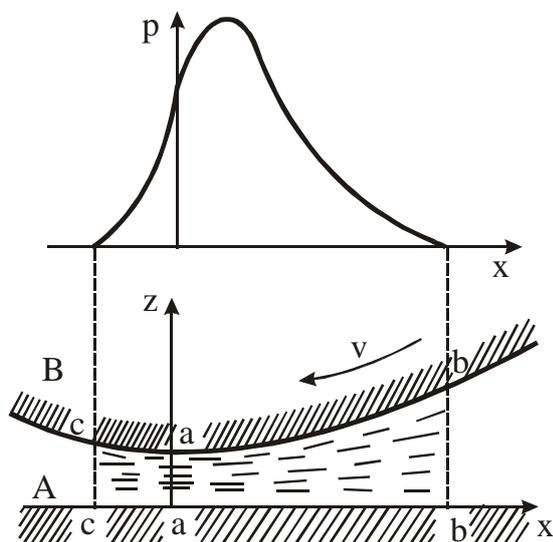


Рис. 21

Это обстоятельство (вязкость и сцепление жидкости с поверхностями твердых тел) является необходимым условием для возникновения гидродинамического давления, но это условие не является достаточным. Для возникновения давления необходим сужающийся зазор между поверхностями, обеспечивающий изменение градиента скорости dV/dz и, следовательно, градиента напряжения сдвига dr/dz по длине пленки. Градиент давления также изменяется по длине пленки. Так как на обоих концах смазочной пленки давление равно атмосферному, в некоторой точке оно должно достигать максимума. Таким образом, вначале давление должно расти от входа (положительный градиент давления) до достижения им максимума, а затем снижаться (отрицательный градиент). Возникающее вследствие гидродинамического действия давление стремится уравновесить внешнюю нагрузку. Этот эффект известен под названием расклинивающего действия пленки и физически связан с условием непрерывности. Чтобы проиллюстрировать этот эффект, рассмотрим стационарное течение в объеме *bbcc* на рис. 21. Количество жидкости, втекающей через сечение *bb*, должно быть равно количеству, вытекающему через сечение *cc*, чтобы сохранялся стационарный характер потока. Площади сечений *bb* и *cc* различны, а гидродинамическое давление должно возрастать, поэтому скорость потока остается постоянной. Давление затрудняет течение во входном сечении и облегчает его в выходном сечении.

Совершенно необязательно, чтобы зазор имел непрерывно изменяющийся профиль, как показано на рис. 21. Так, существует опора, называемая ступенькой Рэлея со скачкообразно изменяющимся профилем зазора. Интересно отметить, что Рэлей полагал ступенчатую форму зазора наилучшей по сравнению с другими конфигурациями. Если сопрягаемые поверхности параллельны, то гидродинамическое давление не может создаваться расклинивающим действием. Однако в двух случаях давление все же возникает.

Во-первых, когда жидкость, проходя через зазор, нагревается, например, за счет вязкого трения, и ее плотность снижается, а объемная скорость течения должна возрастать в силу действия условия непрерывности, которое требует, чтобы массовая скорость течения была постоянной. В результате в пленке развивается гидродинамическое давление. Этот эффект называется тепловым расклиниванием.

Второй случай возможен, когда одна из поверхностей движется по направлению ко второй. Жидкость сжимается и вытекает из зазора. Вязкость стремится воспрепятствовать выдавливанию жидкости, в результате чего создается гидродинамическое давление. Этот эффект известен как сжимающее действие пленки. В реальных узлах трения одновременно могут действовать как расклинивающий, так и сжимающий эффекты. Рассмотрим теперь, как общие закономерности, описанные выше, проявляются в опорном подшипнике. На рис. 22 показано всплывание цапфы во вкладыше при увеличении скорости вращения вала вращения. С увеличением числа оборотов режим трения в подшипнике скольжения, у которого зазор целиком заполнен маслом, изменяется. При вращении цапфа затягивает масло в клиновидный зазор: верхние слои – в силу адсорбции, последующие – под действием трения, обусловленного вязкостью.

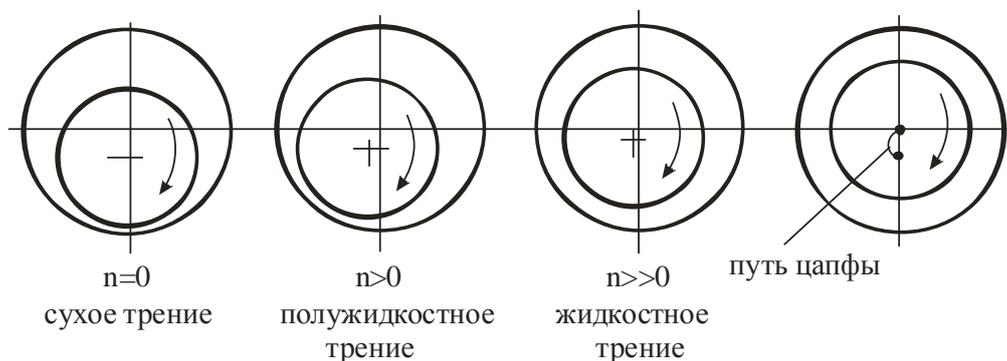


Рис. 22

Под влиянием развивающегося в зазоре гидродинамического давления смазки цапфа отделяется от вкладыша и смещается как вверх, так и в направлении вращения, при этом коэффициент трения снижается до $f = 0,05$. Конечно, прорывы масляной пленки гребешками неровностей здесь вполне вероятны. Если число оборотов значительно, то режим работы стабилизируется. Центр цапфы O_1 всплывает вверх, постепенно переставая смещаться в направлении вращения. Точки O и O_1 сближаются. При этом наступает режим чисто жидкостного трения и коэффициент трения постепенно снижается от 0,05 до 0,005 и ниже. При очень большой скорости вращения и незначительной постоянной по величине нагрузке на цапфу можно получить режим чисто гидродинамического равновесия вала в зазоре, заполненном маслом.

При этом точки O и O_i совпадают: коэффициент трения снижается до своего минимального значения, определяющегося вязкостью масла.

Однако такое положение цапфы неустойчиво, так как при идеальной соосности цапфы и вкладыша нарушается одно из основных условий возникновения несущей способности – масляный клин. Увеличение нагрузки мгновенно создает эксцентриситет цапфы в зазоре вкладыша и соответствующее повышение коэффициента трения f .

Теоретическая траектория центра шипа в отверстии вкладыша, как показал впервые проф. д.т.н. Е. М. Гутьяр (МИМЭСХ), представляет полуокружность, построенную на отрезке OO_1 ; как на диаметре (рис. 23, а – траектории центра шипа при увеличении числа оборотов вала по данным разных исследователей). Экспериментальные исследования обнаружили некоторые отступления от теоретической кривой, но в основном подтвердили правильность общей картины наблюдаемых явлений.

Характер изменения гидродинамического давления в смазочной пленке по окружности цапфы дан на рис. 23, б. Чтобы зазор между валом и вкладышем имел переменное сечение, вал должен быть расположен эксцентрично по отношению к вкладышу. Минимальная и максимальная толщины зазора расположены на прямой, проходящей через центры вала и вкладыша O и O' . Эта линия называется линией центров.

При вращении вала смазка сцепляется с его поверхностью и благодаря вязкости постоянно вовлекается в зазор, т. е. вал действует как насос, поддерживающий циркуляцию смазки. Как отмечено выше, гидродинамическое давление возникает в смазочной пленке за счет ее расклинивающего действия. Увлекаемая часть пленки, т. е. та ее часть, в которой возникает избыточное давление, расположена вблизи минимума зазора, сходящаяся часть которого длиннее, чем расходящаяся. В результате линия центров поворачивается по направлению вращения, так что вертикальные компоненты давления в пленке и сила трения, действующая на вал, уравнивают нагрузку на него, т.е. между линией центров и направлением приложения нагрузки существует некоторый угол давления.

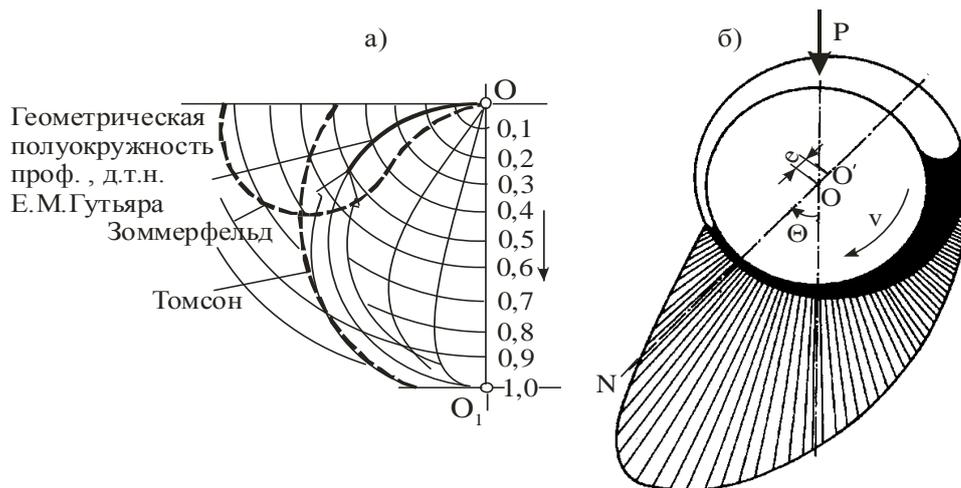


Рис. 23

Этот угол является функцией внешней нагрузки, скорости вращения, зазора, вязкости и т. д. Под действием только силы трения вал должен двигаться в противоположном направлении, как если бы он катился по поверхности вкладыша. Однако поворот линии центров в направлении вращения показывает, что гидродинамическое давление, являющееся косвенным следствием вязкости, оказывает большее влияние на вал, чем сила трения, являющаяся прямым следствием вязкости.

Вал лежит на смазочной подушке, когда равнодействующая гидродинамического давления становится равной внешней нагрузке. Эта равнодействующая называется нагрузочной способностью. Очевидно, что чем выше вязкость и скорость вращения, тем больше нагрузочная способность. В первом случае смазка практически не может вытекать в стороны и втягивается по направлению к узкому сечению зазора. Во втором случае большее количество смазки вовлекается в зазор. Увеличение относительного зазора $\varepsilon = c/R$ оказывает противоположное действие, поскольку в большом зазоре существует противоток смазки вследствие возрастания угла клина, и гидродинамическое давление развивается в малом сечении. Чем меньше минимальная толщина пленки, тем труднее смазке вытечь из зазора. Это приводит к возрастанию нагрузочной способности. Однако существует естественный нижний предел толщины, который должен превышать сумму высот неровностей на сопрягаемых поверхностях. Обычно средняя толщина смазочной пленки имеет порядок одной тысячной диаметра вала, в то время как максимальная и минимальная толщины пленки могут отличаться в 4...5 раз.

Условия, необходимые для обеспечения гидродинамической смазки, в 1883 г. были сформулированы Н.П. Петровым:

- смазочный материал должен удерживаться в зазоре между скользящими поверхностями деталей машин;
- в слое смазочного материала при относительном перемещении

поверхностей должно появиться и поддерживаться давление, уравнивающее внешнюю нагрузку, прижимающие друг к другу упомянутые поверхности;

- смазочный материал должен полностью разделять поверхности деталей машин;
- толщина слоя смазочного материала между этими поверхностями должна быть не меньше высоты их микронеровностей.

Петров предположил, что вал и вкладыш коаксиальны, а течение смазки подчиняется закону Куэтта.

Это предельный случай, соответствующий высокоскоростному или легко нагруженному валу. Этих предположений достаточно для расчета силы трения (они непригодны для оценки нагрузочной способности). Петров нашел точное решение задачи, используя общие уравнения гидродинамики. Пусть вкладыш неподвижен, а вал вращается с окружной скоростью v ($v = \omega R$, где ω – скорость вращения) – рис. 24. Если между валом и вкладышем имеет место ламинарное течение Куэтта, то распределение скорости по толщине смазочной пленки постоянной толщины c (c – зазор) является линейным. В этом случае градиент скорости равен v/c и, согласно определению вязкости, сопротивление трению на единицу площади равно

$$F/A = \eta v/h, \quad (3.10)$$

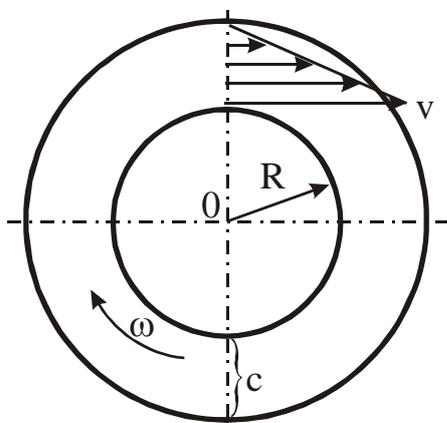


Рис. 24

где A – площадь опорной поверхности. Полная сила трения равна (уравнение Петрова).

$$F = \eta vA/c, \quad (3.11)$$

Коэффициент трения определяется давлением силы трения на нагрузку W . Так как площадь опорной поверхности равна $A = 2\pi RL$ (L – длина подшипника), то находим:

$$f = \pi \eta \omega R / (W c). \quad (3.12)$$

Используется удельная нагрузка на подшипник – на единицу площади проекции вала ($P = W / 2RL$), тогда

$$f = \pi \eta \omega R / (Pc). \quad (3.13)$$

Безразмерный комплекс $\eta \omega/P$ называют *числом Гумбеля*, т. е. коэффициент трения может быть представлен прямой линией (линия Петрова) (рис. 25 – диаграмма трения). Уравнение (3.13) показывает, что коэффициент трения прямо пропорционален вязкости η и скорости вала ω

и обратно пропорционален нагрузке P .

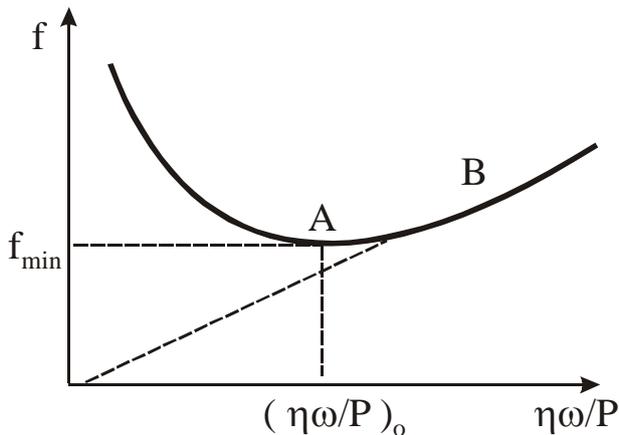


Рис. 25

изменение механизма трения (точка B на рис. 25 – режим смешанной смазки). Начиная от точки B , зависимость f отклоняется от прямой линии Петрова и при определенном значении числа Гумбеля $(\eta\omega/P)_0$ достигает минимума. Минимальное значение коэффициента трения имеет порядок 0,001...0,005. Левее точки A , в которой достигается минимум, коэффициент трения возрастает вследствие перехода от гидродинамической и смешанной смазки к граничной смазке и, наконец, к сухому трению.

Основной практический вывод, следующий из рассмотренной теории, заключается в том, что существует критическое значение $(\eta\omega/P)_0$, обеспечивающее минимальное трение. Нагрузка P и скорость и обычно выбираются в соответствии с предъявляемыми требованиями, и проблема заключается только в выборе наилучшей смазки. Оптимальная вязкость определяется соотношением

$$\eta = (\eta\omega/P)_0 (P/\omega) . \quad (3.14)$$

Это имеет большое значение для смазывания опорных подшипников. Важный практический результат, извлеченный Петровым из этой теории, состоит в том, что удалось обосновать замену слишком дорогих растительных масел более дешевыми минеральными маслами.

В процессе гидродинамической смазки между движущимися поверхностями деталей сопряжения образуется непрерывная пленка жидкости, значительно снижающая силы трения и минимизирующая изнашивание. Энергетические потери в процессе жидкостного трения поверхностей деталей, работающих в условиях гидродинамической смазки, обусловлены силами внутреннего трения смазочного материала и зависят от режима работы сопряжения (нагрузки, скорости и температуры); характера взаимодействия поверхностей (схемы фрикционного контакта); свойств смазочного материала (вязкости,

плотности); шероховатости рабочих поверхностей деталей и физико-механических свойств их материалов.

Важнейшим условием существования гидродинамической смазки является возникновение внутреннего давления в слое смазочного материала. Для создания гидродинамического давления необходимо придать слою масла сужающуюся клиновидную форму (рис. 26). Из-за

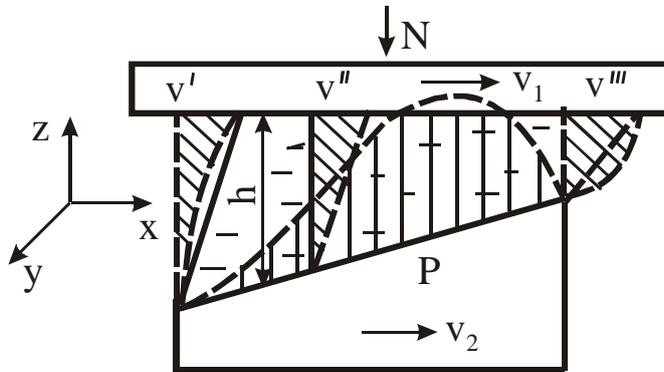


Рис. 26

разницы значений входного и выходного зазора сопряжения в слое смазочного материала произойдет перераспределение давления. В результате эпюры скоростей скольжения слоев смазочного материала на входе, в центре сопряжения и на выходе будут различными. Для зазора на входе эпюра скоростей v' приобретает вогнутый

профиль, для центра v'' будет иметь линейный характер, а на выходе v''' – выпуклую форму. Площадь под каждой кривой распределения скорости по толщине слоя масла остается постоянной для любой точки вкладыша в соответствии с условием неразрывности потока.

В аналитической форме связь между гидродинамическим давлением, возникающим в слое смазочного материала, и скоростью относительного перемещения поверхностей описывается дифференциальным уравнением Рейнольдса

$$\frac{1}{6} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial y} \right) \right] = (v_1 - v_2) \frac{\partial h}{\partial x} + h \frac{\partial (v_1 - v_2)}{\partial x} + 2 \frac{\partial h}{\partial \tau},$$

где x и y – координаты произвольно выбранной точки в жидкости; p – местное давление внутри слоя масла; η – абсолютная вязкость масла; h – толщина слоя смазочного материала; v_1 и v_2 – скорости перемещения верхней и нижней поверхностей соответственно; τ – продолжительность относительного перемещения поверхностей.

Уравнение Рейнольдса характеризует физическую сущность процесса гидродинамической смазки, и его широко используют при расчетах несущей способности смазочной пленки в подшипнике и сил трения, возникающих в сопряжениях. Правая часть уравнения представляет собой сумму трех слагаемых, описывающих влияние основных факторов на характер распределения и величину гидродинамического давления в слое масла.

Первое слагаемое характеризует влияние клина смазочного материала, образующегося вследствие не параллельности противоположных

поверхностей деталей. Это особенно важно при расчете радиального подшипника, подшипника с самоустанавливающимися вкладышами, а также опор скольжения, в конструкции которых допускается относительный перекося осей вала и втулки. Влияние клина на гидродинамическое давление в масле обусловлено формой жидкой пленки, описываемой отношением $\frac{\partial h}{\partial x}$, и скоростью относительного перемещения поверхностей, равной разности ($v_1 - v_2$).

Второе слагаемое в правой части равенства Рейнольдса характеризует влияние растяжения поверхностей деталей сопряжения. Обычно при проведении инженерных расчетов сопряжений, состоящих из металлических деталей, рабочие поверхности считают гладкими и твердыми. В таких случаях влияние растяжения поверхностей на гидродинамическое давление смазки незначительно, и им можно пренебречь. Если одна или обе детали сопряжения выполнены из эластомерных материалов, то в процессе взаимодействия возникает относительное растяжение материала поверхности, влекущее за собой дополнительное приращение гидродинамического давления вследствие изменения скоростей v_1 и v_2 .

Третье слагаемое характеризует влияние сдавливания, обусловленное относительным сближением поверхностей по нормали под действием постепенного статического, динамического нагружения или вибрации. Гидродинамический режим смазки в основном зависит от факторов, которые описываются первым и третьим слагаемыми. В результате решения уравнения Рейнольдса можно получить схему распределения гидродинамического давления и определить следующие важные показатели:

- несущую способность смазочной пленки подшипника

$$N = \int_0^{y_1} \int_0^{x_1} p(x, y) dx dy ;$$

- расход смазочного материала в направлении y

$$q = -\frac{h^3}{12\eta} \frac{\partial p}{\partial z} ;$$

- силу трения

$$F = \pm \int_0^{y_1} \int_0^{x_1} \frac{\eta v}{h} dx dy - \frac{1}{2} \int_0^{y_1} \int_0^{x_1} h \frac{\partial p}{\partial x} dx dy .$$

Здесь v – скорость относительного перемещения поверхностей, равная ($v_1 - v_2$).

При расчете силы трения, приложенной к поверхности, которая движется с меньшей скоростью, в последнем выражении принимают знак плюс. При расчете силы сопротивления перемещению поверхности, движущейся с большей скоростью, принимают знак минус.

При выводе выражения Рейнольдса приняты следующие допущения: жидкость, используемая в качестве смазочного материала, является ньютоновской, т. е. подчиняется законам классической механики; для ньютоновских жидкостей справедливо равенство $\partial v / \partial y = \tau / \eta$ (здесь y – координата, перпендикулярная плоскости, в которой расположена пленка; m — приложенное напряжение сдвига; v – скорость деформации пленки; τ – абсолютная вязкость); течение жидкости ламинарное; гравитационными и инерционными силами можно пренебречь; вязкость жидкости не меняется; жидкость несжимаема; толщина пленки мала по сравнению с другими размерами; скольжение смазочного материала относительно твердых поверхностей отсутствует; влиянием поверхностного натяжения можно пренебречь; давление жидкости постоянно по толщине пленки.

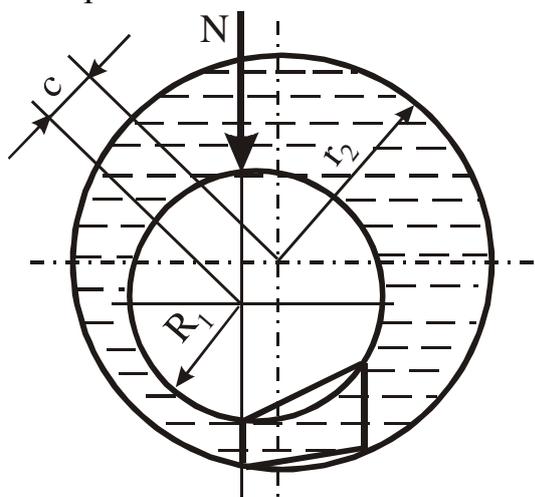


Рис. 27

Допущения, сделанные при выводе математического описания процесса гидродинамической смазки, не позволяют учесть влияние температуры и давления на вязкость смазочного материала. Между тем вязкость масел значительно уменьшается с ростом температуры и увеличивается с ростом давления.

Условия постоянства вязкости, несжимаемости и принадлежности жидкости к классу ньютоновских при последующем уточнении первоначальной теории были исключены, однако это привело к существенному усложнению математического описания. Характер режима смазки зависит от схемы фрикционного контакта, определяемой конструкцией сопряжения. В радиальных подшипниках существует естественный смазочный клин (рис. 27).

При достаточно высоких скоростях в смазочном материале развивается внутреннее давление, уравнивающее внешнюю нагрузку, благодаря чему поверхность вала поддерживается на некотором расстоянии от втулки подшипника.

При расчетах подшипников (несущей способности смазочного слоя, режима смазки, показателей трения и изнашивания) для учета влияния режима работы сопряжения и вида смазочного материала на коэффициент трения обычно используют комплексный показатель, называемый числом

Зоммерфельда $S_0 = p\psi^2/\eta\omega$, где p – давление, определяемое как отношение нормальной нагрузки к площади проекции подшипника, $p = N/2rL$, L – длина подшипника; ψ – параметр, характеризующий отношение радиального зазора к радиусу вала, $\psi = \varepsilon/r$; η – динамическая вязкость масла; ω – частота вращения, $\omega = v/r$. При числе Зоммерфельда $S_0 < 1$ коэффициент трения $f \sim \eta v L / N$, а при $S_0 > 1$ коэффициент $f \sim (\eta v L / N)^{1/2}$. Параметр $\eta v L / N$ является комплексной характеристикой режима трения и смазывания сопряжения и может быть использован в качестве абсциссы кривой Штрибека (рис. 20).

3.5.2. Упругогидродинамическая смазка

Условия работы сопряжений дорожно-строительных машин характеризуются широкими интервалами изменения скорости и давления, большими перепадами температуры, значительным изменением вязкости смазочных материалов. Рабочие поверхности деталей дорожных машин нельзя считать абсолютно твердыми и гладкими. Все это вызвало необходимость разработки упруго-гидродинамической теории смазки.

В тяжелонагруженных узлах машин, работающих со смазкой в условиях точечного или линейного контактов, таких как подшипники качения и зубчатые передачи, могут возникнуть условия, при которых трение и толщина пленки между двумя телами, находящимися в относительном движении, определяются не только вязкостью смазки, но и упругими свойствами этих тел.

Более того, уже нельзя пренебречь зависимостью вязкости от давления и локальной температуры. Это происходит, когда деформация поверхности, вызванная большой нагрузкой, сравнима с толщиной гидродинамической пленки. В данном случае гидродинамическая теория смазки неприменима для описания поведения контакта, так как деформация поверхности в ней не рассматривается. Основным отличием упругогидродинамической смазки от гидродинамической является упругая деформация поверхностей детали в зоне контакта и, как следствие, переменная толщина пленки смазочного материала в зазоре.

Физический механизм взаимодействия поверхностей в условиях упругогидродинамической смазки можно представить следующим образом. При относительном перемещении рабочих поверхностей деталей в процессе трения качения или трения скольжения смазочный материал, адсорбированный поверхностями трения, оказывается зажатым в зазоре между ними. Высокое давление, действующее в зоне контакта деталей, вызывает увеличение вязкости смазочного материала. В центральной части зазора, заполненного смазочным материалом, вследствие упругой деформации участки контактирующих поверхностей почти параллельны. Поэтому скорость течения масла на этом участке почти постоянна. На выходе из

зазора, в том месте, где прекращается упругая деформация поверхностей, величина зазора резко уменьшается, снижается толщина смазочной пленки. Свойство неразрывности потока обуславливает стремительное увеличение скорости прохождения объема смазочного материала через эту область. Резко возрастает гидродинамическое давление в слое смазочного материала.

Упругогидродинамическая теория смазки, разработанная Эртелем и Грубиным, дает адекватное описание эффектов упругой деформации и вязкости, зависящей от давления. Эта теория находится на границе между гидродинамикой и теорией упругости и охватывает одновременно решение гидродинамической задачи о течении смазки через узкий зазор (уравнение Рейнольдса для смазки) и контактной задачи для упругих тел (уравнение Герца для твердых тел). Здесь также должна быть учтена связь вязкости и давления (например, в виде уравнение Баруса).

Вязкость зависит от давления. Существует большое количество численных методов решения, которые позволили получить важные результаты и обеспечить прогнозирование работоспособности тяжело нагруженных узлов трения. Анализ системы уравнений и большого объема экспериментальных данных подтверждает тот факт, что упругогидродинамическое действие – это комбинированный гидродинамический и деформационный эффект. Действительно, смазка вовлекается в зазор между тяжело нагруженными телами, движущимися друг относительно друга.

Как и при гидродинамической смазке, толщина пленки и давление смазки определяются расклинивающим действием. Это высокое давление ответственно за упругую деформацию сопрягаемых тел и приводит к перераспределению нагрузки на большую площадь. В зоне контакта пленка имеет почти постоянную толщину, за исключением резкого сужения вблизи выхода из зазора. Сужение обусловлено тем, что, поскольку давление распределяется почти по закону Герца и вблизи выхода из контакта резко падает, то и вязкость смазки убывает, вызывая уменьшение толщины пленки (рис. 28).

Скорость истечения смазки резко возрастает в силу условия неразрывности течения. В результате возрастает гидродинамическое давление и возникает пик давления, иногда называемый пиком Петрусевича.

В области контакта высокое давление вызывает значительный рост вязкости смазки, ее нагрузочная способность возрастает. Высоковязкая смазка с трудом выжимается из зоны контакта через узкий зазор. Формирующаяся упругогидродинамическая

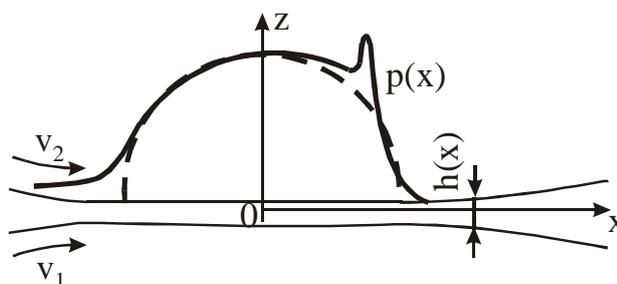


Рис. 28

смазочная пленка имеет толщину $0,1 \dots 10$ мкм. Оценка толщины пленки представляет значительный интерес, так как условием успешной работы упругогидродинамического контакта является то, что толщина пленки должна быть не меньше эквивалентной шероховатости сопрягаемых поверхностей. Рассмотрим известную формулу Доусона-Хиггинсона, являющуюся аппроксимацией численного решения упругогидродинамической задачи для двух цилиндров радиусами R_1 и R_2 (линейный контакт). Согласно этой теории, безразмерная толщина слоя смазочного материала равна

$$H_{min} = h_{min} / R = 2,65 v^{0,7} J^{0,54} W^{-0,13} .$$

Это уравнение связывает в безразмерной форме минимальную толщину пленки H_{min} с тремя безразмерными параметрами, а именно, скоростным параметром $v = \eta_0 v_e / ER$, материальным параметром $J = \alpha E$ и нагрузочным параметром $W = W' / ER$. Здесь R – эффективный радиус ($1/R = 1/R_1 = 1/R_2$); E – эффективный модуль упругости ($1/E = 1/E_1 = 1/E_2$); v_e – скорость вовлечения смазки ($v_e = 0,5(v_1 + v_2)$); η_0 – динамическая вязкость при атмосферном давлении и рабочей температуре; α – пьезокоэффициент вязкости; W' – погонная нагрузка.

Смазочный материал находится в очень жестких условиях, так как, например, максимальное герцевское давление может достигать $3 \dots 4$ ГПа, а скорость вовлечения смазки – 10 м/с. Время прохождения зоны контакта составляет около 10^{-4} с, а скорость сдвига – $10^7 \dots 10^8$ с $^{-1}$. Тепловыделение, обусловленное сдвигом, повышает температуру смазки на десятки и даже сотни градусов и увеличивает температуру сопрягаемых тел вблизи зоны контакта. В этом случае уравнение Баруса обычно модифицируют, включая в него вязкостно-температурный коэффициент. Основные особенности изотермического упругогидродинамического контакта остаются справедливыми. Среди них уравнение Доусона-Хиггинсона для оценки толщины пленки. Тем не менее, при расчете силы трения и энергетических потерь нельзя пренебрегать термическими эффектами. Наряду с высокими давлением и скоростью сдвига, они приводят к неньютоновскому поведению смазочного материала.

С ростом нагрузки и температуры и со снижением скорости качения шероховатость поверхности существенно влияет на трение и тепловое состояние подшипника. Толщина пленки становится переменной, на вершинах неровностей она очень мала. Отношение толщины пленки к комбинированной шероховатости поверхностей является мерой жесткости условий работы упругогидродинамического контакта. Здесь эффективная шероховатость равна

$$R_q = (R_{q1}^2 + R_{q2}^2)^{1/2},$$

где R_{q1}^2 и R_{q2}^2 – среднеквадратические шероховатости контактирующих поверхностей. Так как $\Delta = h_{min}/R_q$, равное 2 или 3, что соответствует максимальной долговечности фрикционного контакта, в то время как при $\Delta < 1$ возможен переход к граничному трению.

Толщину пленки можно использовать как приближенный ориентир при расчете и конструировании тяжело нагруженных деталей машин, работающих со смазочным материалом. Увеличения толщины пленки можно добиться, увеличивая вязкость и ее пьезокоэффициент путем подбора смазочного материала и улучшения условий охлаждения; увеличивая скорость качения, размеры элементов трибосопряжения и жесткость материалов; снижая контактное давление. Чем больше толщина пленки, тем выше усталостная долговечность упругогидродинамического контакта и тем меньше износ, температура смазочного материала и энергетические потери.

3.5.3. Граничная смазка

Граничная смазка характеризуется тем, что трение и износ между поверхностями, находящимися в относительном движении, определяются свойствами поверхностей деталей машин и соприкасающегося с ними смазочного материала. Изменение геометрических параметров деталей вследствие износа также ведет к ухудшению условий смазки. В результате на поверхностях трения остается только тонкая пленка смазочного материала. Эта пленка, имеющая толщину всего в несколько молекулярных слоев, весьма прочно связана с металлической подложкой силами молекулярного взаимодействия и поэтому теряет свойства, присущие жидкости в большом объеме. Смазка, соответствующая таким условиям взаимодействия поверхностей, называется граничной. Она имеет следующие особенности:

- толщина слоя смазочного материала настолько мала, что между выступами неровностей противоположащих поверхностей существует механическое взаимодействие;
- из-за отсутствия объемных свойств жидкости в тонких смазочных слоях гидродинамические явления в зоне контакта несущественны;
- характер контактирования рабочих поверхностей при трении определяется поверхностными взаимодействиями между тонкими слоями граничных пленок смазочного материала и материалами деталей.

Таким образом, при граничной смазке трение обусловлено свойствами тонкого слоя жидкого смазочного материала, которые отличаются от свойств того же смазочного материала в объеме, и

взаимодействием материалов поверхностей трения, смазочного материала и окружающей среды. Механизм граничной смазки по сравнению с механизмами смазки других видов сложен вследствие происходящих различных по своей физической природе процессов адсорбционного, физико-химического и механического взаимодействия. Адсорбционные и физико-химические процессы происходят на границе взаимодействия пленки масла с материалом детали. Механическое взаимодействие поверхностей трения обусловлено малой толщиной смазочного слоя.

Основное назначение граничной смазки состоит в создании между поверхностями трения пленки, способной уменьшить число прямых взаимодействий выступов неровностей контактирующих поверхностей деталей. Условия граничной смазки могут быть обеспечены не только с помощью жидкого или пластичного смазочного материала, но также и при использовании твердых смазочных материалов. Коэффициент трения в условиях граничной смазки f_{zc} представляет собой сумму трех слагаемых

$$f_{zc} = f_{mv} + f_{жс} + f_{np},$$

где f_{mv} , $f_{жс}$, f_{np} – составляющие коэффициента трения, обусловленные соответственно механическим взаимодействием твердых поверхностей, внутренним трением слоев смазочного материала и сопротивлением трения, вследствие пропахивания поверхности выступами неровностей при повреждении смазочной пленки.

Это выражение можно представить следующим образом:

$$f_{zc} = \alpha \sigma_{mv} / p + (1 - \alpha) \sigma_{жс} / p + f_{np}, \quad (3.15)$$

где α – доля номинальной площади, на которой происходит механическое взаимодействие рабочих поверхностей деталей; σ_{mv} – прочность на срез твердого материала детали; $\sigma_{жс}$ – сопротивление относительному перемещению слоев смазочного материала; p – среднее номинальное давление в зоне контакта.

В выражении (3.15) второе слагаемое значительно меньше первого. Необходимым условием существования граничной смазки является наличие в зоне трения смазочного материала, прочность которого достаточно велика, чтобы выдержать внешнюю нагрузку и защитить рабочие поверхности деталей от механического разрушения. Составляющая f_{np} настолько мала, что ею можно пренебречь без существенной погрешности. Несмотря на малую толщину граничной пленки смазочного материала (до 0,5 мкм), коэффициент трения твердых поверхностей в режиме граничной смазки значительно меньше, чем в условиях трения без смазочного материала.

Если одна из деталей, работающих в условиях граничного трения,

выполнена из эластомерного материала, то в полостях между выступами неровностей поверхности, заполненных смазочным материалом, возникает упругогидродинамический эффект. Сила трения при граничной смазке эластомеров складывается из сил сопротивления перемещению выступов неровностей твердой поверхности по поверхности эластомера, сил сопротивления относительному перемещению слоев смазочного материала, а также гистерезисной составляющей силы трения, обусловленной упругим деформированием поверхности эластомера. Коэффициент трения в режиме граничной смазки для эластомера по аналогии с (3.15):

$$f_{гс.э} = \alpha \sigma_{mv} / p + (1 - \beta) \sigma_{жс} / p + f_2.$$

где β – доля номинальной площади, на которой происходит непосредственный контакт поверхности эластомера с выступами неровностей твердой поверхности; f_2 – составляющая коэффициента трения, учитывающая гистерезисные явления в контакте.

Особенностью эластомеров является то, что коэффициент трения в условиях граничной смазки у них примерно равен коэффициенту трения без смазочного материала. Исследования показали, что введение смазочного материала в зону трения эластомера по твердой поверхности не обязательно приводит к снижению коэффициента трения скольжения, а в отдельных случаях может вызвать даже некоторое его увеличение. В этом заключается одно из наиболее характерных отличий процессов трения эластомеров от аналогичных процессов для твердых поверхностей.

3.6. Механизм смазки

Все минеральные масла состоят из цепных молекул, содержащих несколько типов углеводородных пар. Их характеризует: палочкообразная конфигурация молекул масла; склонность цепных молекул к параллельной ориентации осей; гидродинамические условия их ориентации в потоке при переходе от граничной смазки к гидродинамическому режиму.

Тонкие слои масел вследствие их свойства несжимаемости уравнивают внешнее давление. Чем больше давление, тем меньше толщина слоя масла, способного уравновесить дополнительное внешнее давление. Следовательно, толщина слоя масла характеризует потенциальные возможности смазочного материала в уравнивании внешнего давления. Расклинивающее действие жидкости препятствует уменьшению ее слоя при увеличении давления. Существует равновесное расклинивающее давление масел, которое зависит от их физико-механических свойств и характера контактирующих поверхностей.

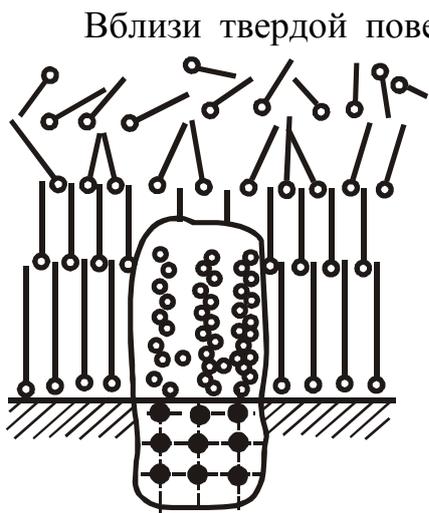


Рис. 29

Вблизи твердой поверхности детали существует электромагнитное силовое поле, оказывающее воздействие на молекулы смазочного материала. Силовое поле вызывает направленную адгезию граничных пленок смазочного материала, изменяет ориентацию молекул масла (рис. 29).

Влияние силового поля ослабевает по мере удаления от поверхности детали. При этом изменяется строение смазочной пленки и восстанавливаются объемные свойства масла. В тонких смазочных слоях на расстоянии 0,1...0,2 мкм от твердой поверхности вязкость масел обычно повышается вследствие изменения ориентации осей молекул. Способность смазочного материала к

изменению ориентации молекул характеризует эффективность его смазочного действия.

Силовое поле у поверхности детали возникает из-за того, что поверхностные слои твердого материала обладают повышенной полярной активностью, вызванной неуравновешенностью атомарных сил, действующих в них. В результате полярной активности материала на поверхности трения образуются тонкие пленки адсорбированных молекул масла. Для увеличения сил сцепления адсорбированных слоев масла с поверхностью трения в его состав вводят поверхностно-активные вещества (ПАВ): органические кислоты и их мыла, спирты, смолы. Для ПАВ характерно несовпадение центров положительных и отрицательных зарядов в их молекулах. Благодаря этому свойству молекулы, называемые полярными, притягиваются к твердой поверхности и удерживаются на ней длительное время.

Молекулы масел обычно имеют удлиненную форму, причем их длина в 5...10 раз превышает диаметр поперечного сечения. Конец молекулы, вступающей во взаимодействие с металлом, называют полярно-активным. У органических кислот и их мыл полярно-активной частью является карбоксильная группа COOH , у спиртов – гидроксил OH .

Различают два вида адсорбции молекул масла к поверхности тела: химическую (хемосорбция) и физическую. Химическая адсорбция сопровождается образованием химических соединений пленок окислов при взаимодействии полярно-активных концов молекул масла с молекулами материала поверхности. При физической адсорбции взаимодействие ограничивается формированием молекулярных связей. В большинстве случаев эти два вида адсорбции наблюдаются одновременно с преобладанием какого-либо из них. Хемосорбция в отличие от физической адсорбции имеет избирательный характер и больше

проявляется на участках с нарушением регулярности кристаллической решетки металла включениями и дислокациями. Под действием сил молекулярного притяжения молекулы масла приобретают определенную ориентацию, поэтому улучшается смазочная способность масла.

Молекулы масла, адсорбированные на поверхности трения, обладают способностью перемещаться. При большом числе молекул в зоне из верхних слабо ориентированных и закрепленных слоев молекулы перемещаются в те зоны, где их меньше, приобретая лучшую ориентацию. Подвижность молекул зависит от вида адсорбции. При хемосорбции подвижность молекул значительно ограничивается.

С повышением температуры масла межмолекулярные расстояния и молекулярные связи ослабевают, происходит дезориентация адсорбированного слоя молекул, активизируется подвижность молекул и ухудшаются смазочные свойства масла. Нарушение адсорбции происходит при температуре 40...150 °С для различных масел. При образовании на поверхности трения ультрамикроскопических трещин поверхностно-активные молекулы масла проникают внутрь этих

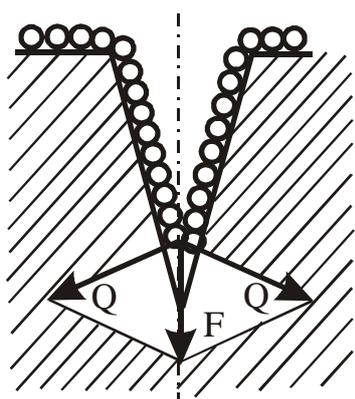


Рис. 30

трещин. Ширина трещин соизмерима с размерами молекул, поэтому силы молекулярного взаимодействия оказывают на материал твердой поверхности расклинивающее воздействие (рис. 30). Давление молекул масла на стенки трещин может достигать 100 МПа. В этих условиях смазочный материал оказывает отрицательное воздействие на процесс изнашивания. Это явление называют адсорбционно-расклинивающим эффектом П. А. Ребиндера.

П. А. Ребиндером было установлено, что активные смазки повышают пластическое течение тонкого поверхностного слоя металла при трении деталей в условиях значительных давлений. В результате взаимодействия, например, жидкой смазочной среды, содержащей полярные компоненты, с материалом поверхностного слоя детали в условиях пластического деформирования может происходить разрыхление металла на поверхности. Причиной разрыхления металла является адсорбция активных молекул смазочного материала на обнажающихся при деформировании ювенильных участках поверхности. При трении такое адсорбционное разрыхление (пластификация) поверхности вызывает снижение предела текучести материала детали в слоях толщиной до 0,1 мкм. Это облегчает приработку и снижает интенсивность изнашивания поверхностей.

В начале 60-х годов 20-го века исследование механизма взаимодействия смазочных материалов с металлами деталей в процессе

трения привело к открытию эффекта трибополимеризации. Этот эффект заключается в том, что в процессе трения металлических поверхностей в присутствии углеводородной смазочной среды наблюдается образование аморфных высокомолекулярных продуктов, которые были названы полимерами трения.

Полимерные пленки, образующиеся на поверхностях трения, обеспечивают противозадирные и противоизносные свойства материалов. Продукты трибополимеризации – это полимеры трения, которые обеспечивают поверхностным слоям материалов деталей положительный градиент механических свойств, что, в свою очередь, вызывает резкое снижение интенсивности изнашивания деталей сопряжения. В качестве смазочных материалов, создающих условия возникновения эффекта трибополимеризации, применяют масла и отдельные их фракции, индивидуальные углеводороды (цетан) и другие органические соединения. Для активизации процесса адсорбционной пластификации к маслам добавляют специальные полярно-активные присадки.

Механизм смазочного действия пластичных смазочных материалов имеет аналогичный характер, так как при рабочей температуре смазочные материалы переходят в вязкотекучее состояние. Масла, используемые в качестве основы пластичных смазочных материалов, по своим физико-химическим показателям не отличаются от обычных масел, применяемых для смазывания элементов дорожных машин. Поэтому описанный механизм действия масел может быть полностью перенесен на пластичные смазочные материалы.

4. СИСТЕМЫ СМАЗКИ

В опорах шпинделей некоторых моделей металлорежущих станков используют гидростатические подшипники, которые обеспечивают сохранение расчетных характеристик по нагрузочной способности и жесткости в опорах. Смазочное масло (кроме создания рабочего давления в опоре) обеспечивает отвод теплоты от деталей станка и защищает их от коррозии. Масло для смазывания гидростатических опор шпинделя станка выбирают с учетом условий их работы. При увеличении скорости скольжения рекомендуются менее вязкие масла и наоборот.

На рис. 31 приведена принципиальная схема смазочной системы гидростатических опор шпиндельного узла металлорежущего станка. Эти системы смазки применяют в зубофрезерных станках с диаметром шпинделя до 180 мм (мод. 5В373П, 5В345П, 3Н163С, ХШ1-31 и др.).

Масло из бака 1 насосом 3 нагнетается под давлением через фильтр грубой очистки 2 и фильтр 4 тонкой очистки (с сеткой 15...70 мкм) в смазочную систему станка.

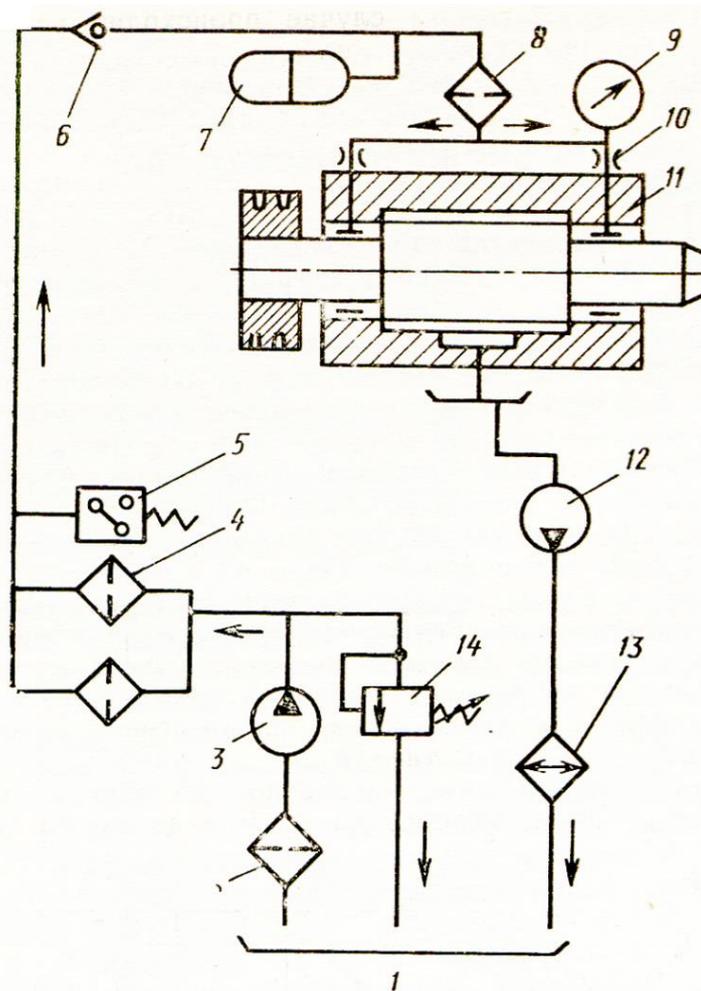


Рис. 31.

Требуемое давление масла в смазочной линии обеспечивается с помощью перепускного клапана 14.

Для аварийного питания на выбеге шпинделя, пока не сработает реле давления 5 и не отключит привод вращения,

предусмотрены гидроаккумулятор 7 и обратный клапан 6. Реле давления 5 обеспечивает

нормальную работу фильтра 4 до их предельно допустимого

засорения примесями. В системе имеется фильтр 8 особо тонкой очистки масла (до 5...10 мкм) и манометр 9. На входе в карманы подшипников предусмотрены дроссели 10. Протекшее через опоры масла откачивают из корпуса шпиндельной бабки насосом 12 и затем через теплообменник 13 сливают в бак 1, где оно отстаивается.

Одним из самых серьезных требований при применении гидростатической смазки опор шпинделей металлорежущих станков является чистота смазочного масла. Для защиты масла от загрязнений используют отстойники и фильтры, встраиваемые в главный трубопровод за источником загрязнения. Тонкость фильтрации зависит от относительного перемещения направляющих.

Частицы в центре потока смазочного материала имеют большую скорость и могут "догонять" частицы, перемещающиеся ближе к поверхностям скольжения. При малой скорости перемещения это способствует "заращиванию" зазора. Чтобы этого не происходило,

Частицы в центре потока смазочного материала имеют большую скорость и могут "догонять" частицы, перемещающиеся ближе к поверхностям скольжения. При малой скорости перемещения это способствует "заращиванию" зазора. Чтобы этого не происходило,

Частицы в центре потока смазочного материала имеют большую скорость и могут "догонять" частицы, перемещающиеся ближе к поверхностям скольжения. При малой скорости перемещения это способствует "заращиванию" зазора. Чтобы этого не происходило,

Частицы в центре потока смазочного материала имеют большую скорость и могут "догонять" частицы, перемещающиеся ближе к поверхностям скольжения. При малой скорости перемещения это способствует "заращиванию" зазора. Чтобы этого не происходило,

размер частиц абразивного материала не должен превышать 30% величины зазора. При значительных перемещениях поверхностей размеры частиц абразивного материала не должны превышать 75% величины зазора. При таких условиях исключается абразивное изнашивание направляющих или гидростатических опор шпинделей станков. Для очистки смазочного масла применяют фильтры грубой и тонкой очистки.

Перед включением смазочной системы в работу, а также после замены смазочного масла, замены гидроаппаратуры целесообразно для очистки системы от загрязнений в течение 1,5...2 ч сливать (при отсоединенных трубопроводах нагнетания) масло в бак.

На работу станка влияет температура масла. Максимальная температура масла не должна превышать 60...65 °С – чтобы не было усиленного окисления и интенсивного старения масла.

Способы смазки различаются по принципу подвода смазочных материалов к контактным поверхностям в очаге деформации и узлам трения. При смазке жидкими минеральными маслами применяются индивидуальный способ смазки, смазка погружением в масляную ванну и смазка под давлением. Индивидуальный способ применяют для смазки отдельных узлов трения, когда подключение их к централизованным системам затруднено или к ним предъявляются специфические требования. Этот способ осуществляют с помощью различного рода "самосмазов", масленок различных конструкций (фитильных, наливных с запорной иглой и др.), свободно висящих на валу колец (кольцевая смазка).

Кольцевая смазка (рис. 32, а) простая по конструкции и достаточно надежная в эксплуатации, довольно широко применяется для смазки опор горизонтальных валов с подшипниками скольжения. Она основана на использовании сил сцепления между жидкостью 7 и кольцом 2, свободно висящих на валу 3 и погруженных нижней частью в масляную ванну. При вращении вала кольцо также вращается и выносит масло из ванны на вал и далее на опору.

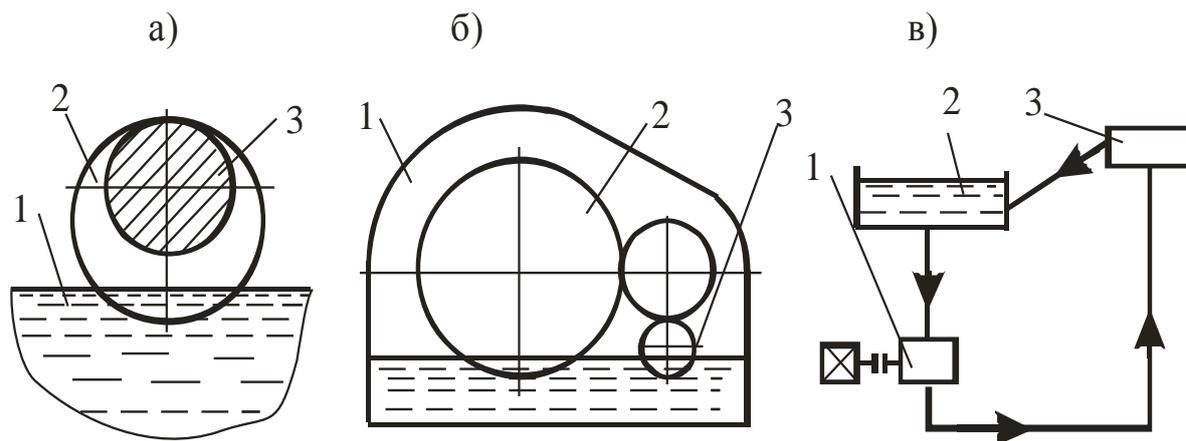


Рис. 32

Смазывание погружением (рис. 32, б) – каретная смазка, ее применяют в основном в редукторах при окружных скоростях зубчатых колес до 10 м/с, когда тепло, выделяющееся в зацеплениях, полностью отводится в окружающее пространство через стенки картера и крышку 7. В зону зацепления масло подается колесом 2 или паразитной шестерней 3 за счет сил молекулярного сцепления.

Смазывание под давлением (рис. 32, в) является наиболее эффективным способом. Его применяют в ответственных машинах и механизмах и осуществляют с помощью циркуляционных систем смазки. Масло подается к трущимся поверхностям 3 из резервуара 2 за счет перепада давлений, создаваемого насосами, и возвращается в резервуар самотеком. Циркуляция масла в замкнутом контуре обеспечивает непрерывный отвод тепла от трущихся поверхностей и продуктов износа узлов трения.

При смазке пластичными материалами различают индивидуальный, закладной и централизованный способы смазки. При индивидуальном способе смазку подают периодически посредством ручных шприцев через масленки, установленные в смазочных отверстиях узлов трения. Закладной способ заключается в заполнении узла трения смазкой при сборке или ремонте.

Централизованный способ (ручной или автоматический) применяют при наличии большого числа узлов трения, расположенных вдали от насосной станции. Различают системы жидкой, пластичной и аэрозольной смазки. Для смазки прокатного оборудования, например, применяются циркуляционные централизованные системы жидкой и густой (пластичной) смазки.

Циркуляционные системы жидкой смазки по устройству одинаковы и отличаются лишь производительностью, типом насосов и фильтров. В состав системы (рис. 33) входит следующее оборудование: резервуар 1 для масла; два насоса 2 с электродвигателями, один из

которых рабочий, а второй резервный; два фильтра 3 с приводом; теплообменник (маслоохладитель) 4 (при необходимости); трубопроводы – напорный 10 и сливной 11 и запорная арматура (вентили, задвижки, клапаны); перепускной клапан 5; аппаратура управления; один или два (в зависимости от наличия маслоохладителя) электроконтактных термометра 6 и 7; реле уровня масла в резервуаре 15; два электроконтактных манометра 8; технический манометр 9; технический дифференциальный манометр 12 для контроля перепада давления на фильтрах; командный электроприбор для автоматической очистки фильтров.

При работе системы масло рабочим насосом 2 через плавающую всасывающую трубу всасывается из резервуара 1 и поступает в пластинчатые фильтры 3, в которых происходит очистка масла от механических примесей, откуда через маслоохладитель 4 по напорному трубопроводу 10 поступает к узлам трения 13. После смазки всех узлов масло самотеком по трубопроводу 11 сливается в резервуар. Очистка масла в резервуаре производится с помощью центробежного сепаратора 18.

В холодное время года масло в резервуаре подогревается паром из паропровода 14 с помощью мембранного вентиля с электромагнитным приводом. Команду на включение и выключение привода вентиля дает электроконтактный термометр 6, датчик которого 16 установлен на резервуаре и контролирует температуру масла. Датчик 17 и электроконтактный термометр 7 контролирует температуру масла после маслоохладителя.

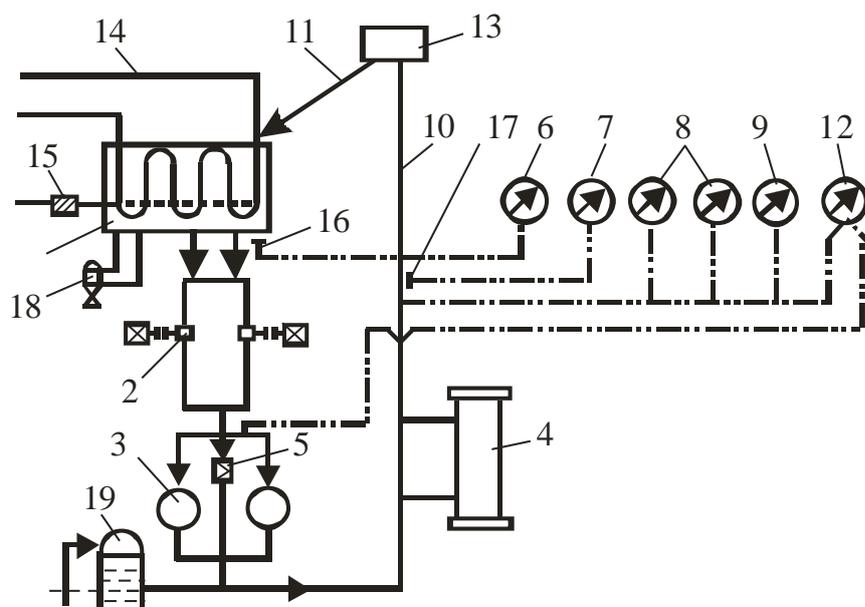


Рис. 33

Непрерывное измерение давления масла до и после фильтров 3 осуществляется дифференциальным манометром 12. При загрязнении фильтров загорается сигнальная красная лампочка. Фильтры очищаются автоматически. Периодичность включения

приводов очистки составляет 6...12 ч. Давление масла в напорном

трубопроводе измеряется манометром 9. Когда фильтры засорены и их приводы не включаются, срабатывает перепускной клапан 5 и масло поступает к узлам трения, минуя фильтры. Давление в системе резервного насоса измеряется двумя электроконтактными манометрами 8.

Уровень масла контролируется в резервуаре с помощью датчика уровня IS поплавкового типа. К узлам трения 13 от напорного трубопровода 70 масло подается с помощью дроссельных распределителей при номинальном давлении 1,6 МПа, снабженных, в зависимости от исполнения, двумя, четырьмя или шестью отводами. Маслораспределители снабжены регуляторами и указателями расхода масла. К числу наиболее ответственных систем жидкой смазки относятся системы смазки подшипников жидкостного трения (ПЖТ) прокатных станков.

Эти системы аналогичны описанной выше. Отличие их заключается в том, что они дополнительно снабжены двумя резервуарами масла увеличенной емкости – рабочим и резервным, который используется для отстоя загрязненного и обводненного масла, сетчатыми фильтрами тонкой очистки масла, установленными за пластинчатыми фильтрами, и реле давления для контроля разности давлений в сетчатых фильрах. В системе смазки ПЖТ, кроме того, применяется резервуар давления (пресс-бак) 19 с тремя реле уровня типа РП-40/1, давление воздуха в котором равно давлению в напорном трубопроводе.

Системы централизованной густой (пластичной) смазки (ЦСПС) предназначены для централизованной подачи дозированного количества пластинчатой смазки к узлам трения. В зависимости от частоты подачи смазки, расположения и количества узлов трения для смазки прокатного оборудования применяют в основном двухмагистральные ЦСПС с ручным и автоматическим приводом.

Для смазки отдельных машин и механизмов с небольшим числом смазываемых узлов трения применяют ЦСПС с ручным приводом (рис. 34).

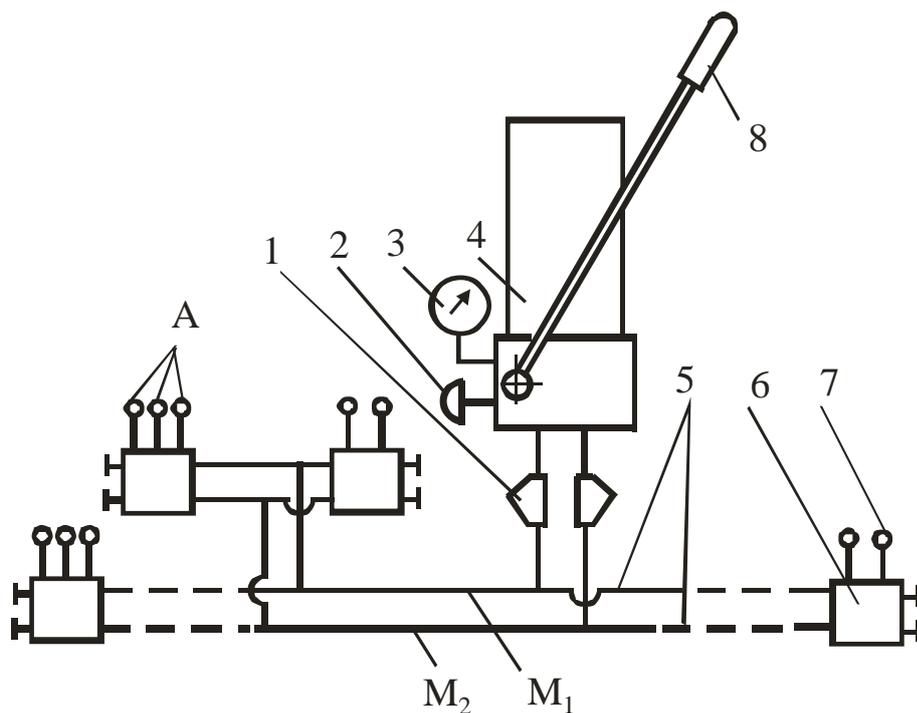


Рис. 34

Система состоит из станции с ручным приводом 4 и золотниковым распределителем 2, магистральных трубопроводов 5, двухлинейных дозирующих питателей 6, трубопроводов 7, подводящих смазку от питателей к узлам трения А,

и сетчатых фильтров 1.

Для контроля давления смазки в системе станции установлен манометр 3. При качании рукоятки 8 станции смазка подается по одному из магистральных трубопроводов M_1 или M_2 , который в это время является напорным. Второй трубопровод – разгрузочный, при этом соединен через золотниковый распределитель 2 с резервуаром станции и не находится под давлением. В процессе нагнетания смазки срабатывают питатели 5 и к узлам трения подаются строго определенные порции смазки. После завершения цикла подачи смазки вручную переключают золотниковый распределитель: система готова к очередному циклу работы. В период между циклами обе магистрали не находятся под давлением. При очередном цикле магистральные трубопроводы M_1 и M_2 меняются ролями: напорный становится разгрузочным и наоборот.

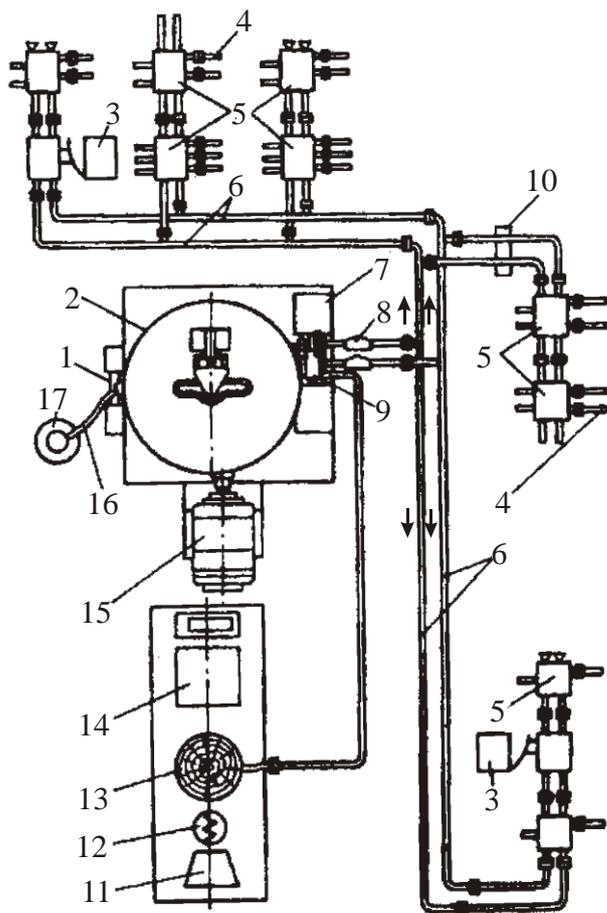


Рис. 35

На рис. 35 изображена схема автоматизированной системы густой смазки. Резервуар 2 станции заполняется мазью автоматически через клапан 1 с электромагнитным приводом или насосом 17 с ручным управлением, из бочки, через заправочный штуцер 16. Через установленный интервал времени командный прибор 14 включает электродвигатель 15, и насос, нагнетая мазь из резервуара 2 в одну из труб 6 и далее через фильтр 8 и питатель 5 к смазываемым точкам 4.

Вторая труба 6 в этот момент не имеет давления и сообщена реверсивным клапаном 9 с резервуаром. После срабатывания всех

питателей давление в трубе быстро возрастает, срабатывает клапан 3 и электродвигатель насоса отключается. Золотник реверсивного клапана 9 электромагнитами 7 перемещается и переключает трубы 5.

По истечении установленного промежутка времени командный прибор 14 снова включает в работу насос, и нагнетание мази производится уже по второй трубе 6, а труба, по которой ранее нагнеталась мазь, соединяется реверсивным клапаном 9 с резервуаром и давление в ней падает. Самопишущий манометр 13 контролирует давление подаваемой мази. Сирена 11 и сигнальная лампа 12 автоматически включаются при возникновении неисправностей в работе станции. Крепление труб к оборудованию или к специально предусмотренным стойкам производится металлическими скобами 10 и болтами.

В последнее время все большее распространение получают системы смазки узлов трения прокатного оборудования масляным туманом (ССМТ). Это обусловлено следующими преимуществами применения ССМТ перед обычными централизованными системами: небольшим расходом смазки, низкой стоимостью смазочного оборудования, простотой и экономичностью смазки при высоких нагрузках и температуре трущихся поверхностей.

Принцип работы ССМТ основан на распылении смазочного материала сжатым воздухом на мельчайшие частицы и транспортировании этих частиц в потоке воздуха к трущимся поверхностям. Масляный туман (масляная аэрозоль) представляет собой воздушно-масляную смесь, в которой основная масса частиц имеет размеры 2...5 мкм. ССМТ работают на специальных маслах, не содержащих графит. В состоянии аэрозоли смазка под давлением по трубопроводам через специальные сопла подается к узлам трения. Основной частью системы является генератор масляного тумана (рис. 36), включающий следующие основные элементы: фильтр-влагоотделитель 5 для удаления загрязнений и влаги из сжатого воздуха; двухходовой электромагнитный клапан 6 для подачи сжатого воздуха; регулятор 7 давления воздуха; маслораспылитель 10; резервуар для масла 11; приборы контроля и регулирования.

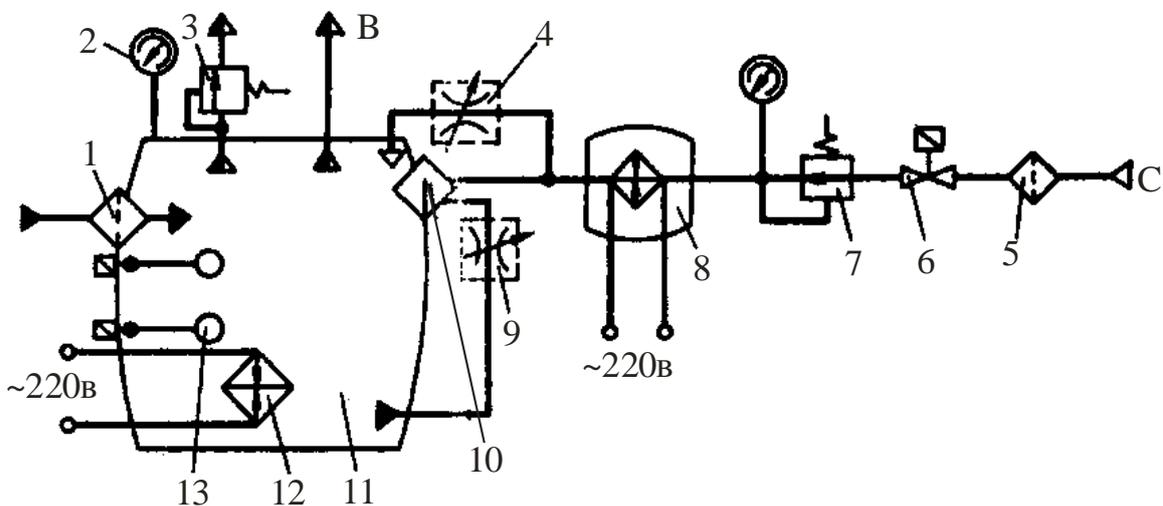


Рис. 36

Генератор работает следующим образом. Сжатый воздух от компрессора или сети С через фильтр-влагоотделитель 5, двухходовой электромагнитный клапан 6, регулятор давления 7, электронагреватель воздуха 8 поступает в маслораспылитель 10 и, создавая разрежение в его эжекционной камере с помощью главного 9 и вспомогательного 4 дросселей, всасывает в эту камеру из резервуара 11 необходимое для распыления количество масла. Воздушно-масляная смесь через отверстие распылителя В по трубопроводам подается к точкам смазки. По трубопроводу А масло подается в резервуар двумя шестерными насосами через фильтр 1 и электроподогреватель 12. Уровень масла в резервуаре контролируется датчиками реле 13 минимального и максимального уровня. Электроконтактный манометр 2 отключает компрессор сжатого воздуха при превышении давления масляного тумана в резервуаре сверх допустимого значения. Одновременно срабатывает предохранительный клапан 3, выпуская аэрозоль в атмосферу.

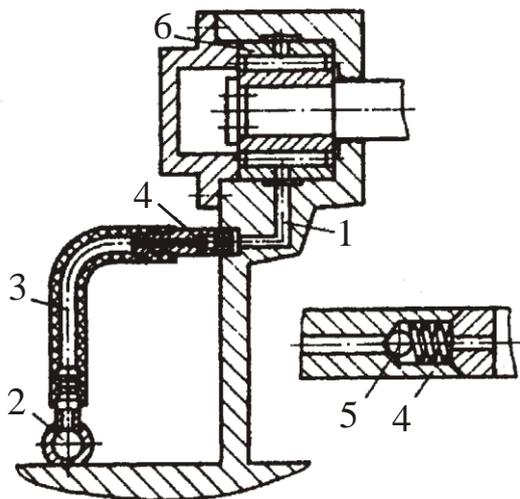


Рис. 37

С помощью пружины обратного клапана в сопле настраивают давление в магистральном трубопроводе для нормальной смазки подшипника при минимальных утечках тумана. Обратный клапан предотвращает слив масла из ванны подшипникового узла в магистральный трубопровод. Схема смазки масляным туманом универсального шпинделя прокатного стана показана на рис. 38.

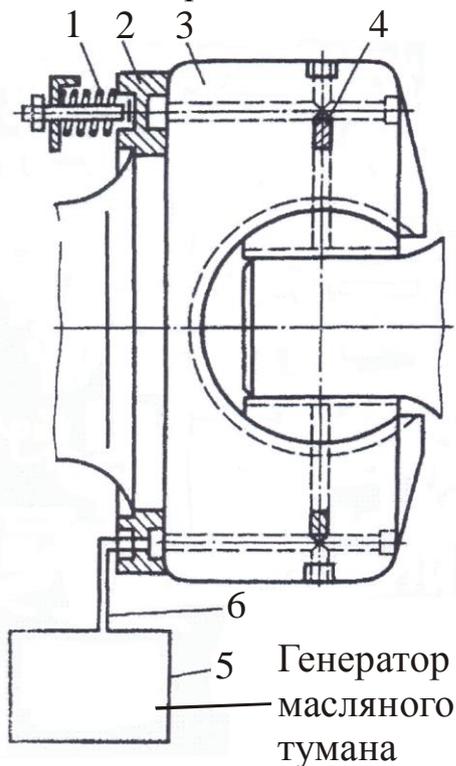


Рис. 38

Туман от генератора 5 по трубопроводу 6 через переходное устройство и далее по каналам в головке шпинделя 3 поступает к конденсатору 4, выполненному в виде концевой напильки, из которого масло подается к поверхности трения бронзовых вкладышей. Переходное устройство выполненное в виде неподвижного бронзового кольца 2 с полостью для аккумуляции масляного тумана, которое пружинами 1 поджимается к торцу головки шпинделя 3, обеспечивая необходимую плотность контакта. В последнее время начали применять другой способ смазки масляным туманом с помощью сопел-смесителей, направляющих аэрозоль на трущиеся поверхности.

Этот способ эффективен при смазке негерметизированных подвижных узлов трения – шарниров цепей конвейеров, речных зацеплений и др. Преимущества этого способа заключаются в исключении возможности конденсации масла из аэрозоли на стенках трубопроводов, а также в возможности распыления не только масел, но и

пластичных смазок при меньших расходах смазочного материала и воздуха, чем при смазке масляным туманом с применением генератора.

На рис. 39 изображена схема работы устройства для подачи масляного тумана на поверхности трения, работающего в сочетании с двухлинейным дозирующим питателем. От дозирующего питателя 3 с отверстиями 1 и 2, соединенными с магистральными трубопроводами, смазка по трубопроводу I поступает в сопло-смеситель 4, к которому от сети по трубопроводу II подается сжатый воздух.

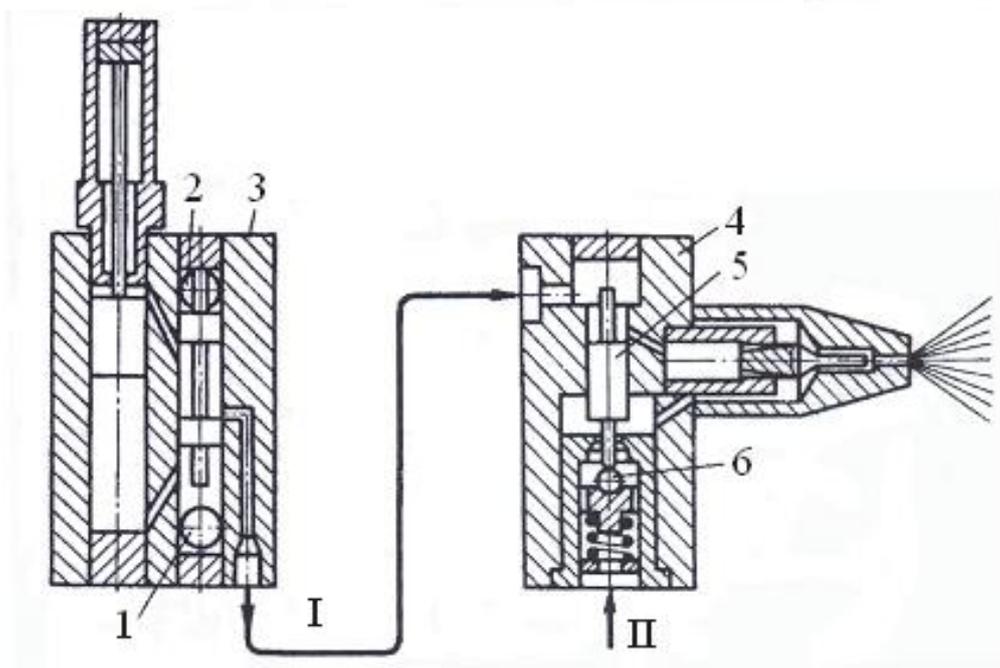


Рис. 39

При подаче смазки плунжер 5 сопла-смесителя отжимает шариковый клапан 6, открывая доступ воздуха в смесительную камеру.

На выходе из сопла смесь смазки и воздуха распыляется и подается в зону трения.

5. СМАЗКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПТМ

Смазка в грузоподъемных машинах имеет многоцелевое назначение. В узлах трения слой смазочного материала разъединяет трущиеся поверхности деталей и переводит трение без смазки в жидкостное или граничное, при которых значительно снижается износ. Его снижение достигается также вследствие смывания жидким маслом с поверхностей трения твердых продуктов изнашивания, нагара и абразивных частиц, уплотнения зазоров густой смазкой и защиты от попадания на поверхности трения абразивных частиц из внешней среды, а также благодаря отводу тепла от поверхностей трения и исключению

неблагоприятных термических превращений в поверхностном слое материала деталей, связанных с тепловыделением при трении.

5.1. Назначение смазки для ПТМ

Смазочный материал снижает силы трения, а в тепловых, гидравлических и пневматических механизмах (поршневые двигатели, насосы, компрессоры) ряда ПТМ повышает компрессию вследствие уплотнения плунжерных соединений. Это положительно влияет на энергетическую эффективность машин, повышая их КПД. Смазка обеспечивает амортизацию ударных нагрузок в сочленениях деталей, снижает шум и вибрации при контактировании металлических поверхностей, способствует созданию благоприятного теплового баланса, необходимого для нормальной работы многих механизмов. Смазка – эффективное средство защиты деталей машин от коррозии. Эту функцию она выполняет не только в процессе работы ПТМ, но и при длительном их хранении в предмонтажный период.

Положительное влияние смазки на работу грузоподъемных машин огромно. Наибольший полезный эффект достигается лишь при правильном выборе смазочных материалов, способов и режимов смазывания, в соответствии с условиями работы и хранения машин.

При выборе смазочных материалов для узлов трения и консервации изделий руководствуются рассмотренными характеристиками. При этом должны тщательно анализироваться и учитываться условия их использования.

При выборе жидких масел следует стремиться максимально приблизиться к условиям жидкостного трения. Предварительный подбор смазочных материалов и режимов смазки для типовых узлов трения (подшипников скольжения и качения, плоских поверхностей скольжения, зубчатых и червячных редукторов, открытых зубчатых передач, зубчатых муфт, цепных передач, ходовых винтов, стальных канатов и др.) проводят по формулам, таблицам и диаграммам, приведенным в специальных справочниках. Расчетным путем трудно полностью учесть влияние режимов работы, технического состояния машины и фактических условий ее эксплуатации (окружающая среда, коэффициент загрузки и т. д.). Поэтому подобранные по справочникам режимы смазки нужно откорректировать с учетом экспериментальных данных или эксплуатационного опыта.

5.2. Подшипники скольжения

Из трех видов подшипников – гидродинамических, гидростатических и граничного трения – первые два в ПТМ применяют редко. В шарнирных соединениях в ряде случаев еще используют

подшипники последнего типа. Их обычно выполняют открытыми с торцов. Поэтому наиболее эффективно их смазывание пластичными смазками, которые не вытекают из узла трения и защищают его от внешних абразивных частиц. Для подачи смазки в шарнир используют колпачковые и ниппельные масленки.

Тип смазки выбирают в зависимости от условий окружающей среды, рабочей температуры и системы смазки. Согласно последним исследованиям для тяжелонагруженных подшипников скольжения кранов рекомендуются долгосрочные смазочные материалы.

5.3. Подшипники качения

Смазывают минеральными маслами и пластичными смазками. Первый способ имеет следующие достоинства: уменьшается пусковой момент; допускаются более высокие скорости вращения и температуры в узлах трения; упрощается замена отработанного смазочного материала; обеспечивается возможность применения простого способа смазки – разбрызгиванием.

Не менее важные достоинства имеет и второй способ: более редкий уход за подшипниками, что особенно важно при изолированных смазочных точках; простота уплотнения узлов трения и отсутствие вытекания из них смазки; более высокая надежность работы таких объектов, где случайное прекращение подачи смазки может вызвать аварию.

Скоростные параметры подшипников ПТМ обычно намного ниже предельных значений для пластичных смазок. Поэтому последние имеют преимущественное применение. Жидкими маслами смазывают лишь подшипники редукторов, где используется возможность подвода смазочного материала разбрызгиванием. Выбор сорта масла в этом случае определяется из условий смазывания зубчатого или червячного зацепления.

При использовании пластичных смазок подшипник может не иметь устройства для подачи смазки и ее закладывают на определенный срок при его сборке. При этом в течение всего межремонтного периода (иногда в течение нескольких лет) смазку не добавляют; например, в подшипниках бегунков эскалаторных ступеней замену смазки производят в среднем через 3...5 (рабочие) и 10 (холостые) лет.

В ответственных подшипниках предусматривают ниппельные масленки для добавления смазки вручную в период между ремонтами, а для подшипников мостовых кранов и других крупных машин предусматривают системы централизованной смазки.

Пластичные смазочные материалы выбирают в зависимости от рабочей температуры, условий работы, системы смазки и частоты вращения вала.

В последнее время проведены исследования, показывающие, что применение в тяжело нагруженных подшипниках кранов долгодействующих пластичных смазок позволяет удлинить сроки их замены до 30 месяцев при среднем и до 24 месяцев – при тяжелом режиме работы.

5.4. Зубчатые и червячные передачи

Передачи закрытого типа (редукторы, коробки передач и др.) обычно смазывают минеральными маслами. Рекомендуемые вязкости масел выбирают в зависимости от материала колес, нагрузок и скоростей. Наибольшее применение имеют масла: цилиндрические 11, 24 и 38, трансмиссионные автотракторное и ТС 14,5 с присадкой ЭФО, промышленные 30 и 45, авиационное МС-20, П-28.

Для червячных редукторов с глобоидным зацеплением, у которых теплоотвод ухудшен по сравнению с обычными червячными редукторами (меньшие размеры при той же мощности и КПД), применяют более вязкие масла: летом – цилиндрическое 52 (вапор) и промышленное 50; зимой – нигрол зимний, автол 10. Периодичность заливки и смены масла зависит от вместимости масляной системы: чем она больше, тем реже производят эти операции. Проверку уровня масла по масломерной игле редуктора рекомендуется проводить ежедневно, а доливание их – по мере убыли. Смену масла при вместимости до 250 л проводят через 3...6 мес.

Открытые зубчатые передачи смазывают обычно пластичными смазками. Для крупногабаритных передач с грубой обработкой зубьев применяют полугудрон и солидол марки С (графитная смазка). В отдельных случаях открытые зубчатые передачи смазывают промышленными маслами (марок 20, 30, 45). Периодичность смазывания пластичными смазками – 5...7 суток, жидкими маслами – раз в смену при постоянной работе и раз в 2...3 суток при периодической работе.

5.5. Зубчатые муфты

Для смазывания зубчатых муфт применяют главным образом трансмиссионное автотракторное масло и цилиндрическое 24. Периодичность доливания – раз в неделю, периодичность замены – 4...6 мес, но чаще всего – при ремонте.

5.6. Стальные канаты

В ПТМ чаще всего применяют стальные канаты с мягким (органическим) сердечником, пропитанным смазочным материалом при изготовлении каната. Его назначение – не только придавать канату гибкость и эластичность, но и смазывать его изнутри. С целью

предохранения от коррозии канаты при изготовлении смазывают так, чтобы смазочным материалом были покрыты поверхности как внутренних, так и наружных проволок. Наличие несмазанных мест ведет к образованию точечной коррозии.

Если канат не смазывать в процессе работы, то органический сердечник постепенно пересыхает и легко разрушается. Кроме того, такой сердечник впитывает влагу, что вызывает коррозию внутренних проволок и сокращает срок службы каната.

Смазка канатов повышает их циклическую выносливость. Поэтому канаты, как правило, смазывают и в процессе эксплуатации, что при отсутствии внешнего абразивного загрязнения способствует повышению износостойкости канатов, барабанов и блоков.

Важнейшим фактором, определяющим успешную эксплуатацию канатов, является их систематическое и правильное техническое обслуживание. Главные операции здесь – чистка и смазка канатов. В связи с этим следует уделять особое внимание периодичности обслуживания монтажных канатов, выбору типа смазки и способов ее нанесения на канаты.

Стальные канаты монтажных приспособлений и устройств работают в сложных условиях и подвержены вредному воздействию атмосферы, паров кислот и щелочей, газов, низких и высоких переменных температур. Они также подвергаются механическому и абразивному износу от взаимодействия с роликами, породой, песком, углем и другими материалами. Высокое содержание углерода в стали канатной проволоки значительно ускоряет процесс разрушения канатов.

Точечная коррозия, образующаяся на поверхности проволок, ускоряет процесс усталости металла и является одной из причин выхода канатов из строя. Смазка элементов стальных канатов соответствующими материалами в процессе их изготовления, хранения и эксплуатации – наиболее распространенный и эффективный метод предохранения от коррозии, поэтому она обязательна.

Смазка уменьшает силы трения между элементами каната, предохраняет проволоки от истирания вследствие трения их друг о друга, о поверхности ручьев роликов и барабанов. Смазка канатов предохраняет их от образования местных хрупких мартенситных участков, образующихся в проволоке под воздействием трения и ударов в процессе эксплуатации каната. Смазка способствует длительной сохранности органического сердечника в канате.

Смазка эффективна только при взаимодействии с чистым металлом проволоки. В процессе эксплуатации каната в смазке накапливаются абразивные вещества, способствующие ускорению износа каната. Поэтому бывшие в эксплуатации канаты перед смазкой необходимо тщательно очищать от грязи, старой смазки, продуктов износа и коррозионных

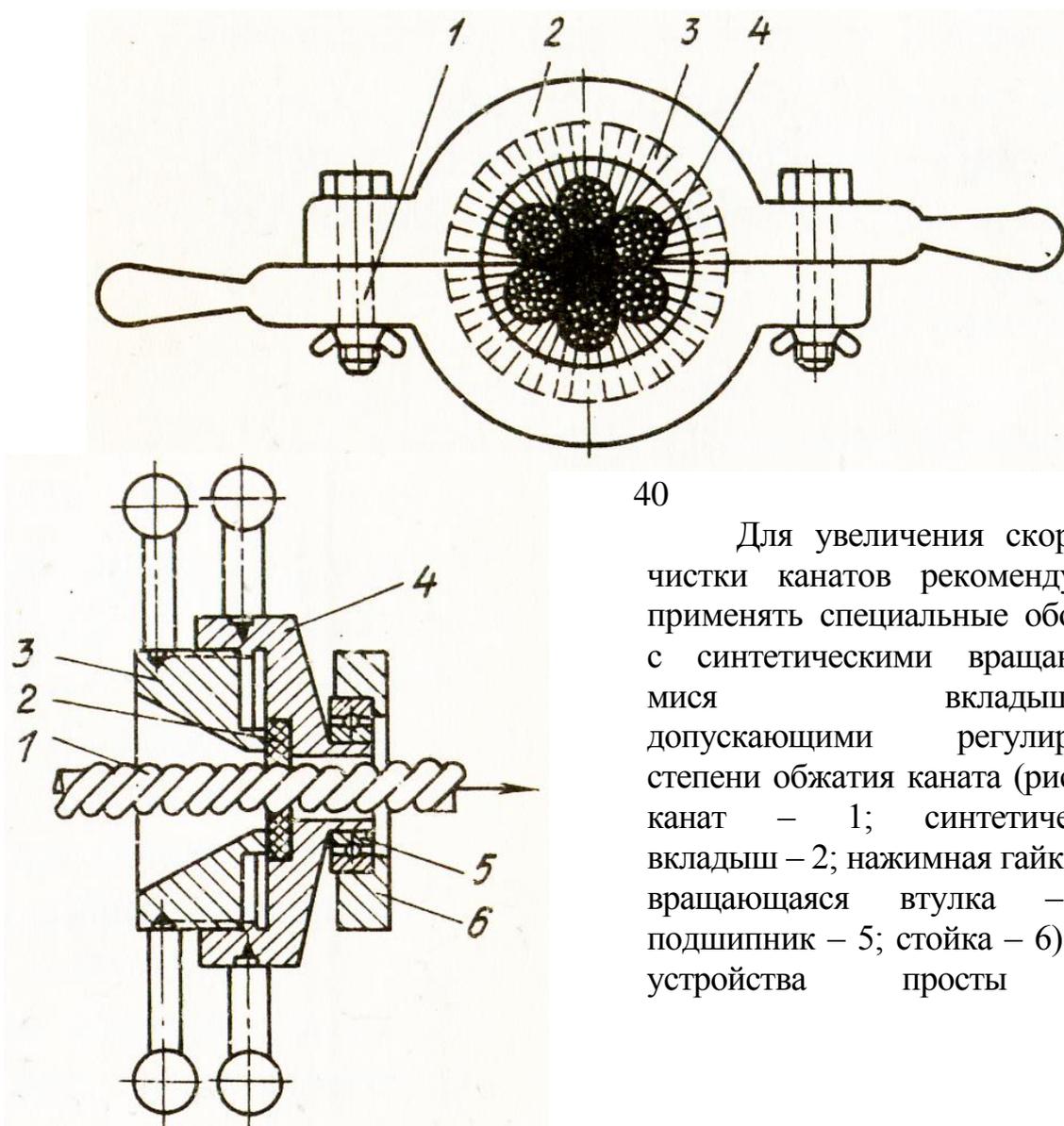
налетов. Для чистки канатов следует применять:

- специальные проволочные щетки;
- перегретый пар;
- сжатый воздух (пескоструйные аппараты);
- горячую воду, газалин, бензол или бензин.

Очищать канаты из оцинкованной проволоки металлическими щетками или сжатым воздухом с песком запрещается, так как это ведет к повреждению цинкового покрытия.

После чистки канат следует обязательно протирать обтирочными материалами, смоченными в бензине или бензоле. Применение керосина или других не указанных растворителей запрещается, так как их наличие в органическом сердечнике и зазорах между элементами каната в дальнейшем способствует растворению смазочного материала.

Наиболее простой и достаточно эффективный способ чистки канатов – применение проволочных щеток, надеваемых на канат и перемещаемых по нему вручную (рис. 40: стяжные винты – 1; корпус – 2; щетка – 3; канат – 4) или обрабатывающих канат в потоке с другими устройствами (см. далее).



40

Для увеличения скорости чистки канатов рекомендуется применять специальные обоймы с синтетическими вращающимися вкладышами, допускающими регулировку степени обжатия каната (рис. 41: канат – 1; синтетический вкладыш – 2; нажимная гайка – 3; вращающаяся втулка – 4; подшипник – 5; стойка – 6). Эти устройства просты по

Рис. 41.

конструкции, обеспечивают высокий срок службы и позволяют выполнять механизированную чистку канатов и в потоке с другими операциями.

Перед смазкой каната, бывшего в эксплуатации, необходимо выборочно определить (в трех местах по длине каната) диаметр каната с точностью до 0,1 мм при помощи штангенциркуля и найти степень усталостного и абразивного износа наружных проволок, применив микрометр.

Защитный смазочный материал одинаково необходим для всех типов канатов, изготавливаемых из светлой и оцинкованной проволоки. Нанесение смазочного материала внутрь каната при его изготовлении не исключает необходимости ее систематической замены в процессе эксплуатации.

Для предотвращения возможности возникновения очагов местной коррозии при смазке канатов необходимо следить, чтобы все сечение каната было пропитано смазочным материалом, а наружное покрытие необходимо, чтобы было сплошным. Сплошной защитный слой смазки никогда не должен нарушаться.

Для исключения возможности проникновения влаги под слой смазочного материала наносить ее на канат следует при низкой влажности воздуха. По этой же причине, а также для повышения качества смазки канатов в зимнее время смазочный материал необходимо подогреть до 60...70°C.

Средняя рекомендуемая заводами-изготовителями норма расхода смазочных материалов на 1 т каната – 70 кг. В случае применения способа смазки канатов с обдувом горячим воздухом, рекомендуемая норма уменьшается до 50 кг на 1 т канатов. При смазке новых, ранее не смазанных канатов, норма удваивается.

Для смазки канатов в условиях эксплуатации установлена следующая норма расхода смазочных материалов – 0,3 кг на каждый миллиметр диаметра отрезка каната длиной 100 м.

Например, для смазки каната $\varnothing 19,5$ мм, длиной 300 м требуется: $0,3 \times 19,5 (300 : 100) = 17,55$ кг.

Наиболее простой способ смазки канатов при перематывании с барабана на катушку – это окунание его в ванну со смазочным материалом, нагретым до температуры 50...60°C.

Канат пропускается через три ролика, один из которых (средний) прогибает канат к дну ванны, а два других установлены по ее краям (рис. 42: средний ролик – 1; ванна – 2; канат – 3; направляющие ролики – 4; форсунка – 5). Рекомендуемая скорость протягивания каната через смазочное устройство, обеспечивающая качественное нанесение смазки, – 1...2 м/мин.

Для снятия излишков смазочного материала эксплуатируемых канатов грузоподъемных механизмов разработано устройство с установленными в нем кольцевыми сальниками, выполненными из резины или синтетического материала (рис. 43: воронка – 1; кольцевой сальник – 2;

канат – 3; подвеска воронки – 4). Аналогичное устройство устанавливают на подвижном блоке полиспаста для смазки грузовых канатов в процессе работы.

Для периодической смазки канатов расчалок, вант и тяг, установленных под углом к горизонту, применяют специальные приспособления с резервуаром для смазочного материала, который выполнен разъемным из двух половин труб.

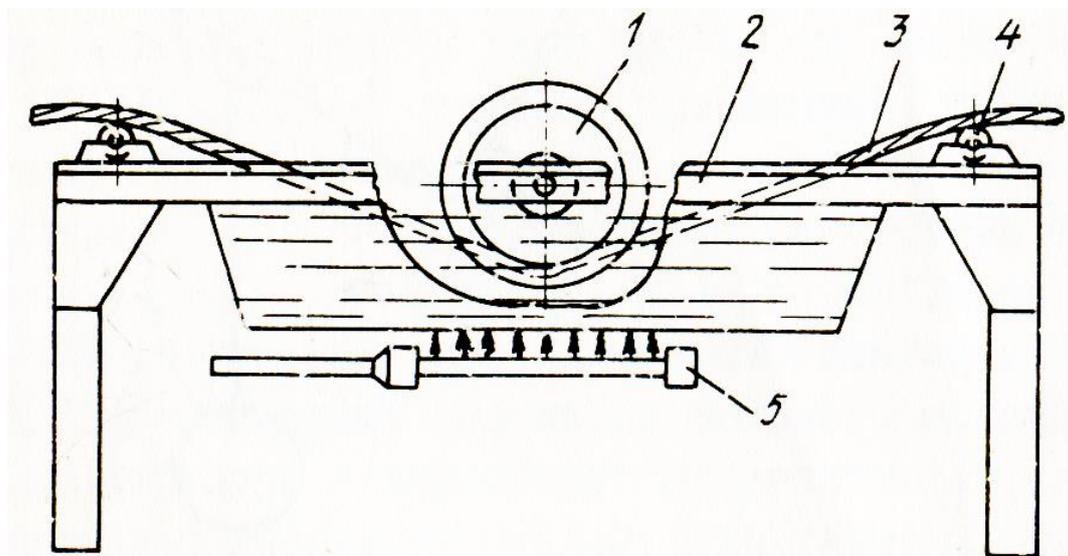


Рис. 42.

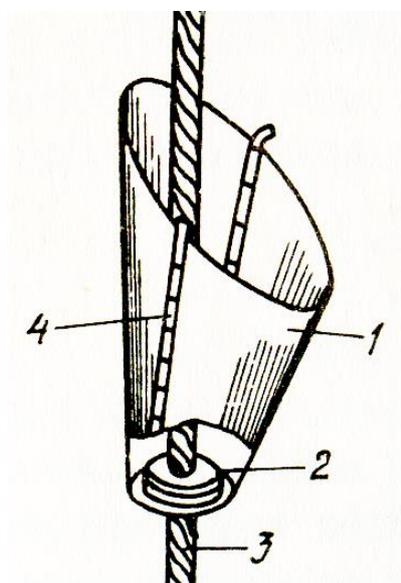


Рис. 43.

По торцам резервуара установлены заглушки с сальниковыми втулками, соответствующими диаметру сматываемого каната. Приспособление устанавливают сверху расчалки, заполняют смазочным материалом и при помощи веревки перемещают вдоль расчалки.

Для устойчивости устройство снабжено дополнительным грузом (рис. 44: канат – 1; сальник – 2; заглушка трубы – 3; труба – 4; проушина для тяговой веревки – 5; противовес – 6).

При большом объеме работ с канатами следует применять универсальные машины (известна конструкция машины Батайского завода монтажных заготовок) для чистки, смазки, перематывания и измерения длины канатов, комплексно выполняющие все основные технологические операции по обслуживанию канатов. Производительность такой машины в пять раз выше, чем при чистке и смазке канатов вручную.

В порядке исключения при отсутствии специальных смазочных устройств допускается смазка канатов вручную при помощи жесткой кисти или обтирочных материалов, намотанных на деревянную ручку. Во избежание ранения рук рабочего выступающими концами проволок,

наносить смазку непосредственно руками запрещается. Канаты в бухтах допускается смазывать погружением в ванну со смазкой.

Канаты отечественного производства при изготовлении смазывают универсальной стандартной смазкой 39У, которая не во всех случаях удовлетворяет современным требованиям, в частности, при низких или высоких температурах, когда вследствие затвердевания, растрескивания или вытекания и налипания на ролики она затрудняет нормальную эксплуатацию канатов.

Для смазывания канатов при эксплуатации применяют минеральные масла (осевое Л, осевое З, полугудрон) и пластичные смазочные материалы. Промышленность выпускала высоковязкие, тугоплавкие, специальные консистентные канатные смазочные материалы типа НМЗ-3у НМЗ-4 с примерно одинаковой температурой каплепадения (60...75°С) для районов с умеренными климатическими условиями. Для северных районов рекомендуют смазочные материалы "Торсиол 35" и "Торсиол-55" (ГОСТ 20458-75) с температурами замерзания, соответственно, -35°С и -60°С.

Смазочный материал Е-1 предназначен для пропитки органических сердечников; Е-ПТ – для тех же целей, на случай применения его в тропиках. Эффективность пропитки органического сердечника повышается, если содержание избыточной влаги в нем снизить до 1...2%, а затем подвергнуть его противогнилостной и антикоррозионной пропитке под вакуумом.

Два этих типа смазочных материалов не только обеспечивают лучшую работоспособность и повышенную долговечность канатов в широком

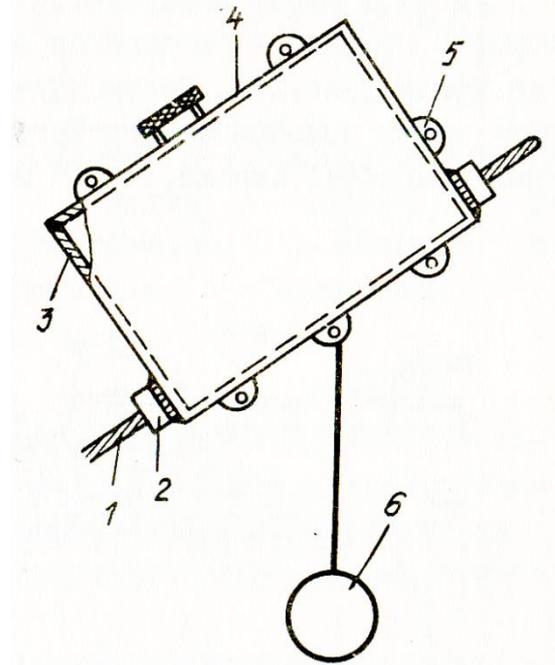


Рис. 44.

диапазоне низких температур, но и рекомендуются в качестве консервантов при длительном хранении канатов. Эти материалы, в сравнении с ранее применявшимися, обладают рядом преимуществ: повышенной – в 1,5...2 раза адгезией с поверхностью металла, лучшими защитными свойствами в условиях действия агрессивных сред, а также меньшим поглощением пыли.

Данные по долговечности канатов, смазанных тугоплавкими консистентными смазочными материалами, показывают, что средний срок их службы на подъемных механизмах на 15...40 % выше долговечности канатов, которые обработаны техническим вазелином.

Выбор рекомендуемого способа смазки канатов производится заказчиком и согласовывается с заводом-изготовителем через органы снабжения. В случае отсутствия в заказе типа смазки выбор ее осуществляет поставщик канатов.

При отсутствии у потребителя указанных типов смазочных материалов допускается применение специальной смазочной смеси, приготовляемой на рабочем месте по следующему рецепту (%):

- масляный гудрон – 68;
- битум марки Ш – 10;
- канифоль – 10;
- технический вазелин – 7;
- графит – 3;
- озокерит (горный воск) – 2.

В крайнем случае для этих целей готовят смесь, состоящую на 90 % солидола с 10 % битума марки Ш.

Все применяемые смазочные материалы не должны содержать вредных веществ, вызывающих коррозию металла. Запрещается одновременное применение для одного каната смазочных материалов разного состава. В настоящее время единые нормы, регламентирующие периодичность замены смазки стальных канатов, отсутствуют, так как они зависят от конкретных условий эксплуатации канатов и устанавливаются опытным путем в результате наблюдений за состоянием канатов, степенью сохранности покрова смазки и его чистоты с учетом следующих предельных сроков:

- канаты, хранящиеся на складе, очищают и смазывают не реже одного раза в шесть месяцев в зависимости от способа хранения и результатов осмотра;
- систематически работающие канаты смазывают один раз в три месяца с чисткой один раз в полгода;
- эпизодически работающие канаты смазывают и очищают перед каждым применением, но не реже одного раза в год.

Периодичность обслуживания канатов, работающих на роликах под действием значительных нагрузок (при значениях статического

коэффициента запаса прочности менее 4,0), должна быть сокращена.

Канаты, поступившие с завода-изготовителя с защитным консервационным смазочным материалом, перед передачей в работу (независимо от срока хранения и их состояния) должны быть очищены и смазаны соответствующим эксплуатационным смазочным материалом. Смазочный материал необходимо приобретать или изготавливать в объемах, не превышающих его месячную потребность, хранить его требуется в сухом помещении. Применяемый канатный смазочный материал необходимо подвергать химическому анализу на отсутствие кислоты и щелочи. Нельзя смешивать различные сорта смазочных материалов и допускать загрязнения их пылью или абразивными веществами. С целью предохранения смазочных материалов от загрязнения и высыхания их следует хранить в закрытом сосуде, снабженном краном для розлива в раздаточную тару. При переливании в тару смазочный материал необходимо подогреть, а для предотвращения попадания в него пыли в условиях монтажной площадки следует пользоваться перекачивающими устройствами.

Вопрос о смазке в условиях запыленности следует решать опытным путем. Перед смазыванием канат должен быть тщательно очищен. Вручную его очищают с помощью металлических щеток или пропусканием со скоростью 0,25...0,4 м/с через вороток с плашками, внутренняя поверхность которых по диаметру и форме соответствует поверхности каната. Применяют также приспособления других конструкций.

Смазывание проводят с помощью различных лубрикаторов (масленок), работающих по принципу подачи смазочного материала в воронку, каплями, распыливанием с помощью сжатого воздуха, промазыванием щеткой и т. д. Для разогрева тугоплавкой смазки применяют баки с теплоносителями.

5.7. Цепные передачи и тяговые цепи

Основное назначение их смазывания – снижение износа деталей шарниров и зубьев звездочек. Кроме того, масло выполняет демпфирующие функции, смягчая удары шарниров о зубья звездочек, а также снижает нагрев шарниров и шум при работе передачи. Пластичная смазка защищает шарниры от абразивов. Цепи смазывают после изготовления и в процессе эксплуатации, используя для этой цели минеральные масла и пластичные смазочные материалы. На заводе-изготовителе это делают, как правило, погружением их в пластичный смазочный материал (солидолы С или УС, графитовая, консталин синтетический УТ-1), разогретую до температуры не более 55 °С, или окунаем в жидкое масло. Цепные передачи смазывают преимущественно нефтяными маслами. Выбор способа смазки и сорта

масла определяется условиями работы (скорость движения, продолжительность работы и др.). Тяговые цепи смазывают жидким маслом вручную или капельницами, а также пластичными смазками с подачей их в шарниры с помощью специальных лубрикаторов. Периодичность их смазки – 1...2 раза в месяц.

5.8. Крановые колеса и рельсы

В зарубежной практике смазывают реборды колес и боковые поверхности головок рельсов с целью уменьшения их схватывания и изнашивания при перекосах крана. Твердую смазку наносят на реборды колес, с которых она переносится на боковые поверхности рельса. Твердый смазочный материал (графитизированный уголь, дисульфид молибдена) используется в виде прутков прямоугольного сечения. В отечественной практике смазывают реборды колес и головок рельсов на закруглениях железнодорожных путей, используя рельсовую смазку ЖР по ТУ-32-ЦТ-553-73.

5.9. Техническая документация на смазку

Техническая документация на смазку должна содержать исчерпывающие данные о том, какие узлы трения подлежат смазыванию, какие смазочные материалы при этом должны применяться в зависимости от возможных условий работы машин данного типа, а также данные о периодичности смазки и промывки узлов трения (смены смазки). Места (точки) смазки обычно указывают на карте смазки машины – схематическом ее чертеже с видами и разрезами основных узлов трения, дающими полное представление о количестве смазочных точек и местах их расположения.

Смазочные материалы, подлежащие применению при смазке машины, и их основные свойства удобнее указывать в отдельной ведомости. Для каждого узла трения следует подобрать не только основные виды смазочных материалов, но и их заменители. Следует иметь в виду, что серийные ПТМ являются изделиями широкого и универсального применения. Их могут эксплуатировать как в закрытых помещениях, так и на открытом воздухе, в летнее и зимнее время, на Севере и в южных районах, а также за рубежом, включая тропические районы земного шара. Все эти особенности должны быть учтены при составлении ведомости на смазочные материалы и их заменители.

Режимы смазки узлов трения удобно указывать в отдельной ведомости по установленной форме. Обозначение точек смазки и номера сортов смазочных материалов в этой ведомости должны соответствовать обозначениям на карте смазки и номерам в ведомости смазочных материалов. При поставке машин на экспорт техническая документация

составляется на русском и соответствующем иностранном языке.

5.10. Техника смазки и смазочное хозяйство

Устройства для смазки. Подачу пластичных смазок к индивидуальным точкам осуществляют при помощи ручных шприцев различных конструкций. При объединении многих смазочных точек в системы централизованной смазки используют ручные станции, что позволяет механизировать процесс смазки.

Из систем жидкой смазки в ПТМ наибольшее применение имеет картерная с заливкой масла в корпус или картер на длительный срок и подводом его в зону смазки окунанием (на высоту одного зуба) или струей (циркуляционная система).

Смазка окунанием проста и безотказна в эксплуатации и имеет преимущественное применение. Струйная циркуляционная смазка позволяет осуществлять непрерывную очистку масла, точно дозировать его количество, обеспечивает лучший отвод тепла, но более сложна, требует квалифицированного и внимательного обслуживания (надзор за исправной работой насосов, указателей подачи масла, фильтров, реле, нагревающих и охлаждающих устройств). Однако применение ее в ответственных высокоскоростных передачах более эффективно.

5.11. Замена смазочных материалов

Пластичные смазки в узлах трения заменяют при очередном ремонте, а в процессе эксплуатации лишь добавляют их. Жидкие масла более подвержены старению. Кроме того, их свойства меняются с изменением температуры окружающей среды. Поэтому их чаще обновляют в процессе эксплуатации. В ряде ПТМ, работающих на открытом воздухе, проводят также сезонную замену масел: весной переходят на летние, более вязкие сорта масел, а осенью – на зимние, менее вязкие. Сроки их замены устанавливают, руководствуясь справочной литературой, опытом эксплуатации и специальными исследованиями. Интенсивность старения смазочных материалов зависит от их исходного качества, напряженности работы механизма, попадания в масло внешних примесей и разжижения горючим и т. д. Увеличение периода эксплуатации масел может вызвать повышенный износ, а преждевременная их смена – увеличение эксплуатационных расходов. При фильтрации масел, добавлении присадок, использовании влагопоглотителей срок их службы можно увеличить вплоть до капитального ремонта при некотором повышении энергетических потерь на трение, что в практике ПТМ допустимо. При замене масел проводят тщательную промывку узлов трения и смазочных систем с целью удаления продуктов износа и абразивных частиц, попавших из внешней среды.

5.12. Смазка грузоподъемных машин

Смазка узлов трения на кране может быть индивидуальной, когда смазочный материал из одного смазочного прибора подается к одной смазываемой точке, и централизованной, когда смазочный материал из одного смазочного прибора подается одновременно к нескольким смазываемым точкам. По принципу работы системы смазки разделяются на следующие типы:

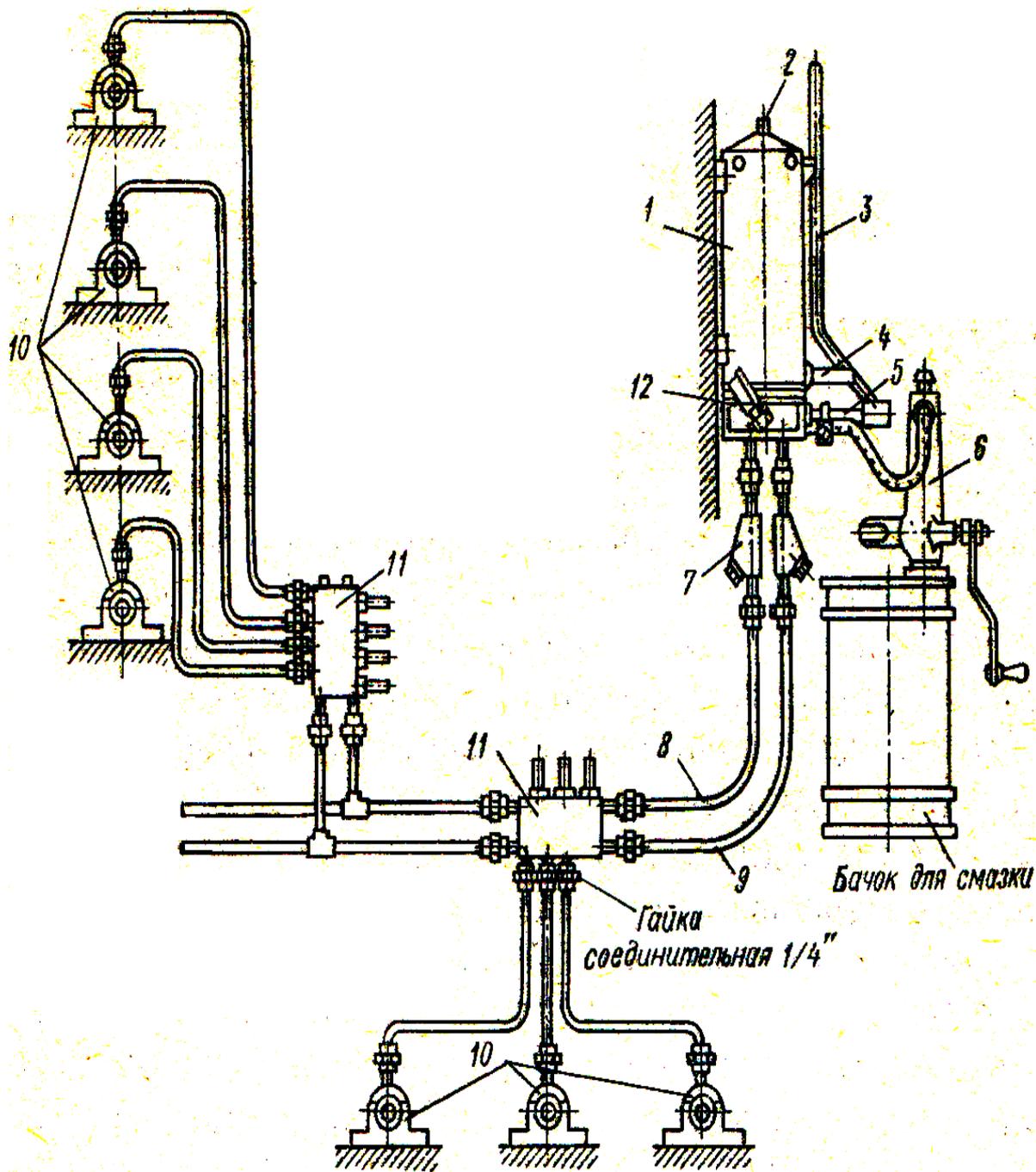
- проточные, когда смазочный материал подается к местам смазки периодически, протекает по поверхности трения, вытесняется из узла трения и обратно не поступает;
- циркуляционные, когда масло, залитое в бак, непрерывно подается в места смазки, смазывает их, возвращается в бак, фильтруется и снова подается в место смазки в течение всего времени работы машины. Корпуса подшипников и редукторы снабжаются пресс-масленками, управляемыми при помощи специальных шприцев консистентной смазкой.

Этот способ наиболее простой, так как не требует специальных устройств, но неудобный, т.к., например, в мостовом кране число точек смазки может исчисляться десятками. И все они расположены в разных местах, на значительном расстоянии. В настоящее время часто на кранах применяют установки для централизованной смазки, позволяющие обслуживать одновременно десятки смазочных точек, чем облегчается уход за краном, экономятся смазочные материалы, улучшается контроль за смазкой.

Установки централизованной смазки могут быть ручными и автоматическими с приводом от электродвигателя. В крановых механизмах консистентная смазка к смазываемым точкам подается через большие промежутки времени, и поэтому там применяют ручные установки, более легкие и простые, чем автоматические.

Отечественная промышленность выпускает установки для ручной централизованной смазки типа СРГ (станция ручной густой смазки – рис. 45), состоящие из двух основных узлов: резервуара для запаса смазки и нагнетательного ручного насоса. В резервуаре ручной станции густой смазки расположен поршень, шток которого 2 имеет выход наружу под крышку. Поршень своей массой постоянно давит на находящуюся под ним смазку.

Резервуар заполняется через заправочный штуцер с помощью



насоса 6. При этом смазка проходит через фильтр в резервуар под поршень, который поднимается по мере наполнения резервуара. Наполнение прекращается при появлении на штоке поршня, выходящем через отверстие в крышке резервуара, риски с буквой П, что означает "полно". Насос присоединяется к станции только при заполнении резервуара станции смазкой. При качании рычага 3 плунжер 5 проталкивает смазку через обратный клапан 7 в мазепровод 8. Из мазепровода смазка поступает в автоматические питатели 11, а из них — в смазываемые точки 10. Рычаг качают до тех пор, пока не сработают

все автоматические питатели, что заметно по манометру 12, отмечающему давление, при котором сработают все автоматические питатели. После этого рычаг 3 ставится в исходное положение, а мазепровод 8, находящийся под давлением, разгружается переводом золотника 4 в другое крайнее положение. На этом заканчивается первый цикл работ. Следующая порция смазки к узлам трения подается через мазепровод 9 нагнетание производится в той же последовательности.

Для смазки зубчатых и червячных редукторов применяется картерная смазка, при которой масло заливается в корпус редуктора до определенного уровня так, что одно или несколько колес частично погружены в масло и, вращаясь, подают масло на другие колеса. При достаточно большой скорости вращения колеса масло разбрызгивается по всему редуктору и заполняет всю внутреннюю полость масляным туманом.

5.13. Сбор и утилизация отработанных масел

Смазочные масла – дорогие и дефицитные нефтепродукты. При бессистемном подходе отработанные масла становятся источником загрязнения окружающей среды. Поэтому тщательный сбор отработанных масел имеет большое хозяйственное значение.

Отработанные масла после регенерации используют повторно. Для всех отраслей народного хозяйства установлены обязательные нормы сбора индустриальных и других отработанных масел (для машиностроения – 19 % расхода свежих масел). При сливе отработанного масла не допускают дополнительного загрязнения и обводнения. С этой целью следят за чистотой тары и инвентаря (насосов, шлангов, воронок и т. д.). Отработанные масла хранят отдельно по группам и сдают на нефтебазы (при потреблении до 50 т в год) или регенерируют на предприятии (отстаиванием, фильтрованием, сепарацией, промывкой водой, адсорбцией, сернокислотной и щелочной очисткой) и используют по прямому назначению в чистом виде или со свежим маслом той же марки.

5.14. Организация смазочного хозяйства

Работой по организации смазочного хозяйства на предприятии руководит его заведующий, подчиняющийся главному механику предприятия. В его функции входит решение всех вопросов, связанных с организацией смазочного хозяйства: составление заявок на маслопродукты для предприятия в целом; контроль реализации заявок и правильности хранения, выдачи и использования маслопродуктов; организация централизованного снабжения потребителей нефтепродуктов, сбора и регенерации отработанных масел и т. д.

Ремонт смазочных систем, регулировку сложных смазочных

приборов и другие подобные работы выполняют слесари по ремонту смазочных систем. Заведующий центральным смазочным складом отвечает за организацию слива поступающих масел, их хранение и выдачу потребителям. В обязанности заведующего службой смазки предприятия входят работы, часть которых перечислена ниже.

1. Утверждение цеховых заявок на смазочные материалы и сма-охлаждающие жидкости и составление заявок для предприятия в целом.

2. Слежение за своевременным поступлением на предприятие смазочных материалов в требуемом количестве и в соответствующем ассортименте.

3. Руководство механизацией трудоемких работ в смазочном хозяйстве (установка электротельферов для укладки и выдачи тарных нефтепродуктов, установка насосов с механическими приводами и т.п.).

4. Контроль (через заводскую лабораторию) качества поступающих на предприятие смазочных материалов и смазочно-охлаждающих жидкостей.

5. Установка нормы единовременного запаса хранения нефтепродуктов на центральном масляном складе и организация обеспечения масляных хранилищ соответствующим оборудованием и тарой.

6. Разработка инструкции по хранению и выдаче смазочных материалов на центральном масляном складе, по уходу за оборудованием и масляным инвентарем склада; контроль за выполнением этих инструкций.

7. Организация оборудования специальных помещений по уходу и ремонту мелкой тары и смазочно-заправочного инвентаря. Организация централизованного снабжения смазочными материалами цехов-потребителей.

8. Рациональный учет расхода смазочных материалов на предприятии в целом. Составление лимитов расхода смазочных материалов по каждому цеху и составление лимитных карт и ежемесячных графиков доставки смазочных продуктов в цеха. Составление карт и инструкции по смазке отдельных видов оборудования.

9. Участие в комиссиях по приемке нового и вышедшего из ремонта оборудования смазочного хозяйства. Выявление причин остановки (и выхода из строя) оборудования из-за нарушения смазки и устранение этих причины.

10. Организация регенерации масел. В общих производственных затратах расходы на смазочные материалы занимают значительный удельный вес. Поэтому необходимо изыскать способы их экономного расходования и повторного использования. Для этого осуществляют сбор и регенерацию отработанных масел. При этом сбор масел должен быть обеспечен по признаку их целевого назначения, т. е. по сортам и маркам. Собранные отработанные масла восстанавливают различными способами, в

том числе отстаиванием или очисткой химическими растворами. Практика показывает, что после регенерации для повторного использования в среднем возвращаются до 75% собранных масел.

При организации смазочного хозяйства необходимо составить перечень машин и оборудования, которые необходимо периодически смазывать; определить точки смазывания и ассортимент смазочных материалов; установить периодичность смазывания; разработать нормы расхода смазочных материалов; оборудовать рабочие места смазчиков; организовать сбор и регенерацию отработанных нефтепродуктов (смазочных масел).

Основным документом организации смазочных работ является карта (таблица) смазывания, на которую нанесен эскиз машины или оборудования, указаны (или пронумерованы) точки смазывания и метод смазывания; назначен режим смазывания; указаны ассортимент и нормы расхода смазочных материалов, вместимость картеров, заправочный объем узлов трения и подшипниковых опор.

На предприятиях, например автотракторостроения, в эксплуатации находится разнотипное оборудование (станки, автоматические линии и т. п.). Смазывание частично выполняется станочником, частично – смазчиком, который заполняет и заменяет масло в картерах, снабжает станочников заполненными масленками. Чтобы использовать смазочные материалы по назначению, масленку маркируют, т. е. на каждую масленку наносят отличительную полосу, указывающую, какой смазочный материал в ней содержится.

После каждой смены станочники возвращают масленки и шприцы смазчику, который проверяет их состояние, очищает и заполняет для следующей смены. Рабочее место смазчика должно быть специально оборудовано: железным шкафом для хранения инструмента и смазочных материалов, железным ящиком для обтирочного материала, бачками для свежего масла и для отработанного масла, масленками, шприцами, воронками, ключами, отвертками и т. п.

В непосредственной близости от рабочего места смазчика должен находиться противопожарный инвентарь: ящики с песком, лопата, кошма, пенные огнетушители. Смазчик обеспечивается необходимыми нормативными документами: картами (таблицами) смазывания, нормами расхода смазочных материалов, планом-схемой оборудования цеха и сводным графиком по смазыванию оборудования.

5.14.1. Пример схемы и организации процесса смазки технологического оборудования

Смазка станков исключительно важна. При нерегулярной смазке станки работают на грязной масляной жиже в притир, а то и просто насухо. Если плохо смазываемый станок не вышел преждевременно из строя, то

результат небрежного обращения с ним обнаруживается при очередном плановом ремонте и выражается в непомерно большом износе.

Таким образом, недосмотр в смазке приведет к большому объему ремонта станка. На рис. 46 представлена схема смазки токарно-винторезного станка.

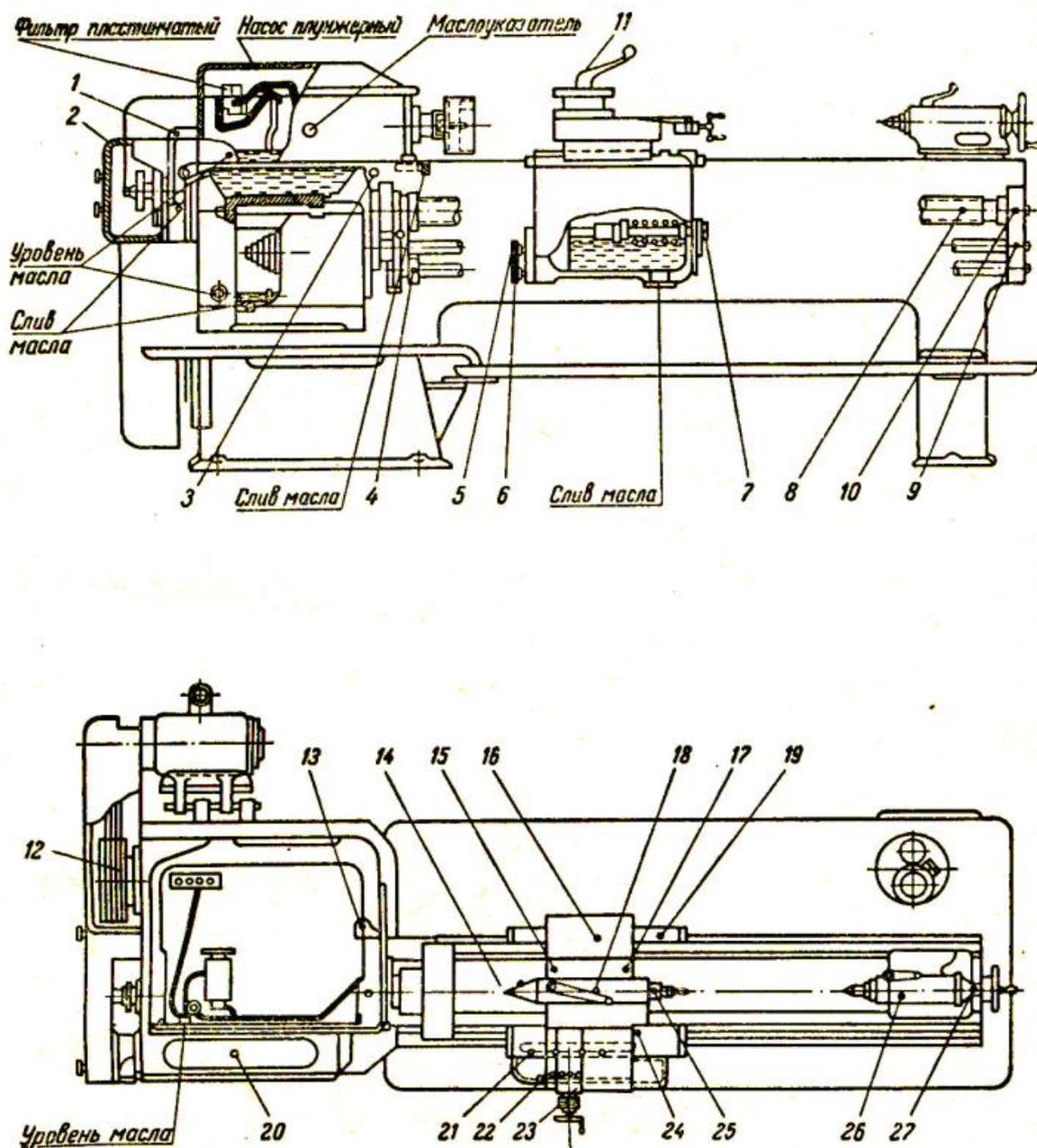


Рис.46.

Для обеспечения металлорежущего оборудования регулярной и надежной смазкой необходимо обязательное решение следующих вопросов:

- рациональный подбор смазочных материалов и периодический контроль их качества;

- наличие разработанных и утвержденных карт смазки, отражающих нормы расхода масла, способ и режим смазки;
- знание схем и правил смазки ее исполнителями.

Смазка в металлорежущих станках бывает следующих видов: масляная; газовая; водяная.

Масляная смазка. Основной смазкой металлорежущих станков является масляная смазка (централизованная и точечная). Смазка минеральными (нефтяными) маслами, осуществляемая строго по установленному режиму, хорошо оберегает сопрягающиеся рабочие поверхности деталей и продляет долговечность станков и машин. Благоприятное влияние смазки на уменьшение интенсивности изнашивания заключается в следующем. Смазочные материалы в очень тонких слоях под двухсторонним влиянием трущихся поверхностей металлов обнаруживают исключительные фрикционные свойства. Молекулы смазочных материалов в граничных слоях обеспечивают достаточную прочность на сжатие и легкость сдвигов в горизонтальном направлении. При скольжении смазываемых поверхностей образуется небольшой коэффициент трения.

Масляная смазка осуществляется насосами и ручными масленками. При централизованной смазке смазываемые места могут питаться жидкой (капельной) смазкой и смазкой в среде масляного тумана. Смазка масляным туманом применяется для быстровращающихся деталей станков.

Места смазки в каждой модели станка определяются схемой смазки, которую обязан знать станочник, работающий на станке, и слесарь (смазчик), обслуживающий станок.

Преимущественной в масляной смазке является централизованная (принудительная) смазка. На централизованную смазку обычно переводится наиболее ответственное, решающее и уникальное оборудование, а также крупногабаритные машины. Централизованная смазка этих видов оборудования обеспечивает им большую надежность в работе.

Для масляной смазки станков (табл. 5.1) применяются нефтяные масла:

Таблица 5.1

Станки	Применяемое масло	Вязкость при 50°, сСт	Температура застывания, °С
Токарные, револьверные, полуавтоматы и автоматы, фрезерные и шлицефрезерные, зубообрабатывающие, горизонтально-расточные, строгальные, долбежные, резьбовые и болтонарезные, резьбонакатные, отрезные и др.	Индустриальное 20, 30, 45	17...23 27...33 38...52	- 20 -15 -10
Сверлильные, заточные	Индустриальное 20, 30,	17...23 27...33	- 20 -15
Токарно-карусельные, трубо- и муфторезные	Индустриальное 45	38...52	-10
Координатные, алмазно-расточные, шлифовальные, хонинговальные, доводочные, отделочные	Индустриальное 12, 20, 30	10...14 17...23 27...33	- 30 - 20 - 15

Для неназванных типов станков марка масла подбирается по однотипному оборудованию. Нормы расхода масла устанавливаются по единой система ППР.

Нефтяные масла должны быть чистыми, бескислотными, не содержать воды и твердых частиц. Марка масла, применяемого в разные периоды года, указывается по каждому типу оборудования в картах смазки или в инструкциях (таблицах) по смазке.

При высоком температурном режиме работы станков, т. е. в летний период, для гидросистемы станков по опыту многих заводов применяется масло с вязкостью 7 сСт. В осенне-зимнее время смазочное масло должно иметь вязкость 3,2 сСт.

Смазка подшипников снижает трение скольжения между телами качения и сепаратором, а также между бортами колец и торцами роликов, ослабляет трение и образование тепла между поверхностями качения, предохраняет эти детали от коррозии. Как уплотняющая масса она защищает подшипник от внешнего загрязнения. Выбор марки масла зависит от конструкции подшипникового узла, условий работы, степени нагрузки и скорости вращения, а также от рабочей температуры, образующейся в подшипниковом узле.

Системы подачи масла в подшипниковый узел бывают разные. В

зависимости от конструкции станка, его системы смазки и пространственного расположения смазываемого узла масло может подаваться капельными и фитильными масленками или масляной ванной. Кроме смазки жидкими маслами применяются и консистентные смазки, относящиеся к пластическим коллоидальным системам и состоящие из минерального масла и загустителя.

Консистентные смазки удобны тем, что образуют пластический затвор между валом и корпусом подшипника, обеспечивают значительный срок работы подшипникового узла без замены смазки.

Замена картерного масла в станке, выполняемая периодически и своевременно, обеспечивает его регулярной и надежной смазкой. Нефтяное смазочное масло в результате длительного его пребывания в картере станка обводняется, засмаливается и засоряется механическими примесями. Такое масло ухудшает работу смазываемых механизмов и способствует их быстрому износу. Своевременная замена загрязненного масла предупреждает эти явления.

При работе станков в условиях повышенного температурного режима, в частности в летнее время, нефтяное масло быстро осмоляется и теряет вязкость. Смолы загрязняют картер, забивают сетчатые фильтры, маслопроводы, насосы и другие узлы маслоподающей системы, нарушается правильная циркуляция смазочного масла. Порча смазочного масла в виде смолообразования является повторяющейся реакцией. Поэтому необходим своевременный подлив в емкости станка свежего масла и регулярная его замена по графику. Однако подлив свежего масла лишь уменьшает относительное количество смолы в нем. Замена загрязненного масла на свежее избавляет смазочную систему станка от продуктов осмоления.

Определенные сроки картерной замены масла в каждом станке установить трудно. Это зависит от степени нагрузки и сменности работы оборудования, времени года, температурного режима работы станков и других факторов. Поэтому в каждом цехе предприятия должен быть свой график картерной замены масла. Картерную замену масла нужно приурочивать по возможности к соответствующему ремонту станка.

Принудительная смазка направляющих, т.е. трущихся поверхностей станков, имеет очень важное значение для снижения их износа. Поэтому на каретках суппортов токарных станков и в соответствующих узлах других станков необходимо устанавливать специальные устройства, которые бы обеспечили принудительную и постоянную смазку направляющих.

Предупреждение утечки масла в металлорежущих станках через стыки корпусных деталей, крышек, фланцев и другие неуплотненные места крайне необходимо. Утечка приводит к потере и бесхозяйственному расходованию масла, загрязнению оборудования и рабочего места станочника, а главное к порче и преждевременному износу механизмов

станка, обедняющихся смазкой в результате утечки. Поэтому во время осмотров и межремонтного обслуживания станков нужно следить за герметичностью масляных емкостей.

Обеспечение станка надежными уплотнителями должно предусматриваться технологией сборки станка в процессе ремонта. Если прокладки из листовой резины, прорезиненной ткани, полихлорвинила и других материалов не обеспечивают герметичности стыков деталей, нужно применять более надежные уплотнители.

Качественными уплотнителями неподвижных стыков корпусных деталей при температуре стыка до $+50^{\circ}$ является бензоупорная смазка БУ. Она готовится из глицерина и окисленного касторового масла, смешанного с цинковым мылом риценолевой кислоты, которое является загустителем.

Если в контактирующей области температура превышает $+50^{\circ}$, тогда применяется надежный и стойкий в этой среде уплотнитель –тиоколовая замазка.

Газовая и водяная смазки. В промышленном оборудовании применяют подшипники с газовой смазкой. Вместо обычной смазки используется различный газ под давлением, разделяющий поверхности трущихся частей в подшипнике. При газовой смазке подшипники могут работать в условиях разных температур и давлений. Газовая смазка, при которой коэффициент трения значительно уменьшается, повышает долговечность подшипников.

Газовая смазка имеет свои преимущества. Этот метод обеспечивает удовлетворительную смазку даже в тех случаях, когда соприкасающиеся детали машины обработаны с пониженным классом чистоты. Объясняется это тем, что газовая смазка отделяет соприкасающиеся детали, снижая коэффициент трения.

В смазочных системах оборудования встречаются смазки не маслом, а другими жидкостями. Так, подшипники с вкладышами, изготовленными из слоистого пластика лигнофоля, не нуждаются в масляной смазке. Масло здесь заменяется водой, которая значительно снижает коэффициент трения.

Смазочный инструмент на рабочих местах. Наличие масленок вблизи рабочих мест станочников имеет большое значение в обеспечении регулярной смазкой работающего оборудования. Помогает хорошо организованное хранение масленок на производственном участке. На некоторых заводах механики цехов устанавливают у опорных колонн шкафчики с масленками и бачки с маслом. Рабочий-станочник, не тратя много времени, в нужный момент берет заправленную маслом масленку и смазывает свой станок. Такая практика помогает ремонтникам улучшать смазку оборудования. Каждый станочник должен знать схему и сроки смазки станка.

6. КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА

В некоторых отраслях техники применяются подвески, в которых используются опоры с высшими кинематическими парами, благодаря чему существенно повышается износостойкость таких опор по сравнению с опорами скольжения. Подвески с такими опорами надежно работают более 20 лет. Однако эти подвески имеют большие габариты и массу и по этой причине не получили широкого распространения в технике. Предлагается опора с высшими кинематическими парами [3], работающая на сжатие, которая, обладая достоинствами подвески, имеет небольшие габариты по высоте и в несколько раз меньшую массу. Кроме того, как будет показано ниже, диапазон характеристик у нее значительно шире, чем у подвески.

6.1. Опоры возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами

Принципиальные положения для создания и исследования предлагаемой опоры были разработаны ранее. На рис. 47 приведена расчетная схема опоры возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами.

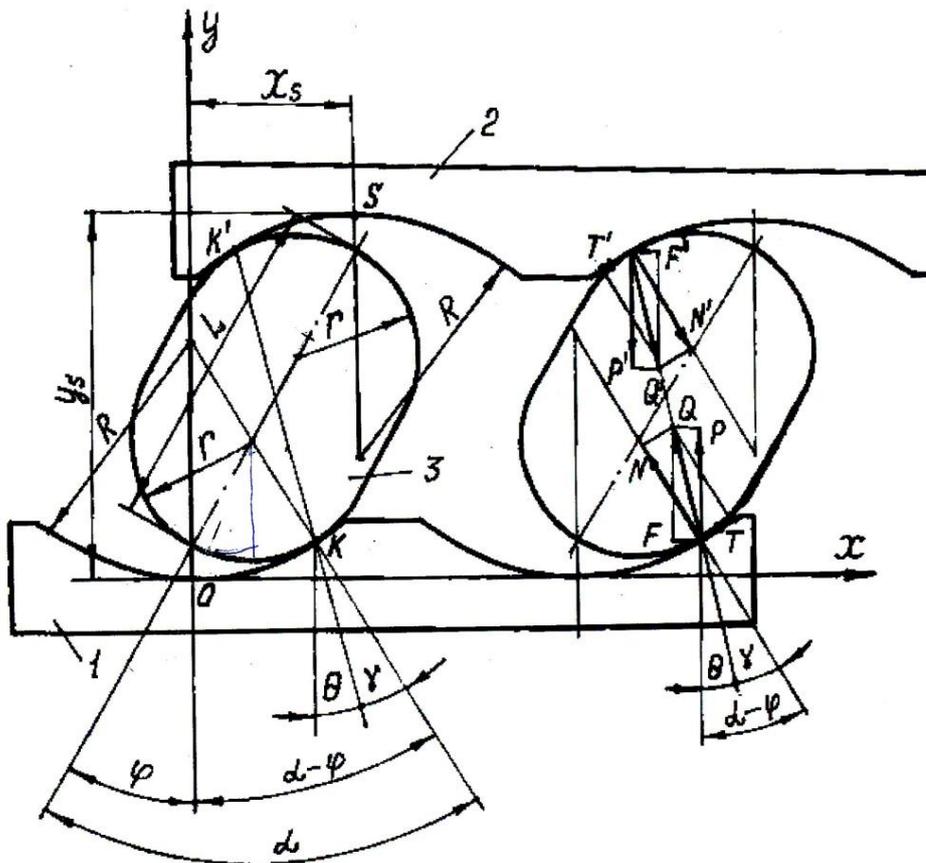


Рис. 47.

Между основанием 1 с двумя вогнутыми поверхностями радиуса R и такой же верхней плитой 2 установлены две стойки 3 с выпуклыми поверхностями радиуса r на торцах. Высота стойки по оси симметрии равна L .

Введем неподвижную систему координат (xoy) и обозначим на поверхности радиуса R верхней плиты точку S и две точки контакта стойки: K – с основанием и K' – с верхней плитой.

При отклонении верхней плиты в горизонтальном направлении на величину x стойка повернется на угол φ . Запишем равенства дуг, проходимых точкой контакта при перекатывании без скольжения; по вогнутой поверхности R ($\alpha - \varphi$) и по выпуклой $r\alpha$, где α – угловое перемещение точки контакта по поверхности радиуса r .

$$R(\alpha - \varphi) = r\alpha.$$

Из этого равенства выразим кинематическую зависимость между углами:

$$\alpha - \varphi = r\varphi / (R - r). \quad (6.1)$$

Запишем параметрические уравнения движения точек S и K с учетом зависимости (6.1):

$$x_S = 2(R - r)\sin(r\varphi / (R - r)) + (L - 2r)\sin\varphi, \quad (6.2)$$

$$y_S = 2[R - (R - r)\cos(r\varphi / (R - r))] + (L - 2r)\cos\varphi, \quad (6.3)$$

$$x_K = R\sin(r\varphi / (R - r)), \quad (6.4)$$

$$y_K = R[1 - \cos(r\varphi / (R - r))]. \quad (6.5)$$

Уравновешенная система равнодействующих сил Q и Q' , действующих на стойку, направлена по линии KK' , соединяющей точки контакта. Тангенс угла θ наклона линии KK' к вертикальной оси y , представляющий собой отношение горизонтальной силы F к вертикальной силе P , равен

$$\operatorname{tg}\Theta = F/P = (x_S - 2x_K) / (y_S - 2y_K). \quad (6.6)$$

После подстановки уравнений (6.2...6.5) выражение (6.6) преобразуется к следующему виду:

$$\operatorname{tg}\Theta = F/P = \frac{(L-2r)\sin\varphi - 2r\sin(r\varphi/(R-r))}{(L-2r)\cos\varphi + 2r\cos(r\varphi/(R-r))}. \quad (6.7)$$

В дальнейшем этот угол будем называть углом возврата.

Проанализируем формулу (6.7). Минимальная высота стойки 2 не может быть менее диаметра цилиндра 2r. По результатам проведенного ранее теоретического и графического анализа рекомендуется угол поворота стойки от среднего положения принимать $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$. Знаменатель в правой части формулы (6.7) может быть только положительным.

Чтобы верхняя плита в пределах допустимых отклонений была устойчивой, $\operatorname{tg}\theta$ должен быть меньше нуля при $\varphi > 0$ и больше нуля при $\varphi < 0$. Для положительного φ числитель в формуле (6.7) не должен быть положительным. Запишем неравенство:

$$(L-2r)\sin\varphi - 2r\sin(r\varphi/(R-r)) \leq 0.$$

Выразим L:

$$L \leq 2r \left[1 + \frac{\sin(r\varphi/(R-r))}{\sin\varphi} \right]. \quad (6.8)$$

При $\varphi > 0$ L будет больше 2r, так как второе слагаемое в квадратных скобках больше нуля, а при $\varphi = 0$ существует неопределенность 0/0. Раскрыв ее по правилу Лопиталья, приведем выражение (6.8) к следующему виду:

$$L \leq 2r \left[1 + r/(R-r) \right]. \quad (6.9)$$

При изменении φ от нуля до $\pm 30^\circ$ правая часть выражения (6.8) возрастает, так как первая производная больше нуля. Следовательно, предельная максимальная высота стойки определяется по формуле (6.9).

Из рис. 47 видно, что при отклонении верхней плиты от среднего положения в точках контакта К и К' возникает касательная сила сцепления Т, которая стремится сдвинуть стойку в сторону положения статического равновесия. Отношение этой силы Т к нормальной силе N равно тангенсу угла γ . Будем называть этот угол углом сцепления. Пока угол сцепления меньше угла трения контактируемых поверхностей происходит перекатывание без скольжения. Из рисунка видно, что $\alpha - \varphi = -(\Theta + \gamma)$. Отсюда с учетом (6.1) определим угол γ :

$$\gamma = -(r\varphi/(R-r) + \Theta). \quad (6.10)$$

Следует обратить внимание на то, что если $\operatorname{tg}\theta$ по абсолютной величине увеличивается, то $\operatorname{tg}\gamma$ уменьшается и наоборот. Выразим

равенство (6.10) через тангенсы углов:

$$\operatorname{tg} \gamma = -\operatorname{tg} \left(\left(r\varphi / (R-r) \right) + \Theta \right) = -\frac{\operatorname{tg} \left(r\varphi / (R-r) \right) + \operatorname{tg} \Theta}{1 - \operatorname{tg} \left(r\varphi / (R-r) \right) \operatorname{tg} \Theta}. \quad (6.11)$$

Далее рассмотрим частные случаи.

Случай 1. $L = 2r$, $R \gg r$.

Формулы (6.2), (6.3), (6.7) и (6.11) запишутся соответственно в следующем виде:

$$x_S = 2(R-r) \sin \left(r\varphi / (R-r) \right),$$

$$y_S = 2 \left[R - (R-r) \cos \left(r\varphi / (R-r) \right) \right],$$

$$\operatorname{tg} \Theta = -\operatorname{tg} \left(r\varphi / (R-r) \right),$$

$$\operatorname{tg} \gamma = 0.$$

Касательные силы в точках К и К' отсутствуют.

Случай 2. $R = 2r$, $r\varphi / (R-r) = \varphi$, $2r \leq L \leq 4r$.

Формулы (6.2), (6.3), (6.7) и (6.11) упростятся и будут иметь следующий вид в той же последовательности:

$$x_S = L \sin \varphi,$$

$$y_S = 4r - (L - 4r) \cos \varphi, \quad (6.12)$$

$$\operatorname{tg} \Theta = (1 - 4r/L) \operatorname{tg} \varphi, \quad (6.13)$$

$$\operatorname{tg} \gamma = -\frac{(4r/L - 1) \operatorname{tg} \varphi}{1 + (1 - 4r/L) \operatorname{tg}^2 \varphi}. \quad (6.14)$$

Проанализируем выражение (6.13). При $4r/L > 1$ коэффициент при $\operatorname{tg} \varphi$ имеет отрицательное значение. Следовательно, восстанавливающая сила всегда направлена против отклонения верхней плиты. Система имеет устойчивое равновесие. Наибольшая восстанавливающая сила равна $R \operatorname{tg} \varphi$ (при $L = 2r$), наименьшая равна нулю (при $L = 4r$). Величина $\operatorname{tg} \gamma$ – тангенс угла сцепления [см. формулу (6.14)] – при увеличении L от $2r$ до $4r$ возрастает от нуля до $\operatorname{tg} \varphi$.

Заслуживает особого анализа вариант при $L = 4r$. Как видно из выражений (6.12) и (6.13) $y_{Sv} = 4r$ – постоянная величина при всех

значениях φ , а $\operatorname{tg}\theta = 0$. Следовательно, верхняя плита будет совершать прямолинейные движения без внешнего сопротивления. Этот частный вариант опоры с целью снижения износа и потерь энергии может быть использован для направляющих с односторонним или двухсторонним ограничением, так как в направляющих чаще всего реализуют трение скольжения.

Увеличение высоты стойки более $4r$ приводит к неустойчивому положению системы, и такая опора может применена в составе механизма с принудительным возвращением.

Случай 3. $R = 3r$, $r\varphi/(R-r) = 0,5\varphi$, $2r \leq L \leq 3r$.

Формулы, преобразованные для данного случая, здесь не приводятся. Даны основные результаты их анализа. При увеличении высоты стойки от $L = 2r$ до $L = 3r$ $\operatorname{tg}\theta$ уменьшается от $-\operatorname{tg}(0,5\varphi)$ до нуля, а $\operatorname{tg}\gamma$ увеличивается от нуля до $-\operatorname{tg}(0,5\varphi)$. По абсолютной величине значения $\operatorname{tg}\theta$ и $\operatorname{tg}\gamma$ снизились примерно в два раза по сравнению с частным случаем 2.

Случай 4. $R = 1,5r$, $r\varphi/(R-r) = 2\varphi$, $2r \leq L \leq 6r$.

Преобразованные формулы также не приводятся.

При увеличении высоты стойки от $L = 2r$ до $L = 6r$ рассматриваемые параметры изменяются в следующих пределах: $\operatorname{tg}\theta$ от $-\operatorname{tg}(2\varphi)$ до 0; $\operatorname{tg}\gamma$ – от 0 до $-\operatorname{tg}(2\varphi)$.

По сравнению с частным случаем 2 значения $\operatorname{tg}\theta$ и $\operatorname{tg}\gamma$ при тех же φ увеличились в два раза. Поэтому такой вариант конструкции опоры можно применить при небольших амплитудах колебаний, особенно в тех случаях, когда при малых значениях угла φ требуется существенно увеличить амплитуду колебаний контактных точек с целью снижения местных остаточных деформаций.

Резюме:

1. Известна конструктивная схема опор возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами, в которой скольжение заменено перекачиванием внешних поверхностей по внутренним.

2. Выявлены основные характеристики для оценки качественных показателей опоры: траектория движения верхней плиты; отношение возвращающего усилия к вертикальной нагрузке, т.е. тангенс угла возврата; угол между равнодействующей сил и ее нормальной проекцией в точках контакта, т.е. угол сцепления.

3. Получены расчетные зависимости, по которым исследованы четыре частных случая влияния параметров опоры на ее характеристики. Каждый частный случай может быть использован в зависимости от назначения опоры и условий ее эксплуатации.

6.2. Расширение диапазона характеристик в опорах с высшими кинематическими парами

В опорах с высшими кинематическими парами в точках контакта возникают нормальные и касательные силы, связь между которыми определяется тангенсом угла γ между равнодействующей и ее нормальной проекцией. Когда угол γ меньше угла трения, перекачивается внешняя поверхность радиуса r по внутренней поверхности радиуса R . Если угол γ превысит угол трения, произойдет проскальзывание, что приведет к интенсивному изнашиванию из-за высоких контактных напряжений.

Как известно, тангенс угла трения для пары "сталь-сталь" при относительно сухом контакте колеблется в пределах от 0,25 до 0,33. Если принять нижнее значение, то угол трения не может быть больше 14° . А в случае попадания в зону качения воды или масла угол трения будет еще ниже. Следовательно, угол трения – величина нестабильная.

В связи с этим трудно обеспечить величину угла сцепления ниже минимального угла трения, особенно если задана предельная высота опоры. Следовательно, необходимо разработать устройство, удерживающее стойку от проскальзывания относительно основания и вместе с тем, не препятствующее свободному перекачиванию этих поверхностей.

На рис. 48 изображена расчетная схема замыкателей касательных сил – одного из вариантов такого устройства, наиболее простого по конструктивному исполнению [4].

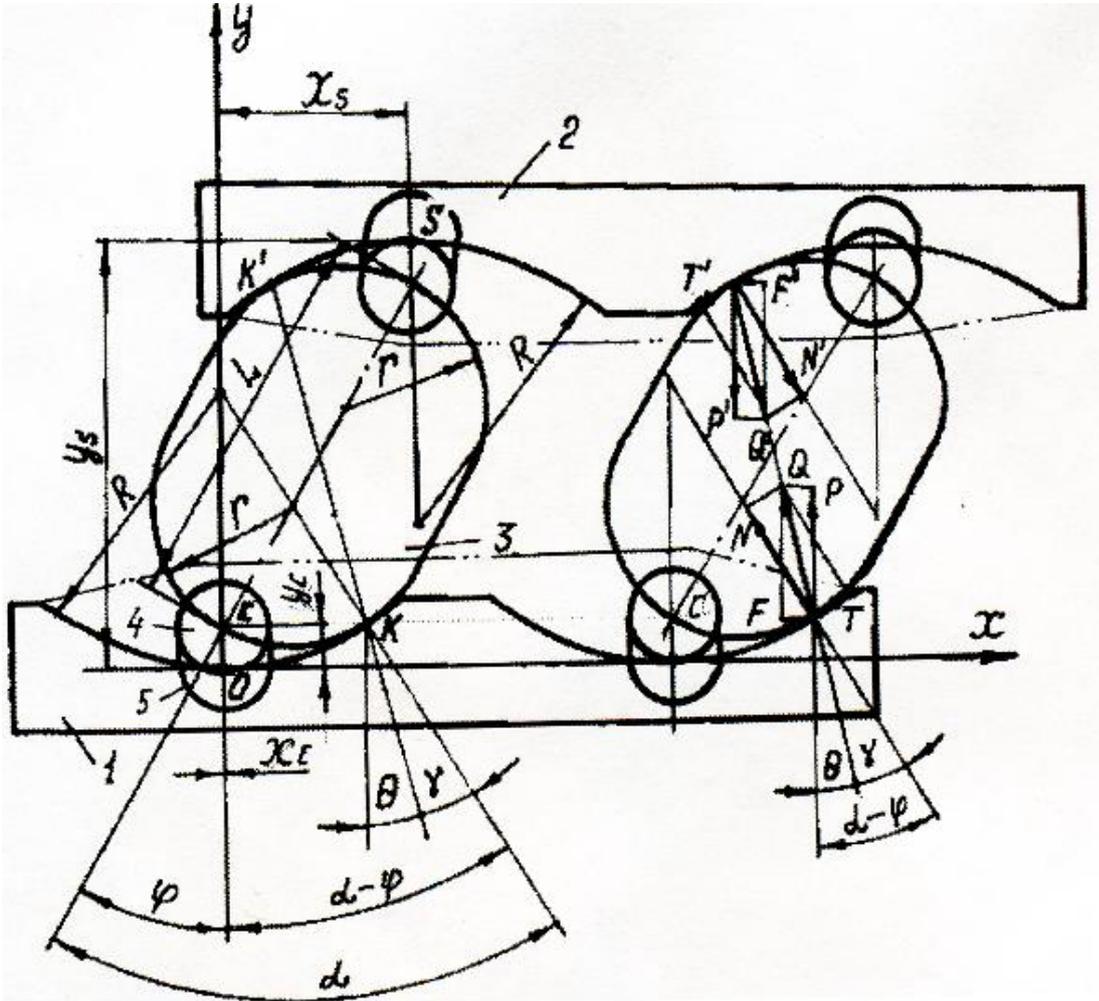


Рис. 48.

По неподвижной поверхности радиуса R основания 1 перекачивается стойка 3 с радиусами r на торцах, при этом $R \gg r$. Введем неподвижную систему координат xoy , связанную с основанием 1. В положении статического равновесия точка O на окружности R и точка C на окружности r совпадают. Запишем уравнения движения точки C :

$$x_c = (R - r)\sin(\alpha - \varphi) - r\sin\varphi, \quad (6.15)$$

$$y_c = R - (R - r)\cos(\alpha - \varphi) - r\cos\varphi. \quad (6.16)$$

Из условия равенства дуг при перекачивании ранее получено выражение

$$\alpha - \varphi = \frac{r\varphi}{R - r}.$$

Подставим правую часть последнего выражения в уравнения (6.15) и

(6.16):

$$x_c = (R - r) \sin\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right) - r \sin \varphi; \quad (6.17)$$

$$y_c = R - (R - r) \cos\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right) - r \cos \varphi. \quad (6.18)$$

Рассмотрим три частных случая.

Случай 1. $R = 2r$. Тогда $\frac{r\varphi}{R - r} = \varphi$.

Уравнения (6.17) и (6.18) преобразуются соответственно:

$$x_c = 0;$$

$$y_c = 2r(1 - \cos \varphi).$$

Так как $x_c = 0 = const$, точка С будет перемещаться вдоль оси у при любых значениях φ . Если на стойках 3 жестко установить шипы 4 произвольного радиуса, а на торцах нижнего 1 и верхнего 2 основания укрепить пластины с пазами 5 по вертикальной оси, то при перекатывании поверхностей радиусов R и r шипы будут скользить вдоль пазов.

Назовем кинематическую пару "шип-паз" замыкателем касательных сил или сокращенно "замыкателем". Если угол γ превысит значение угла трения, избыточные касательные силы будут удерживаться замыкателями, что обеспечит перекатывание рабочих поверхностей радиусов R и r без скольжения. При проектировании опор не всегда удается обеспечить отношение $R : r = 2$.

Случай 2. $R = 3r$. $\frac{r\varphi}{R - r} = 0,5\varphi$; $R - r = 2r$.

Уравнения (6.17) и (6.18) будут иметь следующий вид:

$$x_c = r(2 \sin 0,5\varphi - \sin \varphi); \quad (6.19)$$

$$y_c = r(3 - 2 \cos 0,5\varphi - \cos \varphi).$$

Как видно из уравнения (6.19), траектория точки С – не прямая линия, она отклоняется от вертикальной оси.

Случай 3. $R = 1,5r$. $\frac{r\varphi}{R - r} = 2\varphi$; $R - r = 0,5r$.

Преобразуем выражения (6.17) и (6.18) для этого случая:

$$x_c = r(0,5 \sin 2\varphi - \sin \varphi);$$

$$y_c = r(1,5 - 0,5 \cos 2\varphi - \cos \varphi).$$

Траектория точки С также не совпадает с вертикальной осью.

Проведены расчеты x_c и y_c для всех трех случаев при изменении φ от 0 до 30° с шагом 5° (табл. 6.1). Принимаем $r = 50$ мм.

Таблица 6.1. Координаты точки С (мм) для разных значений угла φ

φ^0	$R = 2r$		$R = 3r$		$R = 1,5r$	
	x_c	y_c	x_c	y_c	x_c	y_c
0	0	0	0	0	0	0
5	0	0,38	0,004	0,285	-0,018	0,57
10	0	1,52	0,035	1,14	-0,132	2,27
15	0	3,4	0,115	2,56	-0,440	5,05
20	0	6,08	0,264	4,5	-1,031	8,87
25	0	9,37	0,514	7,06	-1,980	13,6
30	0	14	0,88	10,1	-3,350	19,2

Если при $R = 2r$ и $\varphi = 30^0$ $x_c = 0$, то при $R = 3r$ $x_c = 0,88$ мм, а при $R = 1,5r$ больше 3 мм. Поэтому для третьего случая ($R = 1,5r$) амплитуду угловых колебаний стойки следует ограничить 20°.

Опоры с $r \neq 50$ мм могут использоваться в тяжелых машинах. Для определения x_c при $r = 50$ мм необходимо данные из таблиц разделить на 50 и умножить на r мм.

Для промежуточных отношений $1,5 < (R : r) < 3$ отклонение x_c будет уменьшаться по мере приближения к 2.

Таким образом, в опорах можно использовать различные радиусы внутренних и внешних поверхностей.

Из таблицы видно, что при $R = 2r$ траектория движения оси шипа совпадает с осью паза. Поверхности радиусов R и r перекатываются без скольжения. Если $R \neq 2r$, траектория оси шипа не совпадает с осью паза. Но шип можно принудительно направить вдоль паза. Тогда поверхности радиусов R и r будут перекатываться с одновременным проскальзыванием.

Обозначим угловое перемещение точки контакта по выпуклой поверхности радиуса r только от скольжения через $\Delta\alpha$. Тогда абсолютное скольжение по этой поверхности будет равно $r\Delta\alpha$. Такая же величина скольжения, но со знаком «минус» будет и на вогнутой поверхности. С учетом скольжения равенство дуг запишется в следующем виде:

$$R(\alpha - \varphi) + r\Delta\alpha = r(\alpha - \Delta\alpha).$$

После преобразований получим зависимость углов с учетом скольжения:

$$\alpha - \varphi = \frac{r(\varphi - 2\Delta\alpha)}{R - r}. \quad (6.20)$$

Подставим зависимость (6.20) в уравнение (6.15) и, так как шип движется вдоль паза, приравняем полученное выражение к нулю:

$$(R - r)\sin\left[\frac{r(\varphi - 2\Delta\alpha)}{R - r}\right] - r\sin\varphi = 0. \quad (6.21)$$

Представим первое слагаемое выражения (6.21) как синус разности двух углов:

$$\sin\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right)\cos\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right) - \cos\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right)\sin\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right) - \left(\frac{r}{R - r}\right)\sin\varphi = 0$$

Полагая, что угол $\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}$ – величина малая, введем допущение $\cos\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right) = 1$ с последующей оценкой погрешности от этого допущения. Выразим $\sin\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right)$:

$$\sin\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right) = \operatorname{tg}\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right) - \left(\frac{r}{R - r}\right)\frac{\sin\varphi}{\cos\left(\frac{r\varphi}{R - r}\right)}. \quad (6.22)$$

Как видно из выражения (6.22), при $R = 2r$ $\Delta\alpha = 0$. Качение происходит без проскальзывания. Это было доказано выше. Для всех вариантов при $\varphi = 0$ $\sin\left(\frac{r\cdot 2\Delta\alpha}{R - r}\right) = 0$; $\Delta\alpha = 0$.

Определим максимальное скольжение при $\varphi = 30^\circ$ для частных случаев.

Случай 2. $R = 3r$. $\varphi = 30^\circ$, $\frac{2r\Delta\alpha}{R - r} = \Delta\alpha$.

$$\sin\Delta\alpha = \operatorname{tg}0,5\varphi - \frac{0,5\sin\varphi}{\cos0,5\varphi} = \operatorname{tg}15^\circ - \frac{0,5\sin30^\circ}{\cos15^\circ} = 0,0091;$$

$$\Delta\alpha = 0,52^0; \alpha = \frac{R\varphi}{R-r} = 1,5\varphi.$$

Определим относительное скольжение – отношение абсолютного скольжения к полному перемещению точки контакта:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \frac{0,52^0}{1,5 \cdot 30^0} = 0,0116.$$

Скольжение находится в пределах горизонтальных упругих деформаций (псевдоскольжение).

Погрешность от принятого допущения:

$$\left| \frac{1 - \cos \Delta\alpha}{\cos \Delta\alpha} \right| 100\% = 0,004\%.$$

Погрешность мала.

Случай 3. $R = 1,5r$. $r/(R-r) = 2r$; $\varphi = 30^0$;

$$\alpha = \frac{R\varphi}{R-r} = \frac{1,5\varphi}{0,5} = 3\varphi.$$

$$\sin(4\Delta\alpha) = \operatorname{tg}(2\varphi) - 2\sin\varphi/\cos(2\varphi) = \operatorname{tg} 60^0 - 2\sin 30^0/\cos 60^0 = -0,268;$$

$$4 \cdot \Delta\alpha = 15,55^0; \Delta\alpha = 3,89^0.$$

Относительное скольжение.

$$\Delta\alpha/\alpha = 3,89^0/90^0 = 0,043.$$

Погрешность:

$$\left| (1 - \cos 4\Delta\alpha) / \cos 4\Delta\alpha \right| \times 100\% = 3,8\%.$$

Скольжение и погрешность недопустимые. Амплитуду следует уменьшить.

Проведенный анализ показал, что установка устройства, предотвращающего проскальзывания поверхностей качения опоры, позволяет существенно увеличить амплитуду колебаний и связанные с ней характеристики $\operatorname{tg}\Theta$ и $\operatorname{tg}\gamma$. Однако появляется изнашивание в кинематической паре "шип-паз".

Эта проблема решается в зависимости от назначения и условий эксплуатации опоры. Например, при установке опоры на грузовой вагон между рамой и тележками необходимо ее перемещение относительно верхней плиты на 100 мм, чтобы обеспечить поворот тележек в кривой железнодорожного пути радиуса 80 м. Такое перемещение требуется, если максимально изношены гребни колес и боковые грани рельсов. Кривые радиуса 80 м встречаются сравнительно редко, в основном на промышленных предприятиях, построенных несколько десятков лет назад. Предельный износ гребней колес и боковых граней рельсов бывает не всегда. В кривой радиуса 350 м, минимального для магистральных путей, перемещение опоры не превышает 30 мм. При таком перемещении угол сцепления всегда меньше минимального угла трения.

Следовательно, период интенсивного изнашивания пары трения "шип-паз", будет незначительным по сравнению с периодом движения по магистральным путям. Таким образом, преждевременного износа замыкателей не ожидается.

В механизмах, работающих постоянно с максимальными амплитудами, на шип можно установить сменный ползун с движением внутри паза или ролик, перекатывающийся по стенкам паза, которые несложно заменять при плановых ремонтах. Имеются разработки подобных устройств, в основу работы которых положены другие принципы.

Резюме:

1. Амплитуду колебаний опоры с высшими кинематическими парами можно существенно увеличить путем установки замыкателей, которые будут воспринимать касательные силы, если угол сцепления превысит угол трения.

2. При установке замыкателей имеет место незначительное скольжение, если $2 < R/r \leq 3$; если $1,5 \leq R/r < 2$, скольжение существенно возрастает по мере приближения к 1,5.

3. Для варианта $R/r = 1,5$ амплитуду угловых колебаний стойки следует ограничить 20° .

6.3. Буксовая направляющая с элементами качения

Опоры с высшими кинематическими парами повышенной износостойкости при определенных значениях геометрических параметров (высота стойки L и радиусы вогнутых и выпуклых поверхностей R и r) могут быть использованы как направляющие с односторонним или двусторонним ограничением [5].

6.3.1. Основы теоретических исследований

Рассмотрим теоретические положения к разработке буксовых

направляющих для локомотивов и вагонов с элементами качения, принципиально отличных по конструкции и принципу работы от используемых до сих пор.

Из известных конструкций буксовых направляющих широкое распространение получили челюстные, цилиндрические и подковные с резинометаллическими шарнирами. Каждая конструкция имеет положительные качества и недостатки. К недостаткам челюстных направляющих относится абразивное изнашивание, цилиндрических направляющих – сложность конструкции, резинометаллических шарниров – существенное увеличение жесткости рессорного подвешивания и некоторые менее существенные недостатки.

На рис. 49 изображена расчётная схема буксового узла грузового вагона, в котором букса смещена вверх на величину x_s от номинального положения.

Букса 1 установлена на ось колесной пары. Вертикальные силы передаются от рамы тележки 2 на буксу пружинами 3, расположенными над буксой. В горизонтальном направлении вдоль боковины букса связана с рамой тележки двумя поводками 4. Каждый поводок состоит из штанги 5 с выпуклыми цилиндрическими поверхностями радиуса r на торцах, опирающимися на вогнутые поверхности радиуса R , сухаря 6, установленного на буксе, и упора 7, укрепленного на кронштейне рамы тележки.

Длина штанги по оси симметрии равна L . Для удержания штанги от падения и исключения проскальзывания поверхностей радиусов R и r (если угол сцепления превысит угол трения) предусмотрены цилиндрические поверхности на штангах радиуса ρ с центрами в точках пересечения поверхностей радиуса r с осью симметрии. Эти поверхности поворачиваются внутри пазов деталей 6 и 7. Рамные силы передаются через контактирование боковых поверхностей штанги с сухарем на буксе и упором на раме тележки.

Работает буксовая направляющая следующим образом. При вертикальных колебаниях рамы тележки выпуклые поверхности штанги 5 перекачиваются по вогнутым поверхностям сухаря 6 и упора 7.

Боковые колебания рамы тележки относительно продольной горизонтальной оси (боковая качка) обеспечиваются возможностью поворота сухаря 6 относительно буксы (показано на правом поводке на рис. 49.)

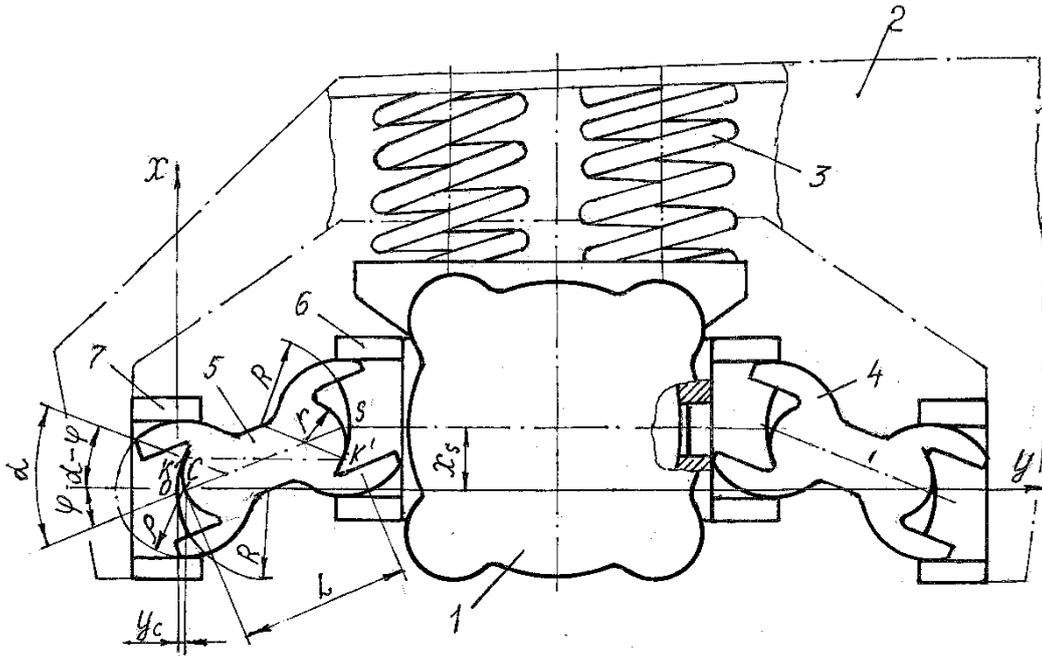


Рис. 49.

Рассмотрим левый поводок. При этом примем, что рама тележки неподвижна, а букса совершает вертикальные колебания. Для описания траектории точек S, K и K' при колебаниях верхней плиты опоры одинаковыми формулами (см. выше). На рис. 49 применена нетрадиционная система координат: горизонтальная ось обозначена буквой y , вертикальная – x .

Используем полученные ранее формулы – (6.2), (6.3), (6.7), (6.9), 6.10). Упростим формулу (6.9):

$$L = 2Rr / (R - r).$$

Следует обратить внимание на то, что длина штанги L равна двум приведенным эквивалентным радиусам ρ_3 , от величины которых зависит контактная прочность соединения.

Очевидно, что начинать проектирование необходимо с расчета соединения на контактную прочность, по результатам которого вычисляется длина штанги L . По этому параметру затем определяются остальные размеры. Следовательно, длина штанги L является важным геометрическим параметром, особенно при проектировании транспортных машин.

Далее рассматриваем только буксовую направляющую. Обозначим отношение R/r буквой n . Тогда радиус выпуклой поверхности, можно выразить через длину штанги L , следующим образом:

$$r = ((n - 1) / 2n) L.$$

Запишем формулы (6.2), (6.3), (6.7) и (6.10) в следующем виде:

$$x_s = L\left(\left(\frac{(n-1)^2}{n}\right)\sin(\varphi/(n-1)) + \left(\frac{1}{n}\right)\sin\varphi\right); \quad (6.23)$$

$$y_s = L\left(\left(\frac{(n-1) - (n-1)^2}{n}\right)\cos(\varphi/(n-1)) + \left(\frac{1}{n}\right)\cos\varphi\right); \quad (6.24)$$

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{\left(\frac{1}{n}\right)\sin\varphi - \left(\frac{(n-1)}{n}\right)\sin(\varphi/(n-1))}{\left(\frac{1}{n}\right)\cos\varphi + \left(\frac{(n-1)}{n}\right)\cos(\varphi/(n-1))}; \quad (6.25)$$

$$\gamma = -\left(\varphi/(n-1) + \Theta\right). \quad (6.26)$$

Рассмотрим частные случаи.

Случай 1. $n = R/r = 2$, $r = 0,25L$.

Формулы (6.23–6.26) упростятся и запишутся в следующем виде:

$$x_s = L \sin \varphi;$$

$$y_s = L = \text{const};$$

$$\operatorname{tg}\Theta = 0;$$

$$\gamma = -\varphi.$$

Так как $y_s = L = \text{const}$ (постоянная величина), то точка S будет совершать колебания по вертикальной прямой. Аналогично такая же точка на втором поводке будет совершать колебания по вертикальной прямой. Следовательно, центр буксы будет совершать вертикальные колебания. Поскольку $\operatorname{tg}\Theta = 0$ при $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$, то линия, соединяющая точки контакта K и K' , будет всегда горизонтальной. Силы, передающиеся от буксы на раму тележки по линии $K K'$, не будут оказывать влияния на вертикальные колебания.

Случай 2. $n = R/r = 3$, $r = L/3$.

Формулы (6.23–6.26) преобразуются и запишутся так:

$$\begin{aligned}x_S &= L/3[4\sin(\varphi/2) + \sin\varphi]; \\y_S &= L/3[6 - 4\cos(\varphi/2) + \cos\varphi];\end{aligned}\quad (6.27)$$

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{\sin\varphi - 2\sin(\varphi/2)}{\cos\varphi + 2\cos(\varphi/2)};$$

$$\gamma = -(\varphi/2 + \Theta).$$

Случай 3. $n = R/r = 1,5$, $r = L/6$.

Формулы (6.23–6.26) запишем в измененном виде:

$$\begin{aligned}x_S &= (L/6)[\sin(2\varphi) + 4\sin\varphi]; \\y_S &= (L/6)[3 - \cos(2\varphi) + 4\cos\varphi];\end{aligned}\quad (6.28)$$

$$\operatorname{tg}\Theta = \frac{2\sin\varphi - \sin(2\varphi)}{2\cos\varphi + \cos(2\varphi)};$$

$$\gamma = -(2\varphi + \Theta).$$

Как видно из формул (6.27) и (6.28), траектории движения точек S во втором и третьем частных случаях отклоняются от вертикальной прямой.

Величину отклонения Δy можно определить по выражению

$$\Delta y = y(\varphi) - y(0).$$

Для трех рассмотренных частных случаев рассчитаны: вертикальная координата перемещения буксы относительно рамы тележки x_S , величина зазоров Δy , танген угла γ . Для всех случаев $L = 100$ мм, $-30^\circ \leq \varphi \leq 30^\circ$.

Для частного случая 1 в общем виде установлено, что координата y_S и $\operatorname{tg}\Theta$ равны нулю. Следовательно, $\Delta y = 0$. Кроме того, предварительными

расчетами доказано, что в частном случае $2 \operatorname{tg} \Theta$ возрастает от нуля до 0,006. На работу направляющей такие значения не влияют, поэтому ими можно пренебречь. По результатам расчетов составлена табл. 6.2 (координата x_S , отклонение точки S от вертикали Δy и $\operatorname{tg} \gamma$ в зависимости от угла φ), в которую значения Δy для первого случая и $\operatorname{tg} \Theta$ для всех трех случаев не введены:

Таблица 6.2

φ°	$R = 2r$		$R = 3r$			$R = 1,5r$		
	x_S	$\operatorname{tg} \gamma$	x_S	Δy	$\operatorname{tg} \gamma$	x_S	Δy	$\operatorname{tg} \gamma$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	8,7	0,09	9	0	0,04	12	0	0,18
10	17	0,18	17	0	0,09	17	0,01	0,36
15	26	0,27	26	0	0,13	26	0,03	0,58
20	34	0,36	35	0,015	0,17	34	0,12	0,82
25	42	0,47	43	0,038	0,22	40	0,29	1,16
30	50	0,58	51	0,08	0,26	48	0,59	1,67

Анализ формул в общем виде и частных случаях, а также результатов расчетов (таблица) позволяет сделать следующее теоретическое заключение:

1. Координаты точки S (x_S и y_S) зависят от двух параметров: длины штанги L и угла ее поворота φ . На величину углов Θ и γ длина штанги не влияет. Уменьшить угол γ можно увеличением длины штанги L .

2. Перемещения буксы (x_S) при одинаковых L и φ для всех трех случаев отличаются несущественно.

3. Отклонения координаты y_S от вертикали Δy и угла Θ допустимы для практического применения.

4. С учетом изменения угла сцепления γ можно рекомендовать для практического использования первый и второй частные случаи, а также промежуточные значения параметров. Третий частный случай для буксовых направляющих недопустим.

6.3.2. Расчет и проектирование буксового узла

Результаты теоретических исследований использованы для расчета

основных параметров буксовых направляющих двухосной тележки скоростного грузового вагона с двухступенчатым рессорным подвешиванием. В первой ступени подвешивания предусмотрена повышенная жесткость, чтобы при всех скоростях движения (вплоть до максимальной) частота колебаний тележки не достигала резонансной. Первая ступень подвешивания расположена над буксами.

В предлагаемой буксовой направляющей принято: длина штанги $L = 150\text{мм}$, радиус вогнутых поверхностей $R = 75\text{мм}$, выпуклых $r = 37,5\text{мм}$. Так как $n = R/r = 2$, точка "С" перемещается по вертикали без отклонения, перекатывание пар качения R и r происходит без скольжения. В первой ступени подвешивания средняя амплитуда колебаний находится в пределах 15...20 мм.

Положение рамы тележки по вертикали относительно буксы при статическом равновесии изменяется при переходе с груженого режима в порожний и обратно. С учетом этого суммарную амплитуду принимаем равной 35мм, среднюю – 25 мм.

На рис. 50 построен график зависимости изменения $\text{tg}\gamma$ от перемещения буксы x_s для предлагаемой направляющей. Согласно этому графику, при амплитуде 25 мм $\text{tg}\gamma = 0,18$ (меньше коэффициента трения). Случайные скачки амплитуды более 25 мм и кратковременные увеличения $\text{tg}\gamma$, превышающие коэффициент трения в зоне качения, будут удерживаться замыкателями касательных сил.

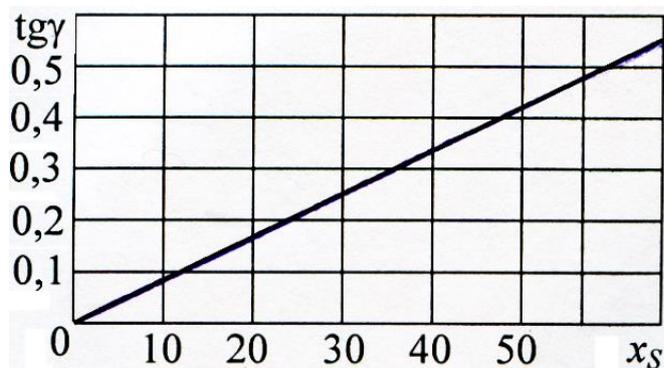


Рис. 50.

Наряду с описанным вариантом буксовой направляющей разработана направляющая для локомотивов и пассажирских вагонов с увеличенным статическим прогибом рессорного подвешивания в первой ступени и буксой с нижним расположением крыльев под пружины.

Пружины в этом случае проходят через отверстия в штангах поводков, в связи с чем длина штанги L увеличена до 300 мм. Увеличена также ширина штанги.

Так как амплитуда колебаний существенно не изменилась, увеличение длины штанги привело к уменьшению угла ее поворота φ , а следовательно, и угла γ .

Резюме: проведенные теоретические исследования и предварительные конструкторские проработки доказали возможность

создания буксовых направляющих с элементами качения повышенной износостойкости.

7. УЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Подбор антифрикционных материалов или введение смазочных материалов для увеличения устойчивости к износу – это борьба за сохранение исходной формы конкретного элемента конструкции.

Иногда сохранение формы (не совпадающей с формой естественного износа) необходимо для решения более важных задач, чем уменьшение потерь, например задач сохранения функции передаточного отношения в зубчатых передачах, точности перемещения в станках и т.д. Эти случаи должны рассматриваться отдельно.

Наблюдая за износом зубьев колес водоподъемных машин, Леонардо да Винчи предположил прообраз циклоидального зацепления. Впоследствии циклоидальное зацепление было почти полностью вытеснено более технологичным эвольвентным. Однако на преимущества выпукло-вогнутого профиля циклоидального зацепления, с точки зрения уменьшения износа по сравнению с эвольвентным зацеплением, указывается и в современных исследованиях.

В 1919 г. во Франции был выдан патент за № 489745 на железнодорожное колесо, имеющее вогнутый профиль поверхности катания. Именно в такую форму переходит первоначально коническое колесо в результате износа. В 1978 г. ряд отечественных авторов решили закрепить эту идею, предложив с целью снижения износа придавать поверхности катания колеса форму параболоида вращения с образующей

$$y = ax^b.$$

Если коэффициентам давать значения в пределах: $a = 4,8...5,4$ и $b = 0,23...0,25$, то поверхность катания будет достаточно близко воспроизводить форму ее естественного износа (рис. 51). На рис. 52 изображен не изношенный профиль катания колеса с ребордой. Обод чаще всего делают коническим, а реборду ограничивают рядом торовых поверхностей. В кинематической паре нельзя рассматривать износ только одной сопряженной поверхности и забывать о второй. В упомянутых выше предложениях рельс, форма которого не сопоставлена с колесом.

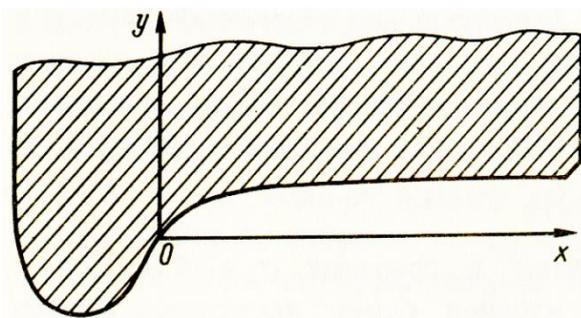


Рис. 51.

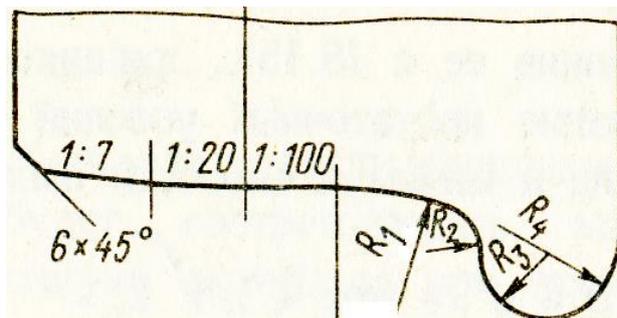


Рис. 52.

Кинематической паре "рельс-колесо" можно придать разные очертания. Рельс типа "P₁" имеет профиль, изображенный на рис. 53. Профиль крановых рельсов несколько отличается.

Известно, что изношенные рельсы и колеса принимают весьма характерный стабилизированный вид после длительного периода эксплуатации (рис. 54 – профиль изношенного рельса).

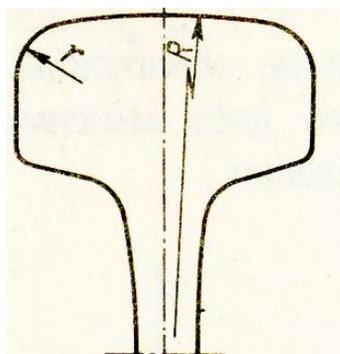


Рис. 53.

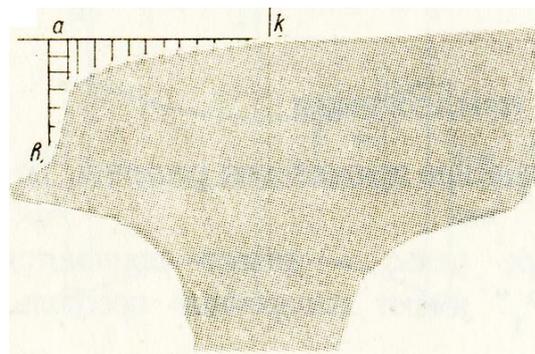


Рис. 54.

Последующие изменения профилей рельсов и колес происходят вследствие работы одного из элементов пары с неизношенным, например, изношенное колесо по новому рельсу или новое колесо по изношенному рельсу. Основанием для придания колесу и рельсу форм естественного износа служили наблюдения за естественной минимизацией скорости изнашивания колес после приобретения ими стабилизированной формы. Но воспроизведение изношенной формы колеса не может привести к радикальному решению проблемы износоустойчивости, т.к. форма рельса не будет соответствовать форме естественного износа. Колеса и рельсы проскальзывают и приобретают форму естественного износа не столько на кривых участках, сколько, в основном, на прямых. Обычное коническое колесо и железнодорожный рельс в исходном ненагруженном состоянии имеют точный контакт, который под нагрузкой переходит в эллиптическую площадку. Если в пределах этого эллипса можно провести линию, не впадающую с мгновенной осью качения, то износ вдоль этой

линии дет подчиняться закономерностям, определяемым кинематикой относительного движения соприкасающихся точек. По мере приработки рельса и колеса в момент их плотного касания вместе с ребордой площадка контакта в виде эллипса будет все более вытягиваться в перпендикулярном направлению рельсу направлении, приближаясь по виду к полоске. Особенностью кинематики контакта рельса и колеса является их относительное смещение на величину бокового зазора между ребордами и рельсами. Здесь должны быть учтены вероятностные законы распределения поперечных ходов колеса, при которых профиль колеса будет изнашиваться как огибающая кривая ряда последовательных положений головки рельса.

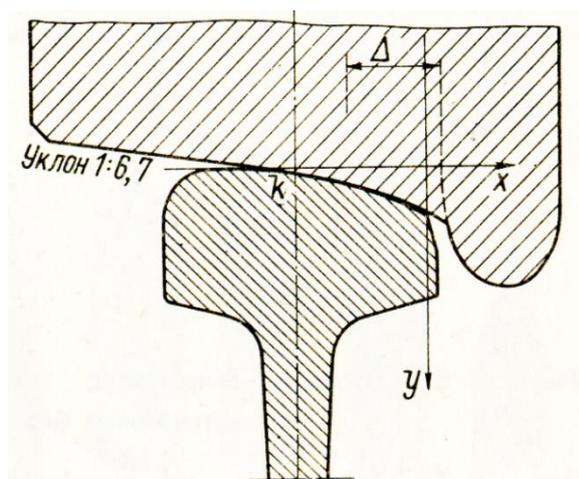


Рис. 55.

На рис. 55 показана предполагаемая оптимальная форма профиля колеса и рельса. Внешняя часть поверхности катания колеса должна плавно переходить в конус с уклоном 1:6,7.

Расчеты показали, что при реализации этого предложения срок службы рельсов и колес увеличится в среднем на 12 %. На рис. 54 дано сравнение теоретической формы рельса с

формой его естественного износа, где концы координатных линий отвечают теоретически оптимальному профилю.

Если конструктивно всегда можно учесть форму естественного износа деталей машин, то по технологическим соображениям это не всегда реально воплотить по условиям производства.

СНИЖЕНИЕ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН

Этот раздел монографии посвящен вопросам применения эксплуатационных материалов и масел для смазки механизмов, трансмиссий и редукторов автомобилей, тракторов, шасси спасательной техники. Смазочные материалы и рабочие жидкости, используемые в ответственных узлах машин, могут рассматриваться как своего рода конструкционный материал со свойствами, влияющими на работоспособность поверхностей трения в ряде случаев не в меньшей степени, чем свойства материала, из которого изготовлены смазываемые детали.

В соответствии с принятым в названии монографии термином "трибонапряженность" существует понятие "критерий

трибонапряженности"¹. Это оценочный показатель, который измеряется в абсолютной ограниченной шкале в пределах от 0 до 1. Причем, если его значение равно 0, то это установившийся режим жидкостной смазки; при значении, равном 1, трибоузел работает в режимах сухого трения или граничной смазки; в случае, когда критерий занимает промежуточные значения параметра от 0 до 1 имеют место условия переходного смазочного процесса при последовательного во времени чередовании жидкостной и граничной смазок (сухого трения). Эффективная и надёжная эксплуатация автомобилей, тракторов, дорожных машин зависит не только от их конструктивных особенностей, но и от оптимального подбора топливо-смазочных материалов, технических жидкостей и других эксплуатационных материалов. Применение эксплуатационных материалов более низкого качества приводит к снижению долговечности и надежности работы деталей, узлов и механизмов, усложнению технического обслуживания и их ремонта. Применение эксплуатационных материалов более высокого, чем требуется, качества ведет к увеличению затрат. Поэтому знание показателей, которыми характеризуется качество, физические и химические свойства того или иного эксплуатационного материала, а также предъявляемых к нему технико-экономических требований позволяет судить о его рациональном использовании. Машинные масла работают в условиях сравнительно невысоких температур, в воздушной среде и при атмосферном давлении, чем отличаются от масел для смазки двигателей внутреннего сгорания, компрессоров и паровых машин, используемых при высоких температурах, в среде горячих газов или пара под давлением. Несколько десятилетий назад машины конструировались с такими запасами прочности и стойкости поверхностей трения, что их необходимая работоспособность обеспечивалась практически любым смазочным материалом и специальными техническими жидкостями более или менее подходящей вязкости. По этой причине в области машинных смазочных масел не возникало никаких особых проблем, за некоторыми исключениями. Положение изменилось при переходе к рациональному конструированию машин, связанному с уменьшением габаритов, следовательно, и запасов прочности трущихся деталей, с повышением давлений на их поверхностях. Наблюдающийся рост быстроходности машин и повышение рабочих температур во многих объектах смазки, т.е. более напряженная работа поверхностей трения привели к тому, что подбору смазочного масла в машинах теперь приходится уделять в ряде случаев даже больше внимания, чем подбору материала трущихся поверхностей.

¹Янучков М.Р., Калимуллин Р.Ф. Диагностирование подшипников коленчатых валов автомобильных двигателей по состоянию смазочного слоя. Оренбург: Вестник ОГУ №10 (129)/октябрь 2011. – С. 127...134.

Применение масла со специальными свойствами может резко повысить износостойкость, нагрузочную способность и долговечность поверхностей трения, обеспечить нормальную работу машины при особо высокой или особо низкой температуре внешней среды, понизить расход энергии на преодоление сопротивлений трения, устранить неравномерное перемещение медленно движущихся частей машины.

Создавая новую машину, конструктор каждый раз оказывается перед необходимостью продуманного выбора сорта смазочного материала, как и всякого машиностроительного материала, и условий его применения в различных механизмах.

Основным сырьём при производстве эксплуатационных материалов является нефть. Большое значение развитию науки о нефти придавал великий русский учёный-химик Д.И. Менделеев. Академики Н.Д. Зелинский, С.С. Наметкин, Н.Н. Семёнов своими исследованиями позволили раскрыть особенности строения и возможности развития углеводородов нефти и нефтепродуктов.

Благодаря большому разнообразию углеводородов нефти из неё получают несколько видов топлив, что связано с конструктивными особенностями двигателей. Для поршневых двигателей внутреннего сгорания из нефти получают бензин и дизельное топливо. В начале XX века К.Э. Циолковский теоретически обосновал использование жидких нефтяных топлив в двигателях с реактивной тягой. В 1930-1932 годах под руководством советского учёного Ф.А. Цандера были построены две ракеты с жидкостным реактивным двигателем, работающем на бензине. Хорошим топливом для котельных установок являются мазуты – жидкие остатки после перегонки нефти. Способ промышленного сжигания мазутов впервые предложил выдающийся русский учёный В.Г. Шухов. Уже более 100 лет этот способ успешно применяется. Гидродинамическая теория смазки, созданная Н.П. Петровым, нашедшая продолжение в работах Н.Е. Жуковского, С.А. Чаплыгина, Л.С. Лейбензона, имела большое значение для развития и производства смазочных материалов. Первую промышленную смазку в начале XX века – колёсную мазь – готовили из нефтяных остатков загущением кальциевыми мылами смоляных кислот. Современные представления о структуре смазок создали исследования Г.В. Виноградова, Д.С. Великовского, В.П. Варенцова, П.А. Ребиндера и других учёных. Эффективное использование нефтепродуктов невозможно без представления о процессах изменения их углеводородов и окисления металлов. Изучению химической и электрохимической коррозии металлов при контакте с маслами и смазками, разработке путей предотвращения разрушения металлов и улучшения защитных свойств нефтепродуктов, создания методов и приборов для проведения комплекса исследований посвящены работы Б.В. Лосикова, К.С. Рамайя, Г.В. Виноградова, К.К. Папок и др.

Проблемы качества топливо-смазочных материалов возникли на рубеже XIX и XX веков, в связи с появлением и развитием автомобилей и двигателей внутреннего сгорания. Оценка эксплуатационных свойств нефтепродуктов осуществляется квалификационными методами, разработка и создание которых относится к началу XX века. В это время возникла проблема детонационного сгорания топлива в бензиновых двигателях внутреннего сгорания. В 1927 году была создана одноцилиндровая установка «*Вокеш*» для определения октанового числа бензинов.

Для решения многих практических задач на стыке фундаментальных наук появились новые отрасли знаний. К ним, например, относится "химмотология" – наука, изучающая эксплуатационные свойства и качество топливо-смазочных материалов, их рациональное использование. Название этой науке дал видный советский учёный в области смазочных масел профессор К.К. Папок в 1964 г. Название «химмотология» происходит от слов «химия», «мотор» и «логос» (наука). На стыке таких наук, как физика, органическая, физическая и коллоидная химия, теплотехника, экология появилось новое научное направление – химмотология. Химмотология разделяет свойства топливо-смазочных материалов на три группы: физико-химические; эксплуатационные; экологические.

К физико-химическим относят свойства, определяемые в лабораториях, например: плотность, вязкость, испаряемость, теплота сгорания и т.д. К эксплуатационным - свойства, проявляющиеся непосредственно в двигателе, например: детонационные свойства, склонность к образованию отложений, противоизносные, антикоррозионные свойства и др. К экологическим – свойства, оказывающие влияния на окружающую среду, например: загрязнение воздуха продуктами, выделяющимися при работе двигателя, пожаро- и взрывоопасность и др. Отдельные свойства топливо-смазочных материалов и их комплекс используют для характеристики качества продукта по показателям качества, например: октановое число топлива, температура застывания, температура вспышки и т.д. С помощью специальных испытаний можно произвести оценку качества, т.е. количественно определить качество топливо-смазочного материала. Качество топливо-смазочных материалов оценивают лабораторными (физико-химическими) и специальными методами.

Лабораторные методы используют при определении физико-химических показателей и для косвенной оценки отдельных функциональных свойств. Основным достоинством этих методов является то, что с их помощью можно выполнить дифференцированную оценку отдельных свойств топливо-смазочных материалов. Однако вследствие большой сложности и взаимосвязи процессов, происходящих в двигателе,

лабораторные методы не дают возможности получить достаточно полное представление о работе топливо-смазочных материалов в реальных условиях.

Специальные методы предназначены для прямой оценки эксплуатационных свойств топливо-смазочных материалов. К ним относят эксплуатационные испытания и квалификационные методы испытаний. Эксплуатационные испытания проводят на натуральных объектах в условиях, максимально приближённых к реальным условиям эксплуатации. Основной недостаток - большая длительность (до нескольких лет). Проводят при допуске новых сортов, при подборе к конкретным двигателям и машинам, при подборе к конкретным условиям эксплуатации, при разработке новых двигателей и машин.

Квалификационные методы испытаний проводят на стендах с использованием модельных установок, натуральных агрегатов, одноцилиндровых установок, полноразмерных двигателей. Эти методы по сравнению с лабораторными позволяют более точно и полно оценить эксплуатационные свойства топливо-смазочных материалов, а по сравнению с эксплуатационными методами - упростить условия и значительно сократить длительность испытаний. Кроме того, по сравнению с эксплуатационными квалификационные методы позволяют уменьшить, а иногда и устранить, влияние посторонних факторов на исследуемый показатель, следовательно, повысить точность и объективность испытаний. Используют для установления связей между показателями качества топливо-смазочных материалов и конструкцией двигателя, разработки требований к качеству топливо-смазочных материалов и т.д. Однако окончательное решение принимают на основании эксплуатационных испытаний.

Однако повышение величины показателя ведет к увеличению производственных затрат. Поэтому повышение качества необходимо рассматривать в связи с повышением стоимости производства продукта и экономией, при его использовании. Использование топливо-смазочных материалов с необоснованным запасом качества приводит к нерациональным расходам в нефтеперерабатывающей промышленности, а потребление топливо-смазочных материалов, не отвечающих требованиям эксплуатации, - к снижению надёжности двигателей, машин и механизмов.

Не менее важным, а иногда и основным, является условие устранения отрицательного экологического воздействия продуктов переработки топливо-смазочных материалов в двигателе.

8. ПРОИЗВОДСТВО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Россия одно из немногих крупных индустриальных государств использующее в своём экономическом развитии собственные топливно-энергетические ресурсы. И главным источником для производства топлив, смазочных материалов, тормозных и амортизационных жидкостей является нефть. Кроме того, из нефти получают обивочные материалы, пластические массы, резиновые изделия и т.д., т.е. почти все неметаллические материалы, применяемые в автомобиле.

Нефть используется и в других отраслях промышленности для тех же целей что и в автомобилестроении, и, кроме того, для получения растворителей, асфальта, синтетических моющих средств, кокса и многого другого.

Нефть относится к невозобновляемым видам сырья, запасы её ограничены. Старые месторождения нефти истощаются, но, несмотря на использование современных технологий, в земле остаётся половина запасов, т.к. извлекать нефть полностью пока не удаётся.

Новые месторождения открывают, как правило, в труднодоступных, малообжитых районах, либо на морском шельфе. В связи с этим запасы на добычу нефти велики. Поэтому развитие производства и потребления автомобильных топливо-смазочных материалов идёт по трём основным направлениям:

I. Увеличение ресурсов жидких нефтяных топлив:

- углубление переработки нефти (увеличение выхода топлива);
- оптимизация качества топлив.

II. Снижение расхода топлива в двигателях:

- перевод автомобилей на дизельные двигатели – они расходуют топлива на 25...30 % меньше, чем бензиновые двигатели;
- конструктивное усовершенствование двигателей;
- снижение фактического расхода в условиях эксплуатации.

III. Применение альтернативных топлив:

- сжиженные и сжатые газы;
- из углей, сланцев и др. горючих ископаемых;
- кислородосодержащие топлива (спирты, эфиры и др.).

8.1. Нефть

Природная нефть представляет собой маслянистую светлороманную, чёрную, или бурозелёную жидкость – в зависимости от месторождения. У нефти различен не только цвет, но запах и вязкость. Плотность нефти также меняется – в пределах 700...900 кг/м³. Теплота сгорания нефти 43000...45500 кДж/кг.

Нефть, как сырьё для производства топлив и масел, обладает рядом достоинств. По калорийности (1 кг нефти при сгорании выделяет столько

же тепла, сколько 1,3 кг антрацита или 3 кг бурого угля). По способу добычи (себестоимость добычи нефти в 6 раз ниже, чем угля). Удобство транспортирования нефти создает дополнительные преимущества перед другими видами сырья.

Различают элементный и групповой составы нефти.

Элементный состав нефти. Основные элементы это углерод (84...87 %), водород (12...15 %), сера (3...4 %), остальное – азот, кислород. В нефти обнаружено в незначительных количествах большинство известных химических элементов, в том числе и металлов.

Групповой состав нефти. Нефть, будучи сложной по химическому составу и структуре жидкостью, состоит в основном из углеводородов, подразделяемых на следующие группы (ряды): метановые (насыщенные, парафиновые, предельные, алканы) с общей структурной формулой C_nH_{2n+2} ; нафтеновые (полиметиленовые, цикланы) с общей структурной формулой C_nH_{2n} и ароматические (бензолные, арены) с общей структурной формулой C_nH_{2n-6} . Присутствие углеводов разных групп, соотношение которых зависит от месторождений нефти, по-разному влияет на свойства получаемых топлив и масел.

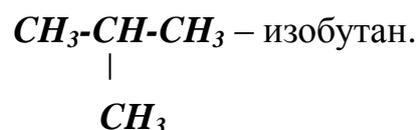
Плотность, вязкость, температура плавления и кипения углеводородов увеличиваются с ростом их молекулярной массы, которая, как и структура молекул, определяет свойства углеводородов в каждой группе. В обычных условиях углеводороды, содержащие от 1 до 4 атомов углерода, являются газами. В состав бензина и дизельного топлива входят жидкие углеводороды (от 5 до 20 атомов углерода). Моторные масла содержат углеводороды с числом атомов углерода в молекуле от 20 до 70.

Алкановые углеводороды (парафины) – газообразные, жидкие или твердые вещества представляют собой сочетание углеродных и водородных атомов в виде незамкнутой цепочки. Их общая эмпирическая формула – C_nH_{2n+2} .

Газообразные соединения, входящие в состав попутных и природных газов (метан, этан, пропан, бутан, изобутан), содержат от 1 до 4 атомов углерода. Они обладают высокой детонационной стойкостью. Октановые числа их по моторному методу или близки к 100 или выше. Соединения, содержащие от 5 до 15 атомов углерода, – жидкие вещества, а начиная с гексадекана ($C_{16}H_{34}$), – твердые вещества. При обычной температуре они могут находиться в растворенном или кристаллическом состоянии в нефти и высококипящих фракциях. Содержание алканов в нефти зависит от месторождения: без растворенных газов оно составляет 25...30 %; с учетом находящихся в растворенном состоянии углеводородов – 40...50 %. Иногда содержание алканов достигает 50–70 %, однако некоторые нефти содержат 10...15 % алканов.

Цепочка алканов может быть прямой (такие алканы называют нормальными – н) и разветвленной (изомерные алканы).

Разветвление цепочки возможно от бутана и выше:



С увеличением молекулярной массы температура кипения, плотность, вязкость парафиновых углеводородов повышаются. Изопарафины обычно имеют более низкие температуры кипения и плавления. Они устойчивы к действию кислорода при высоких температурах, в то время как н-парафины легко окисляются при повышенных температурах. Многие парафиновые углеводороды имеют высокие температуры застывания. При нормальных температуре и давлении они слабо взаимодействуют с кислородом и другими веществами, отличаясь способностью только к реакциям замещения. Их вязкость небольшая, с изменением температуры меняется в меньшей степени, чем у других классов углеводородов.

Из всех классов углеводородов алкановые имеют наиболее высокую теплоту сгорания. Их присутствие в нефтепродуктах не вызывает вредного влияния на резиновые изделия. В целом топлива и смазочные материалы, содержащие большое количество алкановых углеводородов, отличаются высокой стабильностью. При получении высококачественных автомобильных бензинов желательное присутствие изопарафинов (н-парафины снижают детонационную стойкость бензинов). В то же время легкоокисляющиеся н-парафины, уменьшая время с момента подачи топлива до его воспламенения, способствуют более плавному нарастанию давления и лучшей работе двигателя. Поэтому их содержание в более тяжелых дизельных топливах предпочтительно (однако в зимних сортах содержание их ограничивают).

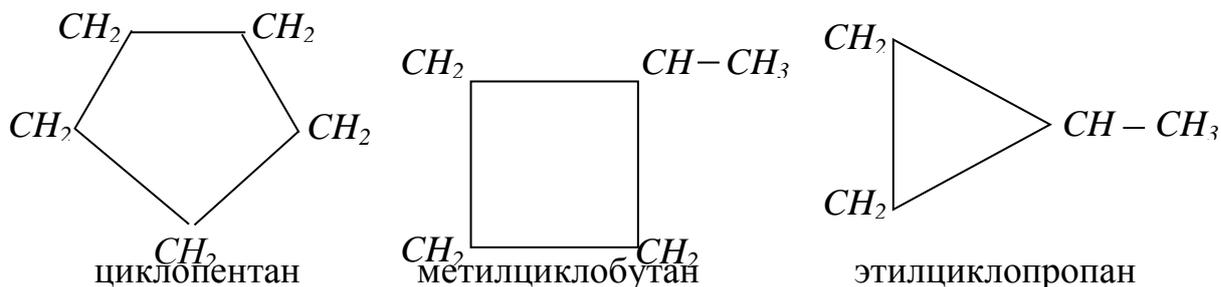
Так как смазочные материалы, содержащие парафиновые углеводороды, имеют высокие температуры застывания, их применение в холодное время затруднено. Поэтому для обеспечения текучести при относительно низкой температуре такие масла нужно подвергать депарафинизации, т. е. из них должны быть удалены алкановые углеводороды, имеющие высокую температуру плавления.

Нафтеновые углеводороды (цикланы) представляют собой циклические насыщенные углеводороды, в которых смежные углеродные атомы, соединяясь друг с другом одной валентной связью, образуют замкнутую (циклическую) структуру. В нефти и нефтепродуктах содержатся главным образом моноциклические пяти- и шестичленные представители нафтенного ряда (их иногда называют циклопарафинами) и их производные с общей формулой C_nH_{2n} .

В топливах присутствуют моноциклические нафтенные углеводороды, молекулы которых содержат по одному кольцу с пятью или

шестью атомами углерода, это:

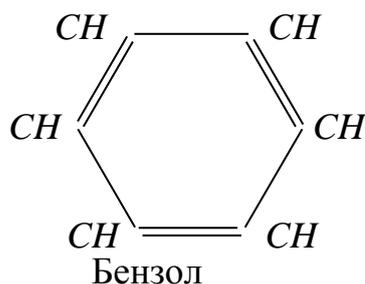
Изомерия C_5H_{10}



Большое количество нефти характеризуется наличием значительной массы нафтеновых углеводородов: в продуктах со средними температурами выкипания их содержится 60...70 %, в масляных фракциях – 70 % и более. Циклическое строение предопределяет высокую химическую прочность углеводородов, обуславливает хорошие низкотемпературные свойства нефтепродуктов. Нафтеновые углеводороды обладают меньшей теплотой сгорания по сравнению с парафиновыми углеводородами, но более высокой детонационной стойкостью, являются желательными компонентами в топливах для карбюраторных двигателей и зимних сортов дизельных топлив.

В масляных фракциях эти углеводороды, с одной стороны, увеличивают вязкость и улучшают маслянистость, а с другой – улучшают вязкостно-температурные свойства из-за наличия в них нафтеновых углеводородов с длинными боковыми цепями.

Ароматические углеводороды (арены). К ним относят углеводороды, молекулы которых содержат бензольные кольца с тремя одинарными связями, чередующимися с двойными:



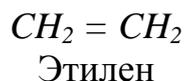
Ароматические углеводороды входят в состав нефтей в меньшем количестве, чем парафиновые и нафтеновые. Их общее содержание в различной нефти составляет в среднем 5...20 % (массы). Этот класс углеводородов представлен в нефти бензолом и его гомологами, а также производными би- и полициклических соединений. Легкие нефтепродукты (бензины) включают моноциклические углеводороды (общая формула C_nH_{2n-6}), состоящие из бензольного кольца с одной или несколькими

боковыми парафиновыми цепями.

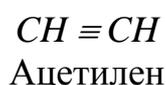
Арены из-за высокой термической устойчивости являются желательными составляющими в топливах для карбюраторных двигателей, так как у них самые высокие октановые числа из всех групп углеводородов. Учитывая их высокую нагарообразующую способность, присутствие в бензинах ароматических углеводородов допускается до определенного предела – 40...45 %. В дизельных топливах вследствие высокой термической стабильности ароматических углеводородов их присутствие является нежелательным. Ароматические углеводороды по сравнению со всеми другими группами углеводородов являются наиболее агрессивными по отношению к резиновым изделиям и имеют самую низкую теплоту сгорания.

Непредельные углеводороды. Непредельные соединения (алкены, ди-, три- и полиены, алкины) в сырой нефти и природных газах отсутствуют. Они образуются в процессах переработки нефти. Непредельные соединения являются важнейшим сырьем для нефтехимического и основного органического синтеза.

Чаще всего в нефтепродуктах присутствуют олефиновые углеводороды – алкены (C_nH_{2n}) с одной двойной связью, например:



Распространены диолефиновые углеводороды, имеющие две двойные связи ($C_n H_{2n-2}$). Для непредельных углеводородов характерны реакции присоединения. Они также склонны к реакциям конденсации и полимеризации. В эксплуатационных условиях низкая химическая стойкость олефинов играет отрицательную роль, так как понижается стабильность нефтепродуктов. Так, бензины термического крекинга из-за окисления их олефиновой составной части осмоляются при хранении, загрязняют жиклеры карбюраторов, впускной трубопровод. Поэтому непредельные углеводороды нежелательны во всех нефтепродуктах, а из масел их удаляют путем очистки.



Сернистые соединения. В настоящее время нефть, как правило, является сернистой или высокосернистой. Переработка такой нефти и использование нефтепродуктов в качестве топлив требует дополнительных затрат. Так, увеличение содержания серы в бензине от 0,033 до 0,15 % (масс.) снижает мощность двигателя на 10,5 %, увеличивает расход топлива на 12 %, приводит к увеличению количества капитальных ремонтов двигателей в два раза. Кроме эксплуатационных убытков, использование сернистых топлив наносит большой вред

окружающей среде, так как выделяющиеся при их сгорании в двигателях окислы серы вредны для человека и губительно действуют на растения. Сернистые соединения нефти по ее фракциям распределены неравномерно. С повышением температуры перегонки содержание сернистых соединений увеличивается. В тяжелых нефтяных остатках, особенно в асфальтосмолистой части, содержится 70...90 % (массы) сернистых соединений. Сернистые соединения делят на активные и неактивные. К активным относят соединения, способные корродировать металлы при нормальных условиях (элементарная сера S , сероводород H_2S и меркаптаны RSH , где R – углеводородный радикал). Находящаяся в растворенном или во взвешенном состоянии элементарная сера способна вызывать сильную коррозию металлов даже при низких температурах, и поэтому она относится к коррозионно-активным агентам.

К группе коррозионно-активных сернистых соединений относят сероводород, который в присутствии воды обладает свойствами слабой кислоты и способен замещать свой водород на металл.

В меркаптанах RSH по сравнению с сероводородом один атом водорода замещен на одновалентный углеводородный радикал, что, однако, не устраняет у них кислых свойств. Меркаптаны, корродирующие металлы при обычных условиях, также относят к коррозионно-активным сернистым соединениям. Обменивая водород, находящийся при атоме серы, на металл, они образуют меркаптиды RSM , где M – одновалентный металл, что и объясняет их агрессивность. В соответствии со стандартом присутствие активных сернистых соединений в нефтепродуктах не допускается.

Если при нормальных условиях металлы, контактирующие с неактивными сернистыми соединениями, не корродируют, то при полном сгорании топлива в двигателе соединения серы образуют сернистый и серный ангидриды, способные вызвать коррозию и дающие в соединении с водой еще более активные коррозионные агенты – сернистую и серную кислоты.

Неактивные сернистые соединения состоят из сульфидов ($R-S-R$) – до 75...80 %, дисульфидов ($R-S-S-R$) и полисульфидов ($R-S_n-R$). В малосернистых нефтях содержание сернистых соединений колеблется от 0,1 до 0,5 %, а в сернистых – до 4 % и более. После перегонки сернистых нефтей в бензиновых фракциях содержится 0,15...0,2 % серы, в керосиновых – до 1,0 %, а в соляровых – до 2,0 %.

Кислородные соединения. Кислородосодержащие соединения в нефтях редко составляют больше 10 % (масс.). Эти компоненты нефти представлены кислотами, фенолами, кетонами, эфирами и др. Основная их часть сосредоточена в высококипящих фракциях, начиная с керосиновой. Органические кислоты – простейшие кислородные

соединения ($R-COOH$, где R – углеводородный радикал, а $COOH$ – карбоксильная группа) присутствуют в любой нефти, во всех топливах и смазочных материалах. Больше всего в нефтях и нефтепродуктах нафтеновых кислот ($C_n H_{2n-1} COOH$), представляющих собой высококипящие (выше $200\text{ }^\circ\text{C}$) маслянистые жидкости, сильно корродирующие некоторые цветные металлы (свинец, цинк и др.).

Смолисто-асфальтеновые вещества (смолы, асфальтены и др.) не относят к определенному классу органических соединений. Они представляют собой сложную смесь высокомолекулярных соединений гибридной структуры, включающую в состав молекул азот, серу, кислород, а также некоторые металлы. Их содержание в нефтях колеблется: от десятых долей процента до десятков процентов. В зависимости от растворимости компонентов смолисто-асфальтеновых веществ в растворителях их классифицируют по фракциям. Карбоиды – вещества, практически нерастворимые ни в чем. Карбены – вещества, растворимые в сероуглероде, но не растворимые в бензоле. Асфальтены – вещества, растворимые в бензоле, но не растворимые в предельных углеводородах C_5 – C_8 . Мальтены – вещества, растворимые в низкокипящих насыщенных углеводородах C_5 – C_8 и представляют собой смесь смол и масел.

Азотистые соединения. Содержатся в нефти, по сравнению с кислородными и сернистыми соединениями в значительно меньших количествах и поэтому не оказывают заметного влияния на свойства топлив и смазочных материалов. Они неравномерно распределены по фракциям нефти и в большинстве случаев больше половины их содержится в смолисто-асфальтеновой части. Бензиновые фракции практически не содержат азота. Некоторая часть азотистых соединений сосредоточена в дизельной и газойлевой фракциях.

8.2. Переработка нефти

8.2.1. Получение топлив прямой перегонкой

Прямая перегонка – это первичный этап переработки нефти. Она представляет собой разделение содержащихся в нефти углеводородных фракций, имеющих разную температуру кипения, путем постепенного или однократного нагревания на нефтеперегонных установках. На рис. 56 изображена схема установки атмосферно-вакуумной перегонки нефти: 1 – погруженные холодильники, 2 – теплообменники. Современная установка по переработке нефти работает по непрерывному циклу. Установка состоит из атмосферной и вакуумной ректификационных колонн, где создают условия, обеспечивающие достаточно полное испарение, вводимого сырья. Этими условиями являются температура и давление. Проходя через ряд теплообменников, нефть подогревается до $160\text{...}180\text{ }^\circ\text{C}$, очищается от грязи, воды и поступает в испаритель, где из нее испаряются

вначале самые легкие углеводороды. Нефть под давлением подают насосами в печь, где её нагревают до температуры 330...350⁰ С.

Горячая нефть, вместе с парами попадает в среднюю часть атмосферной ректификационной колонны, где она вследствие снижения давления дополнительно испаряется и, испарившиеся углеводороды, отделяются от жидкой части нефти – мазута. Пары углеводородов поднимаются вверх, а жидкий остаток стекает вниз. По пути движения паров углеводородов устанавливаются ректификационные тарелки, на которых конденсируется часть паров углеводородов. Температура по высоте колонны уменьшается от максимальной в зоне ввода продукта до минимальной вверху.

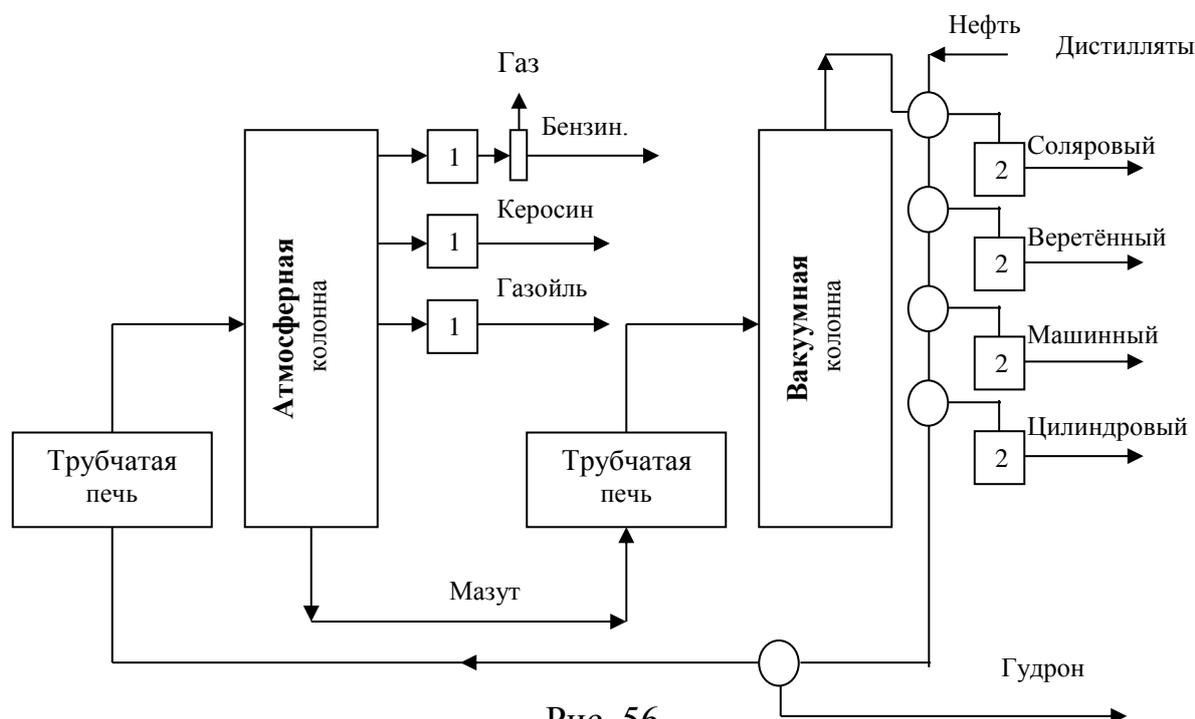


Рис. 56.

Таким образом, в ректификационной колонне по её высоте углеводороды нефти разделяют на фракции в зависимости от температуры кипения. Вверху колонны оседают бензиновые фракции с температурой кипения от 30 до 180...205⁰ С; ниже – легроиновый дистиллят (120...240⁰ С); керосиновый дистиллят (150...315⁰ С); дизельный дистиллят (150...360⁰ С); газойлевый дистиллят (230...360⁰ С).

Мазут в зависимости от его состава можно использовать или в виде топлива, или подвергают дальнейшему разделению в вакуумной ректификационной колонне, или в качестве сырья используют на установке крекинга. Перед поступлением в вакуумную ректификационную колонну мазут нагревают до 420...430⁰ С. Давление в вакуумной колонне 5300...7300 Па. Температура кипения в вакууме у углеводородов снижается, что позволяет испарить тяжелые углеводороды без разложения. При нагревании нефти выше 430⁰ С может начаться термическое

разложение углеводородов. В вакуумной колонне сверху отбирают соляровый дистиллят (300...400⁰ С), ниже масляные фракции и далее полугудрон или гудрон, из которых путём глубокой очистки делают высоковязкие остаточные масла.

Сначала веретённый дистиллят, затем машинный или автоловый, и, последний, цилиндрический. В отличие от дистиллятных остаточные масла характеризуются большой малярной массой, а, следовательно, более высокой температурой кипения, плотностью и вязкостью. Большинство сложных кислородо-серосодержащих соединений также обладают большой малярной массой и остаётся в гудроне. Поэтому остаточные масла содержат эти соединения в большем количестве, чем дистиллятные.

Получаемые путем прямой перегонки дистилляты служат в основном лишь сырьем для товарных нефтепродуктов. Такое сырье затем подвергают специальной очистке и смешению в определенных пропорциях с топливными фракциями, полученными другими способами. Прямая перегонка нефти дает примерно 10 ... 15% бензина, 15 ... 20% реактивного топлива или керосина, 15 ... 20% дизельного топлива и около 50% мазута. Обладая высокой химической стабильностью, прямогонные нефтепродукты имеют недостаточно высокий выход светлых нефтепродуктов (бензина, керосина, дизтоплива).

8.2.2. Вторичная переработка нефти

С целью увеличения выхода получаемых из нефти топливных фракций осуществляют переработку высококипящих нефтяных продуктов путем расщепления тяжелых углеводородных молекул на более легкие под воздействием высоких температур. Еще в 1891 г. эта идея была выдвинута русским инженером В.Г. Шуховым; теоретические основы разработал русский химик А.А. Летний. В 1875 г. он описал процесс разложения тяжелых углеводородов на более легкие при их нагревании. Этот процесс называют *деструкцией*, а соответствующий процесс преобразования углеводородов – крекинг-процессом или *крекингом*.

Термический крекинг – такой вид деструктивной переработки нефтяного сырья, при котором расщепление и изменение структуры углеводородов происходят под действием температуры и давления по следующей схеме:



Сырьем для получения автомобильного бензина при термическом крекинге (температура 470...540 °С, давление от 2 до 7 МПа) являются углеводороды большой молекулярной массы (мазут, керосиногазойлевые фракции и т. д.). Углеводороды расщепляются с образованием более легких фракций (бензиновой, лигроиновой и керосиновой), выход которых

зависит от вида сырья и режима процесса: при крекинге мазута получают 25...30 % бензина (в остатке – 5...8 % газа и крекинг-мазут), а при крекинге газойля – 60 %.

Крекинг-бензин характеризуется низкой химической стабильностью и невысоким октановым числом (66...68 по моторному методу), так как при термическом крекинге, как правило, образуются парафиновые и ненасыщенные углеводороды олефинового и диолефинового рядов. Его используют в качестве компонента при получении товарных автомобильных бензинов, правда, с каждым годом во все более меньших количествах (на новых нефтеперерабатывающих заводах установки термического крекинга не применяют).

Коксование – это процесс получения дистиллята широкого фракционного состава и нефтяного кокса из мазута, полугудрона, гудрона, крекинг-остатков и др. методом их нагревания без доступа воздуха. Коксование нефтяных остатков протекает при 505–515 °С под давлением 0,2–0,3 МПа. Бензин, полученный коксованием, отличается низким октановым числом (60...67 по моторному методу) и значительным содержанием серы (1...2 %).

Каталитический крекинг – это основной метод получения высококачественного и стабильного бензина из тяжелых фракций, выкипающих при температуре 300...500 °С. Его особенность по сравнению с термическим крекингом состоит в использовании катализаторов. При применении последних процессы деструкции позволяют получить изомерные, наиболее ценные для бензинов углеводороды. В качестве сырья используют газойлевую или соляровую фракции прямой перегонки нефти, а иногда соляровый дистиллят вакуумной перегонки мазута. Условия проведения каталитического крекинга таковы: температура – 450...525 °С, давление – 0,06...0,14 МПа (близкое к атмосферному), алюмосиликатные катализаторы (10...30 % Al_2O_3 , 70...90 % SiO_2 , небольшое количество других окислов, например, Fe_2O_3 и CaO). Ряд установок в последнее время переводят на новые цеолитсодержащие катализаторы, которые активнее алюмосиликатов. Основное же их достоинство – они еще больше увеличивают содержание в бензине изомерных соединений и уменьшают количество ненасыщенных углеводородов.

Каталитический крекинг дает возможность получать продукты, где содержание изоалканов и ароматических углеводородов достигает 55%, цикланов – 20...25%. В результате термического крекинга образуются продукты с высоким содержанием алкенов и алкадиенов, что является основной причиной их низкого качества. По этой причине они составляют всего 5...9 % от общего количества. Выход бензиновых фракций в данном случае достигает 50% и более.

Продукция каталитического крекинга – бензиновый дистиллят

(применяется как компонент товарных бензинов), богатый изоалканами, цикланами и ароматическими углеводородами. Он имеет хорошую химическую стабильность, так как в нем практически отсутствуют непредельные углеводороды. Октановое число фракции составляет 78...85 (по моторному методу). Таким образом, каталитический крекинг позволяет увеличить выход бензина с одновременным повышением его качества.

Каталитический риформинг. В отечественной нефтеперерабатывающей промышленности риформинг занимает важное место и является основным способом производства высококачественных бензинов (в частности, бензинов АИ-93 и АИ-98).

В качестве сырья для этого процесса переработки нефтепродуктов обычно используют бензиновые фракции первичной перегонки нефти, выкипающие в пределах 85...180 °С. Риформинг проводят в среде водородосодержащего газа (7...90 % H_2), остальное – низшие углеводороды) при температуре 480...540 °С, давлении 2...4 МПа и в присутствии молибденового (гидроформинг), или платинового (платформинг) катализатора. Платформинг, как более удобный и безопасный процесс, в значительной степени вытеснил гидроформинг. Бензин каталитического риформинга – высокооктановый компонент автомобильных бензинов. Его октановое число – 85 по моторному методу и 95 по исследовательскому. Используют также для выделения аренов, составляющих в этих бензинах 50...60 % (массы).

Гидрокрекинг – процесс переработки нефтепродуктов, сочетающий крекирование и гидрирование сырья – газойлей, нефтяных остатков и др. Гидрокрекинг является разновидностью каталитического крекинга, но уже в присутствии водорода. Процесс проводится под давлением водорода 15...20 МПа при температуре 370...450 °С в присутствии алюмокобальтмолибденового или алюмоникель-молиб-денового катализатора. Октановые числа бензиновых фракций гидрокрекинга – 85...88 (по исследовательскому методу). Гидрокрекинг повышает выход светлых нефтепродуктов (бензина, дизельного топлива, реактивного топлива).

Выход бензинов в продуктах термического и даже каталитического крекинга не превышает 40...50% от исходного сырья, что обусловлено недостатком в них водорода. Кроме увеличения выхода целевого продукта, гидрокрекинг может быть использован и для гидроочистки продукта прежде всего от серы, что имеет большое значение, особенно при переработке сырья с высоким ее содержанием.

Синтезирование. Для получения индивидуальных углеводородов, обладающих высокими антидетонационными свойствами и используемых в качестве добавок к бензинам (изооктан, алкилбензин, алкилбензол и др.), применяют синтезирование. Эти процессы осуществляют в присутствии катализаторов.

Алкилбензин получают из газов крекинга и риформинга. При алкилировании к молекулам углеводородов присоединяются алкильные радикалы. При изомеризации происходит перегруппировка атомов в молекуле, в результате чего образуются молекулы с изоструктурой, обеспечивающей требуемые свойства топлив. Сырьем при изомеризации служат легкие прямогонные бензиновые фракции.

8.3. Очистка топливных дистиллятов и получение бензинов

Для выработки топлива с необходимыми эксплуатационными свойствами от нежелательных компонентов очищают дистилляты, полученные путем прямой перегонки нефти. В результате перегонки нефти из нее не удаляются смолисто-асфальтовые вещества, сернистые соединения, органические кислоты и другие нежелательные примеси, ухудшающие качество топлива. Смолисто-асфальтовые вещества увеличивают нагароотложение на деталях; сернистые соединения и кислоты влияют на коррозию и износ деталей; непредельные углеводороды снижают стабильность топлив. Топливные дистилляты в этом случае нельзя использовать непосредственно как товарное топливо. Существуют химические и физические методы очистки.

Химическая – это очистка нефтепродуктов серной кислотой, щелочью, солями и поглотительными растворами, вступающими в химические реакции с вредными соединениями. Продукты реакции, образовавшиеся при обработке, удаляют из дистиллятов промывкой водой и водными растворами щелочи с последующим отстаиванием.

Физическая – это очистка нефтепродуктов специальными адсорбентами (поглотителями) и растворителями, адсорбирующими вредные соединения или растворяющими их. В качестве адсорбентов используют твердые вещества с тонкой пористой структурой (активированный уголь, силикагель, различные глины). Такая очистка основана на избирательном поглощении соответствующих соединений, находящихся в очищаемом продукте. Смолистые, сернистые и азотистые вещества собираются на пористой поверхности адсорбента и их удаляют вместе с ним. Адсорбционная очистка производится посредством фильтрования паров топлива через определенный слой адсорбента. Расход последнего составляет 1... 2 % от массы топлива.

В настоящее время для удаления серы широко применяют метод гидроочистки (каталитический процесс). Процесс протекает в атмосфере водорода при температуре от 300 до 430 °С и давлении до 5...7 МПа в присутствии катализатора (обычно соединения кобальта и молибдена). Таким методом удается снизить содержание серы в топливе на 90...92 %. Таким образом, методы очистки топливных дистиллятов (химические и физические) применяют в различных комбинациях в зависимости от

способа получения нефтепродуктов, их назначения, наличия нежелательных примесей и требований к глубине очистки.

Низкотемпературные свойства топлив (прежде всего дизельных) улучшаются при применении депарафинизации - частичном удалении парафина. В качестве растворителей используют ацетон и жидкий пропан, дихлорэтан и другие жидкости, имеющие низкую температуру кипения. Смесь охлаждают и после застывания парафина фильтруют. Парафин остается на фильтре, а растворители снова используют для очистки топлива после их отгонки. Для получения товарных сортов топлив смешивают различные очищенные топливные дистилляты, добавляя в них присадки – вещества, ввод которых в небольших количествах существенно улучшает один или ряд показателей эксплуатационных свойств нефтепродуктов.

Присадки к топливам подразделяют по их целевому назначению. Разработаны и применяют следующие группы присадок.

I группа – улучшающие процесс сгорания топлива в двигателях: антидетонаторы, уменьшающие нагарообразование, сокращающие задержку воспламенения, и противодымные.

II группа – способствующие сохранению первоначальных показателей качества топлива: антиокислительные, замедляющие процессы окислительной полимеризации в топливе; деактиваторы металлов и диспергирующие присадки, препятствующие выделению различных осадков из топлив.

III группа – предотвращающие вредное воздействию топлив на топливную аппаратуру, топливопроводы, емкости для хранения и топливные баки – это противоизносные и противокоррозионные, а также моющие присадки.

IV группа – облегчающие эксплуатацию двигателей при низких температурах, т.е., вещества, понижающие температуру застывания топлив (депрессаторы) и предотвращающие выделение кристаллов льда. В зависимости от назначения топлив в них вводят композиции из перечисленных видов присадок.

Для бензинов чаще всего применяют антидетонаторы, антиокислительные и моющие присадки. Присадки к топливам имеют широкий ассортимент, но только некоторые из них используются в практике. В таблице 8.1 представлены типы присадок к топливам, допущенные к применению в России.

Топливо необходимого качества и назначения готовят посредством смешивания нескольких составных частей дистиллятов с добавлением в смесь различных присадок и добавок, улучшающих качество. Преобладающий по качеству дистиллят называют базовым, или основным, соотношение которого должно быть таким, чтобы топливо отвечало техническим условиям или стандартам.

Таблица 8.1

Тип присадки	Назначение
Антидетонаторы	Повышение ОЧ автобензинов
Промоторы воспламенения	Повышение цетанового числа дизельных топлив
Антиоксиданты	Повышение окислительной стабильности бензинов при хранении
Комплексные стабилизаторы	Повышение химической стабильности дизельных топлив при хранении
Биоциды	Придание топливам стойкости к биопоражению
Депрессоры и диспергаторы парафинов	Улучшение низкотемпературных свойств дизельных топлив
Антиобледенительные	Предотвращение обледенения заслонки карбюратора
Антидымные	Снижение дымности отработавших газов дизельных двигателей
Катализаторы горения	Улучшение сгорания автобензинов и дизельных топлив
Моющие	Поддержание оптимального режима работы двигателя за счёт уменьшения образования нагара и отложений
Противоизносные	Увеличение ресурса работы топливной аппаратуры на малосернистом дизельном топливе
Прирабочные	Ускорение приработки двигателя в процессе изготовления и эксплуатационной обкатки
Красители	Маркирование топлив с разными целями

Топлива из нефтяных газов. По происхождению нефтяные газы подразделяются на естественные, выделяющие попутно с нефтью из скважин или добываемые в газовых месторождениях независимо от нефти, и искусственные (промышленные), к которым относят газы, получаемые при прямой перегонке нефти и при деструктивной переработке нефтяного сырья. Естественные нефтяные газы – это алканы (от метана CH_4 и выше), в которых в виде примесей могут присутствовать, небольшие количества CO_2 , N_2 и H_2S .

По углеводородному составу газы, получаемые при перегонке нефти, качественно почти не отличаются от состава естественных газов. Однако количественное отличие характеризуется меньшим содержанием CH_4 и большим C_3H_{12} и выше. При переработке нефтяных газов получают как газообразные, так и жидкие топлива.

8.4. Получение масел

Моторные (минеральные) масла состоят из основы (базовые масла) и присадок, на долю которых приходится в среднем 3...12 % (иногда до 20 %). Базовые масла, химический состав которых зависит от качества нефти, пределов выкипания отбираемых масляных фракций, методов и степени их очистки, вырабатывают из мазута, подвергая его перегонке в вакууме, что позволяет снизить температуру нагрева до 420...430 °С. При этом выделяют ряд фракций (дистиллятов), отличающихся различным уровнем вязкости.

Продукты вакуумной перегонки мазута – это вакуум-соляр (самые легкие фракции), дистилляты легких и средних промышленных масел, тяжелые дистилляты моторных масел. Неотгоняемый остаток - это гудрон. Выход дистиллятных масел составляет около 50%.

Смазочные масла, которые готовятся непосредственно из дистиллятов, называются *дистиллятными* маслами. Трансмиссионные масла из остаточных масел (полугудрона). В некоторых случаях дистиллятные и остаточные масла смешивают в определенных пропорциях для получения базового масла с необходимым уровнем вязкости. Такие масла называют смешанными. Подчеркнем, что масляный дистиллят и дистиллятное масло являются двумя разными продуктами. Масляный дистиллят - это неочищенное масло, полупродукт, то дистиллятное масло представляет собой очищенное масло, готовое к применению.

Как дистиллятные, так и остаточные масла в дальнейшем очищают от сернистых соединений, органических кислот, смолисто-асфальтовых веществ и других нежелательных примесей, применяя деасфальтизацию, селективный и контактный способы очистки, депарафинизацию. На выбор способа очистки влияют качество исходного сырья и назначение вырабатываемого масла (например, остаточные масла из сернистых нефтей подвергают всем перечисленным способам очистки).

Наиболее совершенным и получившим широкое распространение способом очистки является *селективная очистка*. При таком способе очистки продукты перегонки мазута обрабатывают селективными (избирательными) растворителями, воздействующими на вещества, наличие которых нежелательно. После отстоя в резервуаре растворитель с нежелательными примесями масла (экстракт) собирается в нижнем слое, а в верхнем слое - очищенное масло (рафинат). Растворители подбирают в зависимости от того, какие вещества следует удалить из масла. При селективной очистке нежелательные примеси удаляются из масла почти полностью при сравнительно небольшом расходе селективного (избирательного) растворителя (фенола, фурфурола и др.), поэтому этот способ очистки относят к наиболее совершенным. Обработка масляных дистиллятов серной кислотой для извлечения из них смолистых веществ с последующей промывкой раствором щелочи с целью удаления остатков

серной кислоты называется **кислотно-контактной очисткой**.

Удаления из масляных дистиллятов парафиновых углеводородов, которые ухудшают низкотемпературные свойства масел представляет собой процесс **депарафинизации**. Масло обрабатывают растворителем с низкой температурой застывания (ацетон, жидкий пропан, дихлорэтан и др.). Раствор охлаждают, при этом парафиновые углеводороды застывают и их удаляют центрифугированием или фильтрацией. Известные способы получения и очистки смазочных масел не всегда позволяют получить товарные масла, удовлетворяющие требованиям современных двигателей и машин. Один из наиболее эффективных путей повышения качества смазочных масел - добавление различных присадок.

Трансмиссионные масла получают путем смешения остаточных масел (полугудрона) с маловязкими маслами с введением в них присадок. Второй способ получения трансмиссионных масел - смешение экстракта после селективной очистки масляных дистиллятов с маловязкими маслами и введением в них присадок.

9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОПЛИВАХ

9.1. Нефтяные топлива

Жидкие топлива (автомобильные бензины и дизельное топливо) характеризуются следующими основными качественными показателями: октановым и цетановым числами, испаряемостью, вязкостью, температурой застывания, температурой вспышки, воспламенения, самовоспламенения, плотностью, содержанием серы, механических примесей и воды. В соответствии с ГОСТ 425-83 и ГОСТ 305-82 показатели качества жидких топлив разделяются на обязательные для всех топлив (содержание серы, воды, механических примесей и др.) и обязательные для отдельных видов топлив (октановое и цетановое числа, фракционный состав, давление насыщенных паров).

9.1.1. Автомобильные бензины

Автомобильные бензины являются продуктами прямой перегонки и вторичной переработки более тяжелых нефтяных фракций. В соответствии с ГОСТ 2084-77 автомобильные бензины выпускаются четырех марок: А-72, А-76, АИ-93 и АИ-98. В настоящее время бензин А-72 выпускается в ограниченном количестве Ухтинским НПЗ.

Кроме того, выпускаются бензины: А-80 и А-92 (ТУ 38.001165-87), А-95 «Экстра» (ТУ 38.1011279-89), АИ-91 (ТУ 38.1011225-89), А-72-этилированный и А-93-этилированный (ТУ 38.4015856-93). Автомобильные бензины АИ-91, АИ-95 «Экстра» выпускаются только неэтилированными с содержанием свинца не более 0,01 г/дм³ бензина. Бензины остальных марок выпускаются как этилированные, так и неэтилированные.

По ГОСТ 2084-77 изменилась окраска этилированных бензинов. В бензин А-76, АИ-93 и АИ-98 вводятся соответственно желтый, темно-красный и ярко-синий антрахиноновые жирорастворимые красители в количестве 5...6 мг на 1 кг бензина, за счет этого этилированные бензины приобретают желтый, оранжево-красный и синий цвета. В таблице 9.2 приведена классификация автомобильных и авиационных бензинов, выпускаемых промышленностью в настоящее время, по октановому числу. Для двигателей автобусов применяются только неэтилированные бензины.

Октановое число (ОЧ) характеризует антидетонационные свойства бензина. Детонационная стойкость автомобильных бензинов, оцениваемая октановым числом, определяемым по моторному и исследовательскому методам.

Таблица 9.2

Марка бензина	Октановое число	
	моторный метод	исследовательский метод
А-76	76	85
АИ-91	83	91
АИ-93	85	93
АИ-95	86	95
АИ-98	89	98
Б-70	70	-
Б-91/100	91	-
Б-95/115	95	-
Б-100/130	100	-

Примечание. Буква «А» обозначает, что бензин автомобильный; буква «И» показывает, что октановое число (ОЧ) определено по исследовательскому методу, а цифры обозначают минимально допустимое ОЧ; буква «Б» обозначает бензин авиационный, в числителе октановое число, в знаменателе сортность бензина.

По **моторному методу**, ГОСТ 511-82, октановое число определяют на одноцилиндровой моторной установке ИТ 9-2М с переменной степенью сжатия, на обедненной смеси.

По **исследовательскому методу**, ГОСТ 8226-82, октановое число определяют на установке ИТ 9-6.

Моторная установка УИТ-65М позволяет определить октановое число обоими методами.

Октановое число, определенное по моторному методу, обычно меньше ОЧ определенного исследовательским методом (таблица 9.2).

Октановое число – это содержание (по объему) изооктана в смеси эталонных топлив, эквивалентной по детонационной стойкости исследуемому топливу.

Смесь эталонных топлив – это изооктан, детонационная стойкость которого принята за 100, и Н-гептан, детонационная стойкость которого

принята за нуль.

Требуемое октановое число бензина по исследовательскому методу может быть определено по следующей формуле:

$$\text{ОЧИ} = 125,4 - 413/\varepsilon + 0,183D,$$

где ε – степень сжатия; D – диаметр поршня, мм.

Автомобильные бензины делятся на *летние* и *зимние*, за исключением марки АИ-98. Бензин марки АИ-98 является *всесезонным*. Летние сорта бензина предназначены для применения во всех районах страны, кроме северных и северо-восточных, в период с 1 апреля по 1 октября. В южных районах бензины применяются всесезонно.

Зимние сорта бензина не теряют своих качеств при температуре до минус 60 °С и применяются в северных и северо-восточных районах всесезонно, в остальных районах с 1 октября по 1 апреля.

Автомобильные бензины применяют:

А-72 – для двигателей легковых автомобилей, автобусов, бензомоторного инструмента и для других двигателей со степенью сжатия 6,5...6,7, а также может применяться для двигателей, рассчитанных на работу с бензином А-66;

А-76 (А-80) – для двигателей автомобилей ЗИЛ-130, ЗИЛ-131, ГАЗ-53А, ГАЗ-66 и для других машин с двигателями со степенью сжатия 6,7...7,2;

АИ-93, АИ-95 – для новых моделей легковых автомобилей ГАЗ, «Москвич», ВАЗ, УРАЛ-375;

АИ-98 – для легковых автомобилей с высокой степенью сжатия.

Применение бензинов с октановым числом ниже рекомендуемого инструкцией недопустимо, т. к. при этом наблюдается детонация (взрывообразное сгорание горючей смеси), увеличение износа деталей двигателя и прогар прокладки головки цилиндров.

В таблице 9.3 приведены основные показатели качества автомобильных бензинов. Автомобильные бензины характеризуются следующими качественными показателями: температурой вспышки, температурой воспламенения, теплотой сгорания, фракционным составом.

Температура вспышки – это низшая температура, при которой пары топлива вспыхивают в присутствии открытого пламени. Пониженная против стандартов температура вспышки указывает на присутствие в топливе легких фракций, вследствие чего увеличивается пожароопасность топлива.

Температура воспламенения – это температура, при которой топливо воспламеняется и горит не менее 5 с в присутствии открытого пламени.

Теплота сгорания отражает количество теплоты, которое выделяется при сгорании 1 кг бензина, она колеблется в пределах 44000... 46000 кДж/кг.

Фракционный состав отражает содержание различных фракций в бензине, выраженное в объемных или массовых процентах. Чем больше в нем легких (выкипающих при низких температурах) фракций, тем выше давление его насыщенных паров и тем лучше его пусковые качества.

Кислотность бензина – показатель, характеризующий содержание в бензине кислот и других продуктов с кислотной реакцией. Его значение определяется количеством щелочи КОН в мг, которое необходимо для нейтрализации 100 мл бензина.

Таблица 9.3

Показатель	А-72	А-76	АИ-93	АИ-98
Детонационная стойкость:				
октановое число по моторному методу (\geq)	72	76	85	89
октановое число по исследовательскому методу (\geq)	Не нормируется		93	98
Фракционный состав:				
начало кипения, °С, не ниже	35	35	35	30
10 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше	70/55	70/55	70/55	70/55
50 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше	115/100	115/100	115/100	120/105
90 % бензина перегоняется при температуре, °С, не выше	180/160	180/160	180/160	180/160
конец кипения, °С, не выше	195/185	195/185	205/195	205/195
Давление насыщенных паров, кПа (\leq)	66,7/93,3	66,7/93,3	66,7/93,3	-
Содержание тетраэтилсвинца, г свинца на 1 кг бензина (\leq)	0,013	0,013/0,17	0,013	0,3
Содержание серы, % (\leq)	0,1	0,1	0,1	0,1
Концентрация фактических смол, мг на 100 мл (\leq):				
на месте производства:	5	5	5	-
на месте потребления:	10	10	7	7
Кислотность, мг КОН на 100 мл (\leq)	3	1/3*	0,8	2
Содержание водорастворимых кислот, щелочей, механических примесей и воды	нет	нет	нет	нет

Примечание. В числителе значения для летнего, в знаменателе – для зимнего сорта бензина. * В числителе – для неэтилированного бензина, в знаменателе – для этилированного бензина.

Индукционный период – показатель, оценивающий способность бензина сохранять свой состав неизменным при соблюдении условий перевозки, хранения и использования (стабильность).

Этот показатель определяют по времени в минутах от начала окисления бензина до активного поглощения им кислорода в лабораторной установке (герметичном сосуде) при искусственном окислении бензина ($t = (100 \pm 1) ^\circ\text{C}$, в атмосфере сухого и чистого кислорода, при $P = 0,7 \text{ МПа}$). Это время для бензинов различных марок колеблется от 60 до 90 мин, для бензинов высшего качества – 1200 мин.

Индекс испаряемости бензина (ИИ) – показатель, характеризующий испаряемость и склонность бензина к образованию паровых пробок при определенном сочетании давления насыщенных паров и объема испарившегося бензина при температуре плюс $70 ^\circ\text{C}$.

Индекс испаряемости бензина рассчитывается по формуле:

$$\text{ИИ} = 10\text{ДНП} + 7V_{70},$$

где ДНП – давление насыщенных паров, кПа; V_{70} – объем испарившегося бензина, при температуре $70 ^\circ\text{C}$, %.

С 1998 г. в России действует новый ГОСТ Р51105-97, определяющий новые качества автомобильных бензинов (таблица 9.4). По своим требованиям к показателям качества автомобильных бензинов ГОСТ Р51105-97 близок европейскому стандарту EN 228 и нормативам ЕВРО-2. В настоящее время в европейских странах действует новая редакция стандарта EN 228 с нормативами ЕВРО-3 и ЕВРО-4, где ужесточены требования к автомобильным бензинам (таблица 9.4).

Таблица 9.4

Параметры	Россия		ЕЭС		
	ГОСТ 2084.77	ГОСТ Р51105.97	Стандарт EN 228.2000		
			Нормативы		
			ЕВРО2	ЕВРО3	ЕВРО4
Максимальное содержание, %:					
бензола	-	5	5	1	1
серы	0,1	0,05	0,05	0,15	0,002
ароматических углеводородов	55	55	55	42	30
олефиновых углеводородов	20	20	20	18	14
Фракционный состав:					
до 100°C перегоняется, % (\geq)	-	40	40	46	46
до 150°C перегоняется, % (\geq)	-	-	-	75	75
до 180°C перегоняется, % (\geq)	-	85	85	-	-
Давление насыщенных паров, кПа (\leq)	-	35...100	-	60	60
Наличие моющих присадок	-	-	-	-	Да

Сравнение качества автомобильных бензинов показывает примерное равенство требований к высокооктановым сортам бензинов в России и других странах по октановым числам, но экологические требования к бензинам стран ЕЭС и США выше.

9.1.2. Дизельное топливо

В соответствии с ГОСТ 305-82, для различных условий применения вырабатывается дизельное топливо (ДТ) трех марок: Л; З; А.

Л – летнее для использования при положительной температуре.

З – зимнее для эксплуатации при температуре окружающего воздуха до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ с температурой застывания (потеря подвижности) не выше $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В тех случаях, когда двигатели эксплуатируют при температуре до $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, используют зимнее топливо с температурой застывания не выше $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

А – арктическое для эксплуатации при температурах окружающего воздуха не выше $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$.

По содержанию серы дизельное топливо делится на два вида:

I – с содержанием серы не более 0,2 % (по массе).

II – с содержанием серы от 0,2 до 0,5 %, но не более 0,4 % для арктического.

В условиях обозначения марок летнего топлива для высокооборотных дизельных двигателей входит массовая доля серы и температура вспышки: Л-0,5-40 – летнее топливо с содержанием серы до 0,5 % и температурой вспышки не менее $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В обозначения марок зимнего топлива входит массовая доля серы и температура застывания: З-0,2-минус 45 – зимнее топливо с содержанием серы до 0,2 % и температурой застывания не выше $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$; в обозначении арктического дизельного топлива указывается только массовая доля серы: А-04 или А-02 – арктическое топливо с содержанием серы до 0,4 % или до 0,2 %. По общероссийскому классификатору продукции (ОКП) дизельное топливо выпускается трех сортов: высшего, первого и без обозначения сорта.

Дизельное топливо марок Л, З, А высшего сорта выпускается с нормами по показателям: массовая доля серы не более 0,2 %, концентрация фактических смол на 100 c m^3 топлива не более 25 мг, зольность не более 0,008 %, коэффициент фильтрации не более 2.

Топливо для дизельных двигателей должно обеспечивать хорошее смесеобразование, мягкую работу, легкий запуск двигателя и полностью сгорать при бездымном выхлопе.

Важнейшим эксплуатационным показателем качества дизельного топлива является **цетановое число** (ЦЧ) – условный показатель самовоспламеняемости дизельного топлива, равный процентному содержанию цетана (углеводорода, обладающего легкой воспламеняемостью) в смеси с альфаметилнафталином (углеводородом, обладающим трудным воспламенением), которая при стандартных

условиях испытания имеет одинаковую самовоспламеняемость с исследуемым дизельным топливом.

Цетановое число определяется на моторной установке ИТ 9-3 (метод совпадения вспышек – ГОСТ 3122-67).

При использовании дизельного топлива с более низким цетановым числом, чем это требуется для данного двигателя, возрастают нагрузки на поршень, вызывающие повышенный износ деталей кривошипно-шатунного механизма, снижение экономичности двигателя. При использовании дизельного топлива с повышенным цетановым числом происходит неполное сгорание его, в результате снижается экономичность двигателя. Для безотказной работы современных дизельных двигателей применяется топливо с цетановым числом 45...50.

Топливо с повышенным цетановым числом применяется при эксплуатации дизельных двигателей в зимних условиях. Для лесных машин в зависимости от сезона и климатической зоны должны применяться топлива марок, указанных в таблице 9.5.

Таблица 9.5

Климатическая зона	Сезон	Среднемесячная температура, °С	Марка топлива
Холодная	Зима	-50...-15	А
	Лето	-30...-15	З
Умеренная	Зима	+2 и выше	Л
	Лето	-20 и выше	З
Теплая влажная	Зима	+8 и выше	Л
	Лето	+4...+6	Л
Жаркая	Зима	+22...+23	Л
	Лето	-15...+4	З
	Лето	+25...+32	Л

Все марки летнего дизельного топлива взаимозаменяемые, это относится и к зимним маркам. Зимние сорта топлива по сравнению с летними имеют облегченный фракционный состав – 96 % топлива выкипает при температуре не выше 340 °С (летние – не выше 360 °С) и меньшую вязкость (1,8...5 мм²/с), которая нормируется при 20 °С (летние 3...6 мм²/с). При отсутствии необходимых топлив при низких температурах воздуха дизельное топливо рекомендуется разбавлять техническим керосином (ГОСТ 18499-73). В таблице 9.6. – рекомендуемые пропорции при разбавлении дизельного топлива керосином.

Таблица 9.6

Температура воздуха, °С	Дизельное масло, % об.	Керосин, % об.
≤ -20	60Л	40
-20...-30	40Л	60
-20...-30	75З	25
-30...-40	40З	60

≤ -40	203	80
------------	-----	----

Смесь дизельного топлива с керосином должна готовиться в специальных емкостях с использованием хорошо отстоявшегося топлива. Приготовление смеси непосредственно в баках лесных машин во избежание отказов топливной аппаратуры категорически запрещается. Основные показатели качества дизельного топлива приведены в таблице 9.7.

Таблица 9.7

Показатель	Величина показателя		
	Л	З	А
Цетановое число, \geq	45	45	45
Фракционный состав:			
50 % перегоняется при температуре, °С, (\leq)	280	288	255
96 % перегоняется при температуре, °С (конец перегонки), (\leq)	360	340	330
Кинематическая вязкость при 20°С, мм ² /с (сСт)	3...6	1,8...5	1,5...4
Температура застывания, °С, (\leq), для климатической умеренной холодной зоны:	-10 -	-35 -45	- -55
Температура помутнения, °С, (\leq), для климатической умеренной холодной зоны:	-5 -	-25 -35	- -
Температура вспышки, °С, определяемая в закрытом тигле, (\geq):			
для тракторных и автомобильных ДВС	40	35	30
для тепловых и судовых ДВС	62	40	35
Массовая доля серы, %, (\leq) в топливе:			
вида I	0,2	0,2	0,2
вида II	0,5	0,5	0,4
Массовая доля меркаптановой серы, %, (\leq)	0,01	0,01	0,01
Содержание сероводорода	-	-	-
Содержание водорастворимых кислот и щелочей	-	-	-
Концентрация фактических смол, мг на 100 см ³ в топливе, (\leq)	40	30	30
Кислотность, мг КОН на 100 см ³ в топливе, (\leq)	5	5	5
Йодное число, г йода на 100 см ³ в топливе, (\leq)	6	6	6
Зольность, %, (\leq)	0,01	0,01	0,01
Коксуемость 10 % остатка, %, (\leq)	0,2	0,3	0,3

Коэффициент фильтруемости, (\leq)	3	3	3
Содержание механических примесей и воды	нет	нет	Нет
Плотность при 20°C, кг/м ³ , (\leq)	860	840	830
Предельная температура фильтруемости, °C, (\leq)			

ОАО «ВНИИ НП» разработал новый стандарт ГОСТ 305-01, так как действовавший ГОСТ 305-82 морально устарел. По своему изложению и технической сути новый ГОСТ соответствует европейскому стандарту EN 590-99 и предусматривает выпуск дизельного топлива, как без депрессорных присадок, так и с депрессорными присадками. Стандарт устанавливает три вида дизельного топлива по содержанию серы: 0,05; 0,10; 0,20 % по массовой доле. Установлена новая норма на цетановое число летнего дизельного топлива – не менее 49 ед. (таблица 9.8). Для производства зимнего дизельного топлива с депрессорными присадками в новом ГОСТе установлены отдельные требования к качеству (таблица 9.9).

Таблица 9.8

Показатель	ГОСТ 305-01 (Л)	EN 590-99 (Л)
Массовая доля серы, %, (\leq)	0,2	0,035
Цетановое число	49	51
Плотность при 15°C, кг/м ³ , (\leq)	860	820...845
Кинематическая вязкость, мм ² /с	3..6, при t = 20°C	2..4, при t = 40°C
Содержание полициклический ароматических углеводородов, %, (\leq)	20	2

Таблица 9.9

Показатели	Маркировка			
	Зп минус 15	Зп минус 25	Зп минус 35	Ап
Кинематическая вязкость при 20°C, мм ²	3...6	1,6...6	1,5...6	1,5...6
Температура застывания, °C, (\leq)	-30	-35	-45	-55
Предельная температура фильтруемости, °C (\leq)	-15	-25	-45	
Температура помутнения, °C, (\leq)	-5	-15	-25	-35

Примечания. Зп минус 15 – зимнее дизельное топливо с присадкой и температурой фильтруемости не выше минус 15 о С. Зп минус 25 – зимнее дизельное топливо с присадкой и температурой фильтруемости не выше минус 25 о С. Зп минус 35 – зимнее дизельное топливо с присадкой и температурой фильтруемости не выше минус 35 о С. Ап – арктическое

дизельное топливо с присадкой и температурой фильтруемости не выше минус 45 о С. В настоящее время все марки топлив: 3п минус 15, 3п минус 25, 3п минус 35, Ап – вырабатываются нефтеперерабатывающими заводами России.

9.1.3. Импортные жидкие топлива

Зарубежные жидкие топлива (автомобильные бензины и дизельное топливо) характеризуются следующими качественными показателями: октановым и цетановым числами, испаряемостью, вязкостью, температурой воспламенения, плотностью, индексом образования паровой пробки, пределом фильтрации топлива, содержанием серы и воды.

Автомобильные бензины за рубежом выпускаются в соответствии с национальными и международными стандартами. Европейский стандарт EN 228 2000 определяет требования к бессвинцовым топливам, которые применяются в европейских странах (Euro-Super). Стандарт DIN EN 228 содержит действующие в Германии соответствующие технические условия с дополнительным описанием обычных бессвинцовистых и высококачественных (Super-Plus) топлив.

В США технические условия на топливо бензиновых двигателей определены стандартом ASTM D 439. Эти бензины содержат присадки, улучшающие их эксплуатационные свойства.

Неэтилированные бензины (стандарт EN 228) – это бензины, не содержащие алкилсвинцовых антидетонаторов, используются для автомобилей и автобусов, оборудованных каталитическими нейтрализаторами отработавших газов.

Неэтилированный бензин представляет собой специальную смесь высококачественных, высокооктановых компонентов (особенно алкилатов и их изомеров). Его антидетонационные свойства улучшаются за счет неметаллических добавок, таких, как метилбутиловые эфиры (МТБЕ) в концентрации 3...15 % или спиртовые смеси (2...3 % метанола и этилового спирта). Максимальное содержание свинца в неэтилированном бензине должно быть не более 13 мг/л (**табл. 10**).

Этилированные бензины (стандарты DIN 51600, ASTM D 439) – это бензины, содержащие алкилсвинцовые антидетонаторы. Согласно европейским требованиям охраны окружающей среды, применение этилированных бензинов допускается только в тех автомобилях, у двигателей которых для смазки выпускных клапанов используются продукты сгорания алкилсвинцовых соединений.

В большинстве европейских стран содержание в этилированных бензинах алкилсвинцовых компонентов официально ограничено предельно допустимой величиной 150 мг/л.

В европейский стандарт EN 228-2000 включены нормативы: ЕВРО-2, ЕВРО-3, ЕВРО-4, которые определяют показатели качества

автомобильных бензинов (таблица 9.10).

Плотность (DIN 51757): европейский стандарт EN 228 ограничивает допустимую плотность автомобильных бензинов в пределах 725...780 кг/м³ (0,725...0,780 г/см³). В соответствии со стандартами выпускаются следующие марки бензинов: 4 star BS 4040-78 (Великобритания); Super SNV181161/8 (Швейцария), соответствуют отечественному АИ-98; Premium BS 7070-85 (Великобритания), Superbenzin SNV 181162, соответствуют отечественному АИ-95; Regular ASTM D 439-83 (США), Normal DIN 51607 (Германия), соответствуют отечественному АИ-92; Tare2 JIS K 202-80 (Япония), Tare2 Can-2-3,5-79 (Канада) соответствуют отечественному АИ-76. В таблице 9.11 приведены основные характеристики зарубежных бензинов.

Таблица 9.10

Параметры	Размерность	Показатель
Октановое число:		
обычные бензины	RON/MON	91/82,5
первосортные бензины	RON/MON	95/85
высококачественные бензины	RON/MON	98/88
Плотность	г/см ³	0,725...0,780
Сера, (≤)	% по массе	0,015 по ЕВРО-3 0,015 по ЕВРО-4
Бензол, (≤)	% по объему	5
Свинец, (≤)	мг/л	13
Испаряемость, min/max:		
давление насыщенных паров летом	кПа	35/70
давление насыщенных паров зимой	кПа	55/90
объем испарения при t = 70°C летом	% по объему	15/45
объем испарения при t = 100°C летом	% по объему	40/65
объем испарения при t = 180°C летом	% по объему	85/-
объем испарения при t = 70°C зимой	% по объему	15/47
объем испарения при t = 100°C зимой	% по объему	43/70
объем испарения при t = 180°C зимой	% по объему	85/-
Температура конца кипения	°C	215
*VLI летом	-	950
VLI зимой	-	1150

* Индекс образования паровой пробки.

Важнейшим показателем бензина является **октановое число**.

Международными стандартами предусмотрены два метода определения октанового числа: исследовательский (RON) и моторный

(MON) по стандартам: DIN 51756; ASTM D 2699 и ASTM D 2700.

Октановое число, получаемое исследовательским методом, характеризует детонационную стойкость бензина при использовании в двигателях, работающих в условиях неустановившихся режимов.

Таблица 9.11

Показатель	Таре 2 JIS K 202- 80; Таре 2 Can-2- 3,5-79 (A-76)	Regular ASTMD 439-83; Normal DIN 51607 (AI-92)	Premiu m BS7070- 85; Superbe nsin SNV181 162 (AI-95)	4 star BS4040- 78; Super SNV1811 61/8 (AI-98)
Октановое число, (\geq) моторный метод	76	85	-	89
исследовательский метод	-	92	95	98
Фракционный состав:				
температура начала перегонки бензина, °C, (\geq)	35	35	30	35
10 % перегонки бензина, °C, (\leq)	70	70	68	70
50 % перегонки бензина, °C, (\leq)	115	115	115	115
90 % перегонки бензина, °C, (\leq)	180	180	180	180
давление насыщенных паров бензина, кПа	66,7	66,7	53,4	66,7
индукционный период, мин, (\geq)	1200	1200	600	1300
Содержание механических примесей и воды	Отсутствие			

Октановое число, получаемое моторным методом, определяет детонационную стойкость топлива при высоких скоростях движения транспорта. Наиболее эффективными антидетонаторами являются органические соединения свинца: тетраэтилсвинец (TEL) и тетраметилсвинец (TML), которые могут повысить октановое число бензина на несколько пунктов. Зарубежные бензины характеризуются следующими *качественными показателями*: температурой вспышки, воспламенения, теплотой сгорания, фракционным составом, индексом образования паровой пробки (VLI). Индекс образования паровой пробки (VLI) – это новый показатель объединяет параметры давления насыщенных паров и относительного объема испаряемого топлива при температуре 70 °C. Показатель VLI дает полную информацию о влиянии топлива на запуск и работу прогретого двигателя. Остальные характеристики зарубежных

бензинов аналогичны отечественным.

Бензины с высокой степенью защиты окружающей среды отвечают современным требованиям общества и нормативным документам по охране атмосферного воздуха от загрязнения, особенно в городских условиях с высокой плотностью движения автомобильного транспорта. Нормативные документы для экологически безопасных бензинов содержат технические требования к снижению давления насыщенных паров при малом содержании ароматических соединений, бензола, серы и специальные требования к точке конца кипения.

В США также рекомендованы к применению присадки для экологически безопасных бензинов, предотвращающие образование отложений в системе подачи топлива.

Зарубежное дизельное топливо для различных условий применения выпускается трех видов, в соответствии с требованиями национальных стандартов и общеевропейского стандарта EN 590-2000:

летнее – 2D ASTM 975-81 (США), DIN 51603-81 (Германия), № 3 JIS K 2202-83 (Япония);

зимнее – 1D ASTM 975-81 (США), ТУР А CAN-2-3,6-М-83 (Канада), Special JIS K 2204-83 (Япония);

арктическое – ТУР А CAN-2-3,6-М-83 (Канада), 1D ASTM 975-81 (США).

В таблицах 9.12 и 9.13 даны характеристики зарубежных дизтоплив в соответствии с евростандартом EN 590 и национальными стандартами.

Таблица 9.12

Показатели	2D ASTM 975-81, DIN 51603-81, № 3 JIS K 2202-83 (J)	1D ASTM 975-81, ТУРАСАН-2-3,6-М-83 Special JIS K 2204-83 (З)	ТУРАСАН-3,6-М-83 ID ASTM 975-81 (А)
Цетановое число, (\geq)	45	50	50
Фракционный состав:			
50 % ДТ перегоняют при $t^{\circ}\text{C}$, (\leq)	280	280	255
90 % ДТ перегоняют при $t^{\circ}\text{C}$, (\leq)	360	340	330
Вязкость кинематическая при 20°C , ($\text{мм}^2/\text{с}$)	3...6	1,8...5	1,5...4
Температура, $^{\circ}\text{C}$, (\leq)			
помутнения	-5	-5	-
застывания	-10	-35	-55
Плотность при 20°C , (\leq)	860	840	830
Массовая доля меркаптановой серы, (\leq)	-	0,01...0,003	-
Кислотность, мг КОН на 100 см^3 топл., (\leq)	-	5	-
	-	0,01	-

Зольность, %, (\leq)			
--------------------------	--	--	--

Для безотказной работы современных дизельных двигателей применяется топливо с цетановым числом 45...50. Топливо с повышенным цетановым числом применяется при эксплуатации дизельных двигателей в зимних условиях, с пониженным цетановым числом – в летних условиях эксплуатации. Важнейшим эксплуатационным показателем качества дизельного топлива является *цетановое число* (CN), условный показатель самовоспламеняемости дизельного топлива. Цетановое число определяется по периоду задержки воспламенения на специальной моторной установке. Чем больше цетановое число, тем выше способность дизельного топлива к самовоспламенению.

Таблица 9.13

Параметры	Размерность	Величина
Температура воспламенения	°С	55
Содержание воды, максимум	мг/кг	200
Содержание серы, максимум	% по массе	0,05
Содержание примесей	мг/кг	0
<i>Для умеренного климата:</i>		
Плотность при $t = 15^{\circ}\text{C}$	кг/м ³	820...860
Вязкость при $t = 40^{\circ}\text{C}$	мм ² /с	2...4,5
Цетановое число, минимальное	-	49
Дизельный индекс, минимальный	-	49
при $t \leq 250^{\circ}\text{C}$	% по объему	65
при $t \leq 350^{\circ}\text{C}$	% по объему	85
при $t \leq 370^{\circ}\text{C}$	% по объему	95
*CFPP, максимальный	°С	+5...-20
<i>Для арктического климата:</i>		
Плотность при $t = 15^{\circ}\text{C}$	кг/м ³	800...845
Вязкость при $t = 40^{\circ}\text{C}$	мм ² /с	1,2...4
Цетановое число, минимальное	-	45...47
Дизельный индекс, минимальный	-	43...46
при $t \leq 180^{\circ}\text{C}$	% по объему	10
при $t \leq 340^{\circ}\text{C}$	% по объему	95
*CFPP, максимальный	°С	-20...-44

*CFPP – предел фильтрации дизельного топлива.

Топливо с цетановым числом большим 50 применимо для оптимальной эксплуатации современных дизельных двигателей (плавный

безударный режим, нормированный состав отработавших газов). Высококачественное дизельное топливо содержит большое количество парафинов и имеет высокое цетановое число. Наличие в дизельном топливе в расщепленном виде ароматических соединений ухудшает его способность к самовоспламенению. Пригодность дизельного топлива для использования при низких температурах оценивается пределом его фильтрации (CFPP).

Предел фильтрации – механическая характеристика, характеризующая остановку движения дизельного топлива через фильтры.

Европейский стандарт EN 590 регламентирует показатель CFPP для шести (A, B, C, D, E, F) классов дизельных топлив. В зависимости от климатической зоны и времени года выбирают приемлемый класс дизельного топлива.

Некоторые страны и регионы (Швеция, США и др.) для уменьшения вредных выбросов от сгорания дизельного топлива применяют штрафные санкции на владельцев автомобильного транспорта с целью побудить их создать условия для использования ими **экологически безопасных топлив**. Такие дизельные топлива обладают пониженным содержанием ароматических примесей, низкой температурой испарения, при полном отсутствии серы. Широкое их применение осложняется возникающим при этом повышенном износе основных узлов и повреждением синтетических элементов системы подачи топлива. Для предотвращения этих нежелательных процессов в дизельное топливо добавляют специальные присадки.

9.2. Альтернативные виды топлив

В качестве источника получения такого топлива в первую очередь рассматривают **уголь**, запасы которого в мире превосходят запасы нефти и газа. При переработке угля можно получить жидкие продукты, содержащие углеводороды и неуглеводородные примеси. Наиболее прогрессивны методы термической обработки угля в атмосфере водорода в присутствии катализаторов. Из образующейся смеси широкого фракционного состава могут быть получены бензин и дизельное топливо. Переработка угля путём газификации водяным паром даёт синтез-газ, из которого каталитической переработкой также получают жидкие топлива.

Для котельных установок, электростанций, промышленных печей и других топочных устройств применяют **газообразные углеводороды**. В то же время всё большее распространение получает использование газообразных углеводородов в качестве топлив для ДВС и в прежде всего для двигателей с принудительным зажиганием.

Природные газы из газовых месторождений почти целиком состоят из метана (от 82 до 98 %) с небольшой примесью этана (до 6 %), пропана (до 1,5 %) и бутана (до 1 %).

В попутных газах нефтяных месторождений так же основным компонентом является метан, но содержание его колеблется в более широких пределах (от 40 до 85 %), чем в природных газах.

Состав *заводских газов* наиболее разнообразен. В них содержатся как парафиновые, так и олефиновые углеводороды (с одной двойной связью). Количество тех или иных углеводородов и их строение всецело зависят от технологии получения горючего газа на заводе.

Состав газов, получаемых на нефтеперерабатывающих заводах, зависит от типа установки, с которой он отбирается. Газы установок каталитических процессов содержат обычно намного меньше олефиновых углеводородов, чем газы термических процессов. Особенно много олефиновых углеводородов содержится в газах пиролиза и коксования. Однако такие газы чаще используются не как топливо, а как сырьё для синтеза пластических масс и других веществ.

В качестве топлива для газобаллонных автомобилей, помимо указанных выше, можно использовать коксовый и городской газы, получаемые при коксовании углей, канализационные газы, являющиеся продуктом переработки сточных вод городских канализационных систем и т.д.

Во всех горючих газах, используемых в качестве топлив для газобаллонных автомобилей, кроме углеводородов, содержатся другие составляющие: водород, окись углерода, двуокись углерода, азот, кислород, водяные пары, сероводород и т.д. Неуглеводородные составляющие горючих газов (водород и окись углерода) имеют невысокую теплоту сгорания, поэтому их присутствие снижает калорийность топлива. Такие компоненты как, как двуокись углерода и азот, не участвуют в сгорании и тем самым также снижают калорийность горючих газов. В необходимых случаях горючие газы специально очищают от неуглеводородных составляющих.

Таким образом, эффективность и особенности применения горючих газов обуславливаются составом и свойствами их углеводородной части. В зависимости от физических свойств углеводородной части все *газообразные топлива условно делят на две группы – сжатые и сжиженные газы.*

Сжиженные газообразные топлива содержат в основном пропан C_3H_8 и бутан C_4H_{10} . Каждый из этих углеводородов в отдельности или в смеси хранят при обычных температурах в жидком виде в баллонах при давлении 1,6 МПа. Критическая температура для пропана + 97° С, для бутана + 125° С.

Основной газообразный углеводород, используемый в сжатом виде, – метан. При температуре выше –82° С (критическая температура) его нельзя превратить в жидкость при сжатии до любых высоких давлений. Его хранят в баллонах при давлении до 20 МПа. При охлаждении до –161°

С метан сжижается при атмосферном давлении.

Сжиженные газы в качестве автомобильных топлив имеют ряд преимуществ перед сжатыми газами. Одним из главных преимуществ является более простая и безопасная топливная аппаратура из-за: низкого давления; отсутствия необходимости в создании специального топливного бака в виде морозильной камеры и т.д.

Физические свойства нефтяных газов приведены в таблице 9.14.

Таблица 9.14

Показатели	Метан C_1H_4	Этан C_2H_6	Этилен C_2H_4	Пропан C_3H_8	Пропилен C_3H_6	Н-бутан C_4H_{10}	Изобутан C_4H_{10}	Изобутилен C_4H_8	Н-пентан C_5H_{12}
Молярная масса	16,04	30,07	28,05	44,09	42,08	58,12	58,12	56,10	72,12
Температура, $^{\circ}C$: критическая кипения при 0,1 МПа	-82 -162	+32 -89	+10 -104	+96 -42	+92 -47	+152 -1	+124 -10	+143 -6	+197 -36
Плотность жидкой фазы при $15^{\circ}C$ и 0,1 МПа, $кг/м^3$	-	460	458	582	514	579	557	-	610
Плотность газовой фазы при $0^{\circ}C$ и 0,1 МПа, $кг/м^3$	0,67	1,356	1,261	2,019	1,915	2,703	-	1,937	3,220
Теплота парообразования при температуре кипения, $кДж/кг$	450	436	440	427	440	386	368	-	357
Количество воздуха, теоретически необходимого для сгорания 1 кг топлива, $кг/кг$	14,2	14,6	14,4	15,7	14,8	15,6	15,6	-	14,9
Теплота сгорания, $МДж/кг$	50,0	48,0	47,0	46,0	46,0	45,5	45,6	-	43,5
Октановое число: по моторному по исследовательскому	104 -	99,5 116,3	91,0 -	96,3 111,9	84,9 102,6	90,1 95,8	98,0 102,1	88,0 101	105 -

Коэффициент объемного расширения при t, °С:									
	-	-	-	1,043	1,044	1,033	1,036	-	-
20	-	-	-	1,094	1,098	1,067	1,075	-	-
0	-	-	-	1,156	1,164	1,108	1,121	-	-
+20	-	-	-	1,236	-	1,155	1,175	-	-
+40	-	-	-						

Наиболее широкое применение в качестве топлива для газобаллонных автомобилей получили *сжиженные нефтяные газы* (СНГ). К ним относят горючие газы, основными углеводородами, в которых являются пропан или бутаны. В таких газах возможно присутствие и олефиновых углеводородов (пропилен и бутилены), однако количество их обычно невелико, так как олефиновые углеводороды предварительно выделяют из горючих газов и используют в качестве сырья для нефтехимии. Таким образом, свойства сжиженных газов определяются количеством и свойствами пропана и бутана. Эти газы в отличие от метана тяжелее воздуха и поэтому при утечках скапливаются на полу, в смотровых канавах. Эти газы называют нефтяными попутными газами, потому что их получают в основном при добыче и переработке нефти. Пропан и бутан имеют высокие октановые числа (таблица 9.14) очень маленькое цетановое число 4...5 пунктов. В жидкое состояние они переходят при обычной температуре под действием небольшого давления.

Так при +20°С для перевода пропана из газообразного состояния в жидкое необходимо давление 0,85 МПа, для бутана – 0,21 МПа, для изобутана – 0,32 МПа. В связи с этим для хранения и транспортировки сжиженных газов используют баллоны с рабочим давлением 1,6 МПа. Такое давление обеспечивает содержание в жидком состоянии даже чистого пропана до температуры около +50°С.

Для двигателей грузовых и легковых автомобилей, использующих в качестве моторного топлива сжиженный нефтяной газ, состав его регламентирован ГОСТ 27578-87 «Газы углеводородные сжиженные для автомобильного транспорта. Технические условия». Этот стандарт предусматривает две марки сжиженного нефтяного газа: зимний **ПА** (пропан автомобильный) и летний **ПБА** (пропан-бутан автомобильный).

Пропан автомобильный содержит 80...90 % пропана, остальное бутан, этан, метан и непредельные углеводороды. ПА применяется в диапазоне температур окружающей среды от –20 до –35°С. Пропан-бутан автомобильный содержит 40...60 % пропана, остальное бутан, этан, метан и непредельные углеводороды. ПБА применяется в диапазоне температур окружающей среды от +45 до –20°С.

При температурах окружающей среды ниже –35°С, в соответствии с

ТУ 33.1011184–89, применяют для автомобильного транспорта марку сжиженного нефтяного газа ЭПА (этан-пропан автомобильный). Наиболее жёсткие требования предъявляются к стабильности состава сжиженного нефтяного газа, так как основные физико-химические свойства их составляющих существенно различаются. Наряду с указанными компонентами в состав сжиженного нефтяного газа входят другие предельные и непредельные углеводороды. Суммарное их количество в применяемых СНГ не превышает 5...6 %. По своим физико-химическим и эксплуатационным показателям сжиженные нефтяные газы должны соответствовать значениям, указанным в таблице 9.15. Различные углеводороды, входящие в состав СНГ, имеют разные значения давления насыщенных паров. Основными компонентами являются углеводороды с числом углеродных атомов в молекуле от 1 до 4. Этот параметр СНГ имеет важное практическое значение.

Таблица 9.15

Показатели	Марка сжиженного нефтяного газа		
	ПБА	ПА	ЭПА
Массовые доли компонентов: Метан Пропан	Не нормируется		
	50 ±10	90 ±10	85 ±10
Сумма предельных углеводородов, % (≤)	Отсутствует	6	6
Объёмная доля жидкостного остатка при +40 ⁰ С	Отсутствует	то же	Следы
Базовая температура (°С) регламентации избыточного максимального давления насыщенных паров 1,6 МПА То же для минимального давления 0,07 МПА	+45 –20	+30 –35	+5 –40
Массовая доля серы и её соединений, %, не более	0,01	0,01	0,01
В том числе сероводорода, % не более	0,003	0,003	0,003
Содержание воды и щелочей	Отсутствуют		

Условия эксплуатации. Автомобильная газобаллонная установка рассчитана на подачу топлива к двигателю под давлением паров газа в

баллоне. В связи с этим величина давления насыщенных паров сжиженных нефтяных газов имеет важное эксплуатационное значение. При любой температуре окружающего воздуха в баллоне со сжиженным нефтяным газом должно быть избыточное давление не менее $0,35 \dots 0,5$ кг/см²., достаточное для надёжной подачи топлива к двигателю, а также для обеспечения пуска и прогрева холодного двигателя на газе из парового пространства баллона. Опыт эксплуатации показывает, что давление насыщенных паров сжиженных нефтяных газов для газобаллонных автомобилей должно быть не менее $2,7$ кг/см² при температуре -20° С. Так, углеводороды, входящие в сжиженные нефтяные газы различаются по давлению насыщенных паров, что позволяет производить газы, соответствующие времени года и климатическим условиям применения. Так сжиженный газ из пропана, хорошо отвечает требованиям зимней эксплуатации.

Существенной особенностью сжиженных нефтяных газов является большой коэффициент объёмного расширения жидкой фазы (см. табл. 1). Плотность жидкого пропана при 0° С равна $0,53$ кг/л., а при $+50^{\circ}$ С она снижается до $0,46$ кг/л., при этом удельный объём возрастает на $15,4$ % (объём 1 кг жидкого пропана увеличивается с $1,88$ до $2,17$ литров). Эта особенность сжиженных нефтяных газов учитывается при заполнении баллонов, а именно, необходимо наличие большого (до 10 %) свободного, не заполненного топливом объёма в топливных баллонах. В системах смесеобразования в двигатель газ подаётся в паровой фазе. Испарение топлива и подогрев паров, необходимый для компенсации охлаждения при расширении в редукторе, осуществляются в теплообменнике топливной системы. Теплота подводится от системы охлаждения или выпуска отработавших газов.

Для запуска холодного двигателя, когда теплоподвод к газу отсутствует, производят отбор газовой фракции из свободного объёма баллона. Длительная работа двигателя с отбором топлива из свободного объёма недопустима, так как приводит к переохлаждению топлива из-за затрат теплоты на испарение и неравномерному израсходованию компонентов, входящих в топливо. В первую очередь расходуется компоненты, обладающие наибольшим давлением насыщенных паров: пропан и пропилен. Это может привести к перебоям в подаче топлива.

Особенности применения газообразных топлив. Газообразные топлива имеют ряд преимуществ перед жидкими топливами.

а) газообразные топлива являются наиболее дешёвыми видами топлива, так как могут использоваться непосредственно после получения с газовых, нефтяных месторождений без дополнительной переработки, иногда лишь после неглубокой очистки.

Огромные ресурсы газообразных топлив, строительство мощных газопроводов, открытие новых газоносных площадей – всё это

свидетельствует о несомненной перспективности газообразных топлив;

б) сжиженные нефтяные газы имеют высокую детонационную стойкость, что позволяет использовать их в двигателях с большой степенью сжатия, и соответственно высокими технико-экономическими показателями;

в) при использовании газообразных топлив в результате лучшего смесеобразования и более совершенного протекания процесса сгорания образуется меньшее количество отложений в двигателе, а в отработавших газах уменьшается содержание токсичных компонентов: в 1,7...2,3 раза по окиси углерода и в 5...7 раз по соединениям серы;

г) применение газообразных топлив повышает долговечность двигателя в 1,25...2,0 раза. Отсутствие жидкой фазы топлива предотвращает смывание масляной плёнки со стенок цилиндра и колец и тем самым значительно снижает износ цилиндропоршневой группы;

д) срок смены масла увеличивается в 2...2,5 раза, угар масла уменьшается на 30...40 %. Межремонтный пробег автомобилей на сжиженном нефтяном газе возрастает в 1,4...2 раза. Улучшаются условия работы свечей зажигания и срок их службы увеличивается в 2...3 раза.

К недостаткам автомобилей, работающих на жидком топливе:

а) снижение пробега без дозаправки в 1,5...3,0 раза;

б) уменьшение полезной нагрузки на 5...20 %;

в) уменьшение мощности двигателя на 20 % и в связи с этим ухудшение тягово-динамических свойств автомобиля;

г) ухудшение запуска при низких температурах;

д) повышение пожаро- и взрывоопасности.

Спирты. Альтернативными топливами являются спирты и эфиры (кислородосодержащие вещества). Метил-трет-бутиловый эфир является эффективным компонентом автомобильных бензинов, улучшая их важнейшее эксплуатационное свойство - детонационную стойкость. Из спиртов наиболее интересен метанол и как самостоятельное топливо, и как компонент нефтяных топлив, в том числе и дизельных. Его можно производить из газа, древесины, биомассы, различного рода отходов. Однако метанол имеет ряд недостатков, над преодолением которых ведутся работы: высокая токсичность; меньшая теплота сгорания; высокая теплота испарения; коррозионная активность; гигроскопичность.

Спирты обладают высоким октановым числом и низким цетановым числом, благодаря чему их целесообразно использовать в двигателях с принудительным воспламенением. Октановое число по моторному методу у метанола равняется 90, у этанола – 88; по исследовательскому методу у метанола – 110, у этанола – 106. Стехиометрическое количество воздуха (кг воздуха/кг топлива) у метанола – 6,5; у этанола – 9,0. Высокая гигроскопичность спиртов (они неограниченно смешиваются с водой) оказывает отрицательное влияние на их эксплуатационные свойства. Увеличение концентрации воды повышает плотность, температуру

кипения и кристаллизации, теплоёмкость и теплопроводность при одновременном ухудшении его энергетических показателей и значительном увеличении коррозионной агрессивности. Метанол вступает в химическую реакцию с водой с выделением водорода.

Теплота сгорания спиртов приблизительно в 2 раза меньше, чем у нефтяных топлив (у метанола – 22000 кДж/кг, у этанола – 26000 кДж/кг), поэтому при практически равных энергетических затратах двигателя, работающие на спирте, имеют по сравнению с бензином большие массовые расходы топлива. Спирты по сравнению с нефтяным топливом характеризуются более устойчивым сгоранием. Благодаря этому расширяется диапазон устойчивого горения на бедных смесях до $\alpha = 1,5 \dots 1,6$.

Сгорание спиртов по сравнению с бензинами характеризуется меньшими задержками воспламенения и большими скоростями горения, более низкими температурами и большей полнотой сгорания. Всё это обеспечивает меньший теплоотвод из зоны реакции, пониженную теплонапряжённость деталей цилиндропоршневой группы, уменьшение нагарообразования, повышенный индикаторный КПД, меньшую токсичность отработавших газов по CO и C_nH_m и оксидам азота. Высокие значения теплоты испарения спиртов обуславливают снижение температуры заряда, а, следовательно, повышение коэффициента наполнения. Сочетание перечисленных факторов позволяет увеличить мощность двигателя при переходе на спирт на 10...15 % по сравнению с бензином. Использование высоких антидетонационных качеств спиртов позволяет дополнительно увеличить мощность двигателя путём увеличения степени сжатия.

Большая теплота испарения спирта затрудняет пуск двигателя и ухудшает условия внешнего смесеобразования. Для устранения этого недостатка применяют добавку растворимых в спиртах легкокипящих углеводородов – до 20 % бутана, изопентана, диметилового эфира, интенсивный подогрев впускного тракта и карбюратора, частичную рециркуляцию отработавших газов и ввод специальных пусковых систем. Особенностью спирта является малое сажеобразование, а метанол практически не даёт сажи. Спирты коррозионно активны по отношению к стали, алюминию, магнию, цинку и сплавам на их основе. Они реагируют со свинцом, образуя аморфные соединения, забивающие топливные фильтры и жиклёры. Большинство уплотнительных материалов набухают при контакте со спиртами.

При работе на спиртах возможен повышенный износ двигателя, так как спирты разрушают масляную плёнку на стенках цилиндров. В присутствии воды это действие усиливается. Кроме того, при неполном сгорании этанола образуются органические кислоты, увеличивающие коррозионный износ пар трения. При работе непрогретого двигателя износ увеличивается. При работе

на спиртах токсичность отработавших газов при $\alpha = 0,98...1,0$ по концентрации CO соответствует бензиновым двигателям; с увеличением коэффициента избытка воздуха свыше 1,0 концентрация CO резко снижается; по мере дальнейшего обеднения смеси оксид углерода в отработавших газах практически отсутствует. Концентрация углеводородов в 10...20 раз меньше, чем в бензиновых двигателях, а оксида азота в 1,5...2,0 раза.

Для работы на спиртах и спиртобензиновых смесях необходимо увеличить объём топливных баков; ввести системы пуска двигателя; изменить тарировку топливоподающих устройств (жиклёров); заменить уплотнительные материалы; установить свечи с большим калильным числом. Препятствием для использования метанола является его высокая токсичность, так как он яд, действующий на нервно-сосудистую систему. Отравление возможно при попадании его в пищеварительный тракт, при вдыхании или попадании жидкости на кожу. Предельно допустимая концентрация паров метанола в воздухе 5 мг/м^3 (для сравнения у бензина 100 мг/м^3). Попадание в организм свыше 10 мл метанола может окончиться тяжёлым отравлением. Смертельная доза 30 мл. При длительном контакте с метанолом возможно хроническое отравление, сопровождающееся нервным расстройством. Поэтому необходима надёжная герметизация топливных баков и топливоподающей системы. Этанол менее токсичен, его предельно допустимая концентрация в воздухе 1 г/м^3 . Препятствием для его массового использования является наркотическое воздействие на организм.

Водород H_2 . Ведутся исследовательские работы по использованию водорода в качестве альтернативного топлива, так как газообразный водород имеет высокую теплоту сгорания и «чистые» продукты сгорания. Но препятствуют этому высокая стоимость водорода и трудности, связанные с заправкой и хранением.

Жидкий водород представляет собой бесцветную жидкость без запаха. Газообразный водород – бесцветный газ без запаха. Твёрдый водород обладает кристаллической структурой. При охлаждении жидкого водорода ниже температуры кипения в нём появляются конгломераты кристаллов твёрдого водорода, количество которых увеличивается до полного исчезновения жидкого. Смесь жидкого и твёрдого водорода называется шугообразным водородом.

Массовая теплота сгорания водорода превышает массовую теплоту всех топлив для двигателей. Однако вследствие малой плотности водорода его объёмные энергетические характеристики хуже, чем у нефтяных топлив. Объёмная теплопроизводительность водородно-воздушной смеси меньше теплопроизводительности на основе бензина (на 15 %) и спирта (на 10 %). Температура самовоспламеняемости водородно-воздушной смеси выше, чем на базе углеводородных топлив, однако для её воспламенения требуется меньше количества энергии. Устойчивое воспламенение водорода можно обеспечить с помощью принудительного

зажигания от электрической искры или дозы запального топлива. Возможно также с помощью катализатора. Водород может подаваться в цилиндр как вместе с воздухом, так и путём непосредственного впрыска.

Водородно-воздушные смеси сгорают со скоростями, превышающими скорости сгорания смесей на основе углеводородных топлив. Эти скорости значительно зависят от температуры. В условиях камеры сгорания скорость распространения пламени возрастает вследствие влияния турбулизации и повышенных давлений. Большие скорости сгорания обуславливают высокую жёсткость процесса сгорания. Например, при $\alpha = 1$ скорость нарастания давления в цилиндре при прочих равных условиях примерно в 3 раза больше, чем при работе на бензиновоздушной смеси. При увеличении α скорость нарастания давления уменьшается.

Вследствие высоких скоростей и температур сгорания водородно-воздушной смеси в отработавших газах может содержаться значительное количество оксидов азота NO_x . С обеднением смеси концентрация NO_x уменьшается. Для снижения количества NO_x можно применять рециркуляцию отработавших газов или добавку воды к водородному топливу. Очевидно, что при работе на водороде в отработавших газах не должно содержаться CO и C_nH_m , однако эксперименты обнаруживают их незначительное количество. Это объясняется выгоранием углеводородных смазочных материалов, попадающих в камеру сгорания. Предел обеднения водородно-воздушной смеси определяется ухудшением динамики тепловыделения и, как следствие этого, неустойчивой работой двигателя. Высокая диффузионная способность газообразного водорода обеспечивает хорошие условия смесеобразования, большие скорости сгорания водородно-воздушных смесей – благоприятную динамику тепловыделения.

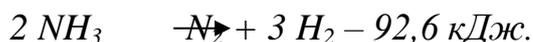
Следует учитывать специфические свойства водорода. При нормальной и низкой температурах водород химически мало активен. Его реакционная способность возрастает под действием локальных источников теплоты, например, электрической искры, или в присутствии некоторых материалов, оказывающих каталитическое действие. Повышение активности водорода вызывается образованием радикалов водорода, обладающих высокой реакционной способностью. Высокая диффузионная способность водорода является причиной его проникновения через неплотности, микротрещины и т.п. в замкнутые объёмы конструкции двигателя или системы топливоподачи, что в сочетании с широким концентрационным пределом воспламеняемости и низким значением энергии воспламенения может явиться причиной взрыва. При работе на водороде наблюдается повышенный износ поверхностей, контактирующих с водородом при высокой температуре. Это происходит из-за того, что при высокой температуре радикалы водорода, обладая высокой растворимостью и

большой скоростью диффузии в стали, частично поглощаются поверхностными слоями металла и вступают в химические соединения с её составляющими. При этом образуется метан и малоуглеродистая сталь. Оставшиеся радикалы водорода восстанавливаются до молекул в поверхностных слоях металла с увеличением объёма.

Образовавшиеся газы – метан и водород – создают внутрисполостное давление, вызывающее образование сливающихся друг с другом микротрещин по границам зёрен металла. Обезуглероженная сталь теряет механические свойства. Самой сложной задачей при использовании водорода является хранение его запаса на борту автомобиля. Возможны три способа его хранения: в сжатом виде в баллонах высокого давления; в сжиженном виде; в механически связанном виде в составе соединений, разрушающихся при выделении водорода.

Из-за низкой плотности газообразного водорода первый способ не имеет промышленного значения. Главной задачей при получении, транспортировке и хранении жидкого водорода является обеспечение минимальных потерь в топливных баках. Баки снабжают системой сброса давления спарившегося водорода с дальнейшим дожиганием или адсорбцией его паров. Для снижения испаряемости и повышения плотности водорода при хранении возможно применение шугообразного водорода, содержащего 30...50 % твёрдого водорода.

Аммиак NH₃. Его можно рассматривать как энергоноситель, обеспечивающий при его термическом разложении в камере сгорания получение водорода по реакции



Неограниченные сырьевые ресурсы (аммиак производится из водорода и азота воздуха) и хорошо развитая промышленная база позволяют рассматривать аммиак как одно из перспективных топлив.

Благодаря высокой температуре самовоспламенения пожарная опасность аммиака относительно невелика. По содержанию энергии в единице массы аммиак уступает водороду в 7 раз и бензину в 2,5 раза. Однако по объёмной энергоёмкости аммиак превосходит водород. Аммиак обладает высокой детонационной стойкостью: октановое число по моторному методу равняется 111, по исследовательскому методу – 132. К недостаткам аммиака можно отнести высокую температуру самовоспламенения по сравнению с нефтяными топливами. Вследствие чего малая скорость горения и практически невозможность применения в современных двигателях внутреннего сгорания без проведения специальных мероприятий по интенсификации его воспламенения и сгорания путём увеличения теплопровода в реакционную зону камеры сгорания. К таким мероприятиям можно отнести повышение степени

сжатия при сокращении поверхности камеры сгорания, увеличение температуры в пристеночных зонах камеры сгорания, увеличение мощности разряда в свечах зажигания. Использование аммиака снижает мощность и экономичность двигателя. Аммиак вызывает интенсивную коррозию большинства конструкционных материалов, используемых в двигателестроении. Товарные моторные и большинство синтетических масел практически не меняют свойства при контакте с аммиаком.

10. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Почти 100 лет назад в специальной литературе писали так. Еще недавно среди разнообразных сортов смазочных масел можно было встретить только растительные и животные жиры.

В настоящее же время, когда научились очищать минеральные масла от вредных примесей, очищенные минеральные масла стали вытеснять все другие. Причины этого явления лежат не только в дешевизне минеральных масел, но и в целом ряде других их преимуществ.

Минеральные масла стойки при хранении, могут быть приготовлены любого удельного веса и вязкости. Минеральные масла поступают в продажу под разными названиями, как веретенное масло, машинное, цилиндрическое, газовое и соляровое.

10.1. Производство смазочных материалов в 20-м веке

Для повышения смазочной способности к минеральным маслам иногда примешивают, хотя и в сравнительно незначительных пропорциях (5...25 %), разные растительные и животные масла. Такие масла известны под названием масел компонд. Не указывая особенностей минеральных смазочных масел, вырабатываемых заводским массовым путем, ниже приводится ряд рецептов разнообразных смазочных смесей, применяемых в указанных случаях в начале 20-го века.

Смазочные мази, приготовляемые "путем омыления" для гребенчатых и зубчатых колес. Для их изготовления применяют различные материалы, как видно из нижеприведенных рецептов. Очень часто прибавляют графит или тальк. Твердые составные части растапливают, затем прибавляют жидкие составные части и, как только температура достигнет 90 °С, вливают тонкой струей, при постоянном помешивании, щелок. Тальк и графит прибавляют тоже при помешивании непосредственно до или после вливания щелока. Затем поддерживают температуру в 110...120 °С, пока не наступит омыления, т. е. пока вынутая и охлажденная капля, при нажатии на нее пальцем, не выпустит из себя больше жидкости. После этого продолжают размешивание до начинающегося охлаждения. Работу лучше производить в котлах с

двойными стенками, нагреваемыми паром. Вот три испытанных на практике рецепта:

- 15 (частей) сырого горного воска, 80 минерального масла, 5 натронного щелока 40 %.
- 25 сырого шерстяного жира, 10 отбросов жира, 55 минерального масла, 10 натронного щелока 30 %.
- 15 сырого горного воска, 70 минерального масла, 10 талька, 5 натронного щелока 40 %.

Мази, приготовленные "без омыления":

- 20 церезина, 70 нефтяных остатков, 10 графита.
- 20 церезина, 5 канифоли, 65 нефтяных осадков, 10 графита.
- 40 шерстяного жира, 30 сала, 10 репного масла, 20 талька.
- 40 шерстяного жира, 30 консистентной мази, 30 графита.

Смазочная мазь для зубчатых колес: 15 консистентной мази, 30 шерстяного жира, 10 нефтяных остатков и 45 графита. Растворяют 17 озокерита, 17 сала и 16 шерстяного жира, прибавляют 50 графита, продолжая размешивать до охлаждения.

"Мазь для болторезных станков" служила для смазывания самих станков и обрабатываемых предметов. Употребляется в виде 5...10 % водного раствора. Изготовление: 8 шерстяного жира, 8 канифоли, 8 олеина, 16 машинного или веретенного масла. Смесь омыляли семью частями 48 % калийного щелока, после чего прибавляли, при постоянном размешивании, 53 воды.

"Смазочные мази для канатов". Смазочные мази употребляются для предохранения канатов, а также блоков, по которым скользят канаты, от слишком быстрого изнашивания. При употреблении они не должны крошиться и должны противостоять морозу. Зимой они готовятся более мягкой консистенции, чем летом.

Они готовятся или горячим способом путем омыления или путем растапливания составных частей: Последний способ очень прост и не требует пояснений. При омылении растопленные при умеренной температуре жиры и масла смешиваются со щелоком при 80 °С и при постоянном помешивании нагреваются до 100...120 °С, пока не наступит омыления. Узнается это по тому, что вынутая и охлажденная на стеклянной пластинке капля, при слабом нажатии на нее пальцем, не выпускает из себя жидкости. Если при омылении масса стала слишком твердой, то можно осторожным добавлением минерального масла довести ее до нужной густоты. При изготовлении маленьких количеств размешивание производится ручным способом, при больших же количествах исключительно механическими мешалками. Во избежание перекипания и могущего произойти воспламенения, рекомендуется употреблять котлы с двойными стенками, нагреваемые паром.

"Мази для пеньковых канатов, омыленные горячим способом":

- 5 церезина, 10 канифоли, 10 сала, 20 шерстяного жира, 10 сырого

смоляного масла, 5 древесного дегтя, 30 минерального масла, 10 едкого натра (раствор в 20 %).

- 30 шерстяного жира, 60 солярного масла (синеватого), 10 едкого натра (раствор в 38 %).

"Мазь для пеньковых канатов, омыленных холодным способом": Смешивают 20 серого смоляного масла и 50 парафинового масла и, при помешивании, прибавляют сквозь сито массу, растертую из 21 парафинового масла, 8 гашеной извести и 1 едкого натра (раствор в 20°). Размешивают доначинающегося сгущения, после чего оставляют настоять 12 часов для окончания процесса омыления.

"Мазь для пенковых канатов, без омыления":

- 85 шерстяного жира, 5 льняного масла, 10 графита (порошок).
- 75 сала, 25 ворвани.

Прибавлять в мазь наполнители, как мел, тальк, тяжелый шпат не рекомендовали.

Теория Петрова (с развитием индустрии) позволила отказаться от смазочных материалов растительного происхождения и перейти к применению смазочных материалов на минеральных основах. Синтетические смазочные материалы изобрели после 2-й мировой войны. В настоящее время они представлены почти всеми видами химических соединений. Улучшение показателей базовых смазочных материалов осуществляют с помощью специальных присадок. Наибольшее применение при эксплуатации строительных машин имеют моторные, трансмиссионные и гидравлические масла.

10.2. Классификация смазочных материалов²

В России выпускается более 100 видов смазок.

В бывшем СССР до 1979 года наименования смазок устанавливали произвольно. В результате одни смазки получили словесное название, другие номер, третьи – обозначение создавшего их учреждения. В 1979 году был введен ГОСТ 23258-78 (действующий в настоящее время в России), согласно которому наименование смазки должно состоять из одного слова и цифры.

Смазки классифицируют:

- по консистенции;
- составу;
- областям применения.

По консистенции смазки делят на полужидкие, пластичные и твердые. Пластичные и полужидкие смазки представляют собой коллоидные системы, состоящие из дисперсионной среды, дисперсной

²Примечание: название "смазочные материалы" – в пособии для сокращения в дальнейшем заменено термином "смазки".

фазы, а также присадок и добавок. Наибольшее применение пластичные смазки получили в подшипниках качения и скольжения, шарнирах, зубчатых, винтовых и цепных передачах, многожильных тросах. Наиболее существенными, влияющими на эффективность применения пластичных смазок, являются следующие факторы:

- особенности узлов трения и условия эксплуатации смазок – температура, нагрузка, скорость перемещения трущихся пар;
- совместимость смазок с конструктивными материалами;
- совместимость смазок друг с другом при их возможном смешивании.

Твердые смазки до отверждения являются суспензиями, дисперсионной средой которых служит смола или другое связующее вещество и растворитель, а загустителем – дисульфид молибдена, графит, технический углерод и т.п. После отверждения (испарения растворителя) твердые смазки представляют собой золи, обладающие всеми свойствами твердых тел и характеризующиеся низким коэффициентом сухого трения.

По составу смазки делят на четыре группы.

1. Мыльные смазки, для получения которых в качестве загустителя применяют соли высших карбоновых кислот (мыла). В зависимости от аниона мыла смазки одного и того же катиона разделяют на обычные и комплексные (кальциевые, литиевые, бариевые, алюминиевые и натриевые).

В отдельную группу выделяют смазки на смешанных мылах, в которых в качестве загустителя используют смесь мыл (литиево-кальциевые, натриево-кальциевые и др.: первым указан катион мыла, доля которого в загустителе большая). Мыльные смазки в зависимости от применяемого для их получения жирового сырья называют условно синтетическими (анион мыла – радикал синтетических жирных кислот) или жировыми (анион мыла – радикал природных жирных кислот), например, синтетические или жировые солидолы.

2. Неорганические смазки, для получения которых в качестве загустителя используют термостабильные с хорошо развитой удельной поверхностью высокодисперсные неорганические вещества. К ним относят силикагелевые, бентонитовые, графитные, асбестовые и другие смазки.

3. Органические смазки, для получения которых используют термостабильные, высокодисперсные органические вещества. К ним относят полимерные, пигментные, полимочевинные, сажевые и другие смазки.

4. Углеводородные смазки, для получения которых в качестве загустителей используют высокоплавкие углеводороды (петролатум, церезин, парафин, озокерит, различные природные и синтетические воски).

В зависимости от типа их дисперсионной среды различают смазки на нефтяных и синтетических маслах. *По области применения* смазки делят на антифрикционные (снижение износа сопряженных деталей);

консервационные (предотвращение коррозии металлических изделий и механизмов при хранении и транспортировании); уплотнительные (герметизация зазоров, облегчение сборки и разборки арматуры, сальниковых устройств, резьбовых, разъемных и подвижных соединений, в том числе вакуумных систем); канатные (снижение износа и коррозии стальных канатов).

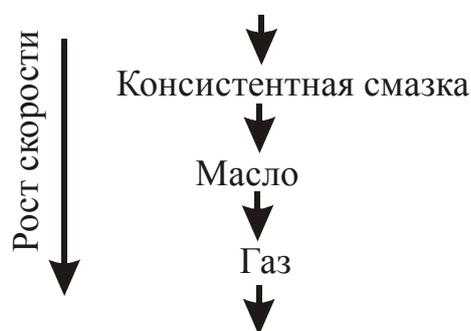


Рис. 57

Элементарная классификация современных смазочных материалов следующая: масла; пластичные смазочные материалы; твердые смазочные материалы; газообразные смазочные материалы. Элементарное правило для выбора типа смазочного материала в зависимости от скорости и давления в трибосистеме предложил Лансдаун (рис. 57).

Смазочные материалы классифицируют по их происхождению – *растительные* и *животные жиры*; *минеральные масла*, получаемые из нефти, наиболее распространены в промышленности благодаря оптимальному сочетанию свойств и стоимости; *синтетические масла* менее распространены вследствие высокой стоимости, но обеспечивают целый ряд свойств, необходимых в новых областях быстро развивающейся современной техники.

10.3. Жидкие смазочные материалы

Смазочные материалы (СМ) вводятся на поверхности трения сопряженных деталей для уменьшения силы трения и интенсивности изнашивания. В зависимости от условий применения СМ выполняют и другие функции: отводят теплоту от нагреваемых поверхностей, предохраняют их от коррозии, очищают от накапливающихся продуктов износа и т.п. СМ подразделяют на жидкие (масла) – они сохраняют текучесть при положительных температурах; мазеобразные продукты (пластичные смазки) и твердые смазочные материалы (графит, дисульфид молибдена). СМ могут быть минерального, органического и синтетического происхождения. Основная часть ассортимента (свыше 90%) – это минеральные масла, которые получают при перегонке мазута при температурах от 300 до 500 °С. Мазут – это остаток после выкипания горючих фракций нефти. В маслах кроме углеводородов присутствуют нафтеновые кислоты, сернистые соединения и смолисто-асфальтовые вещества. После перегонки мазута остаётся гудрон, который используют для получения битумов.

Минеральные масла работоспособны в узком температурном диапазоне. При температуре ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ большинство масел застывает, а при нагревании выше $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ они окисляются. Этим недостаткам лишены синтетические и полусинтетические (смеси минеральных и синтетических) масла. В химическом производстве их получают синтезом из органических и неорганических веществ с заданными оптимальными эксплуатационными свойствами.

Производятся синтетические масла на основе диэфиров, полиальфаолефинов, силоксанов, фтор- и хлороорганических жидкостей и др. Полиальфаолефины – это продукты полимеризации ненасыщенных углеводородов этиленового ряда, не содержащие серы, фосфора или металлов. Диэфиры созданы на основе сложных эфиров различных кислот и спиртов; не содержат серы, фосфора, металлов и парафинов. Силоксаны – на основе кремнийорганических полимеров. Синтетические масла в отличие от минеральных имеют высокую химическую и термическую стабильность, т.е. при работе и длительном хранении они не окисляются и сохраняют оптимальную вязкость в широком диапазоне температур. Недостаток синтетических масел в том, что они дороже минеральных в 2...3 раза.

Органические (растительные и животные) масла обладают высокой смазывающей способностью, но имеют плохую стойкость к действию повышенной температуры. По этой причине в чистом виде их практически не используют, иногда добавляют к минеральным для улучшения смазывающих свойств.

10.3.1. Характеристика жидких смазочных материалов

10.3.1.1. Моторные масла

Масла, применяемые для смазки поршневых двигателей внутреннего сгорания, называют *моторными маслами* (ММ). Это смазочные материалы, содержащие *базовое масло* и синтетические *присадки*, улучшающие свойства базового масла или придающие ему требуемые новые свойства. Базовые компоненты моторных масел имеют кинематическую вязкость 3,5...22 сСт при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. Содержание присадок изменяется от нескольких процентов в маслах для легконагруженных узлов до 25...30 % в маслах для дизелей, работающих на тяжелых, высокосернистых топливах.

Современные ММ должны отвечать следующим основным эксплуатационным требованиям:

- иметь высокие моющие и диспергирующие свойства к нерастворимым загрязнениям, чтобы обеспечить чистоту поршней, картера, фильтров и маслопроводов;
- иметь высокую термическую и термоокислительную стабильность,

чтобы использовать масла при высокой рабочей температуре;

- обеспечить минимальный износ трущихся деталей за счет высокой прочности масляной пленки и ее достаточной вязкости при высоких температурах;
- обеспечить нейтрализацию образующихся при работе двигателя продуктов кислотного характера и исключить коррозионное воздействие на детали двигателя;
- иметь вязкостно-температурные характеристики, обеспечивающие легкий пуск двигателя при низкой температуре и надежную его работу в тяжелых режимах нагружения;
- иметь оптимальный фракционный состав, что обеспечит минимальный расход масла на угар и экономичную работу дизеля.

Моторное масло должно надежно и длительно выполнять свои функции, обеспечивая заданный ресурс двигателя. Основные функции моторного масла в двигателях – уменьшение трения между трущимися поверхностями деталей; снижение износа трущихся поверхностей и предотвращение их заедания; охлаждение деталей; дополнительное уплотнение поршневых колец, снижающее прорыв газов из камеры сгорания в картер двигателя; защита деталей от коррозии и загрязнения углеродистыми отложениями.

При длительной работе ММ в двигателе на режиме максимальной мощности можно выделить три температурные зоны.

В *высокотемпературной зоне* (головка цилиндра и боковая поверхность верхней части поршня) температура смазываемых деталей находится в диапазоне 250...400 °С. Масло обугливается с образованием нагаров на деталях.

В *среднетемпературной зоне* (юбка поршня, поршневые кольца и палец, стенки цилиндра) масло подвергается действию температуры, достигающей до 250...300 °С. Оно здесь окисляется, и в результате на деталях образуются лаковые отложения. Наблюдаются пригорание и заклинивание поршневых колец в результате заполнения канавок поршня лаковыми отложениями и углеродистыми частицами, попадающими из высокотемпературной зоны.

В *низкотемпературной зоне* (коленчатый вал с подшипниками, картер двигателя и другие элементы масляной системы, включая радиатор) температура масла в картере достигает 100...150°С, а в подшипниковых узлах – 200 °С. Здесь под действием температуры и кислорода воздуха происходит окисление масла. В картере двигателя наблюдаются процессы осадкообразования, а также коррозии, обусловленной накоплением кислых продуктов.

При работе двигателя в зимнее время к ММ предъявляются дополнительные требования, связанные с обеспечением пуска двигателя, охлажденного до температуры воздуха. Возникают проблемы с

прокачкой масла по смазочной системе и обеспечением гидродинамического режима смазки пар трения, чтобы исключить повышенный износ, возникающий при "сухом" трении.

Для улучшения качества масел добавляют присадки. Наиболее важные из них – вязкостные, моющее-диспергирующие, антиокислительные и депрессорные.

Вязкостно-температурные свойства ММ проявляются в том, что с ростом температуры вязкость масла снижается. Существуют два характерных режима работы двигателя, при которых вязкость масла достигает максимума и минимума, а именно, пуск двигателя при температуре окружающей среды и длительная работа с максимальной выходной мощностью. Следовательно, важно знать характер зависимости вязкости от температуры в диапазоне температур, в котором масла подчиняются закону Ньютона. Связь между кинематической вязкостью и температурой масла определяется законом Вальтера

$$\lg \lg(v + 0,8) = A - B \lg T ,$$

где v – кинематическая вязкость, сСт; A и B – константы, зависящие от содержания углеводородов в масле.

Для оценки этой взаимосвязи используется *индекс вязкости*, который рассчитывается по значениям вязкости масла при 50 и 100 °С:

$$VI = 100 (L - U) / (L - H),$$

где U – вязкость пробы масла (сСт) при 50 °С, L – вязкость при 50 °С масла с индексом вязкости 0, имеющего одинаковую с пробой вязкость при 100 °С, H – вязкость при 50 °С масла с индексом вязкости 100, имеющего одинаковую с пробой вязкость при 100 °С.

Чем выше индекс вязкости, тем меньше вязкость изменяется с температурой. Индекс вязкости сезонных масел определяет чистоту базового масла, применяемого для их изготовления.

Высокий индекс вязкости всесезонных масел достигается добавлением специальных присадок (например, высокомолекулярных полимеров), увеличивающих вязкость только при высоких температурах. Концентрация присадок в ММ варьируется в широком диапазоне в зависимости от условий работы и наличия серы в топливе.

Моюще-диспергирующие свойства ММ обеспечиваются введением в базовые масла металлосодержащих зольных моющих присадок, которые необходимы для условий работы в высокотемпературной зоне. Для снижения склонности масла образовывать низкотемпературные отложения и загрязнять фильтры используют беззольные дисперсанты. Эти присадки составляют 50...70% от общего количества присадок в пакете. Кроме того, моющие присадки являются носителями и других эксплуатационных свойств ММ:

антиокислительных, противокоррозионных и др.

Металлосодержащие моющие присадки повышают зольность масла, что может привести к таким явлениям, как образование зольных отложений в камере сгорания и на выпускных клапанах и увеличение абразивного износа и проч. Поэтому сульфатную зольность масел ограничивают верхним пределом. Ее значения в зависимости от марок масел и содержания серы в топливе находятся в пределах 1,15...1,65%.

Моющие свойства масел определяют по результатам моторных испытаний на одноцилиндровой установке УИМ-6-НАТИ по загрязненности поршня высокотемпературными отложениями. При этом учитывают подвижность колец, толщину и характер отложений в канавках, на юбке и внутри поршня после испытаний продолжительностью 120 ч. Чистый поршень оценивается в 0 баллов, а максимально допустимая загрязненность – 15 баллов.

Склонность масел к образованию низкотемпературных отложений оценивают по количеству осадков в граммах, накапливающихся в роторе центрифуги на установке НАМИ-1М после 120 часов работы.

Условия работы масел в двигателе настолько жестки, что предотвратить их окисление полностью не удастся. Введением антиокислительных присадок можно значительно затормозить процессы окисления, которые приводят к росту вязкости масла и его коррозионной активности, а также склонности к образованию отложений. В нормативной документации на ММ стойкость их к окислению определяется индукционным периодом осадкообразования (ИПО). ИПО – это время окисления масла в часах, при котором массовая доля осадка начинает превышать 0,5 %.

Противоизносные свойства ММ зависят от углеводородного состава базового масла и композиции высокотемпературных антифрикционных присадок. При работе дизелей на топливах с повышенным содержанием серы, а также в условиях, способствующих образованию азотной кислоты из продуктов сгорания (дизели с турбонадувом), появляется коррозионное изнашивание. Основным путем снижения этого вида износа – введение в ММ щелочных присадок (моюще-диспергирующих), которые нейтрализуют коррозионные продукты.

Свойства масла переводить в нейтральные соединения образующиеся кислоты оцениваются щелочным числом (ЩЧ). ЩЧ – это количество в мг едкого калия (КОН), которое пошло на нейтрализацию кислот в 1 грамме испытуемого масла, образующихся в картере двигателя в результате сгорания топлива и окисления масла под действием повышенных температур. Чем выше ЩЧ, тем выше нейтрализующие свойства масел и его качество, тем самым большее количество содержится в масле зольных присадок. Нижний предел назначают из условия, чтобы значение ЩЧ не было меньше 10-кратного содержания серы в топливе в %. Ограничение по верхнему пределу обусловлено допустимыми значениями сульфатной

зольности.

Отечественные ММ для автотракторных дизелей имеют ЩЧ от 6 до 8,5 мг КОН/1 г масла. Зарубежные – от 9 до 16. Здесь приведены предельно допустимые нижние значения ЩЧ для различных марок ММ, которые гарантируют нейтрализующие свойства масел на весь срок работы до их смены (250 или 500 ч.). Сроки замены отработавших свой ресурс ММ зависят от степени форсирования двигателей и содержания серы в топливе. Температура вспышки (ТВ) характеризует фракционный состав (летучесть) масла. С повышением вязкости масел ТВ повышается. Масла, содержащие большое количество присадок, могут иметь пониженную ТВ, так как присадки перед смешиванием их с базовыми маслами разбавляют растворителями. Масло, имеющее высокую ТВ, не содержит или мало содержит летучих фракций, оно меньше расходуется на угар и менее опасно в пожарном отношении.

Температура застывания (ТЗ) характеризует температуру, при которой ММ теряют свою подвижность. ТЗ зависит от содержания в масле парафиновых углеводородов и их структуры. Масла с ТЗ до $-10...-15$ °С получают удалением парафинов в процессе депарафинизации.

Для получения зимних сортов масел с температурой $-20...-30$ °С применяют, кроме депарафинизации, присадки-депрессоры в концентрации до 1,5 %. Хотя ТЗ является важным показателем низкотемпературных свойств масел, она не связана однозначно с предельной температурой холодного пуска двигателя. Она обусловлена вязкостью масла при температуре пуска двигателя и его прокачиваемостью насосом по маслопроводной системе.

В отечественной нормативной документации на выпускаемые ММ для автотракторных двигателей приводятся сведения об их вязкостных свойствах в зависимости от температуры (таблица 10.1).

Известны различные классификации ММ по вязкости.

Минеральные ММ отечественного производства классифицируются, согласно ГОСТ 17479.1–85, по ряду признаков: по классам вязкости, по области пользования и уровням эксплуатационных свойств. Стандартная маркировка ММ содержит отличительные признаки в виде условных обозначений.

Таблица 10.1

Вид моторного масла	Кинематическая вязкость масла, мм ² /с		ТЗ, °С, не выше	Минимальный ИВ
	температура, °С			
	100	18		
Летнее	9,5...13	–	–15	90
Зимнее	7...8,5	–	–30	100

Всесезонное (умеренная зона)	9,5...13	≤ 10400	-45	125
Северное (зимой в холодной зоне)	6...8,5	≤ 2600	-55	125

Начальная буква М обозначает масло моторное. Следующая за ней цифра указывает класс кинематической вязкости, затем следует одна из шести букв алфавита, обозначающая группу масел по эксплуатационным свойствам.

Кроме этого, буквам алфавита могут присваиваться индексы: 1 – для карбюраторных и 2 – для дизельных двигателей. Универсальные масла, предназначенные для использования в обоих типах двигателей, индекса в обозначениях не имеют.

По вязкости зимние сорта загущенные моторных масел делят на 4 класса (3_з, 4_з, 5_з, 6_з), летние сорта – на 8 классов (6, 8, 10, 12, 14, 16, 20, 24), а внесезонные загущенные – на 10 классов (от 3_з/8 до 6_з/16). Класс внесезонных масел изображают дробью, в числителе которой указывают кинематическую вязкость при – 18 °С, а в знаменателе – при 100 °С. Например, 6_з/14 означает, что вязкость масла при – 18 °С равна 10 400 сСт, а при 100 °С находится в пределах 12,5...14,5 сСт.

Буква "з" в индексе соответствует наличию вязкостной (загущающей) присадки. Номенклатура классов вязкости и значения кинематической вязкости для отечественных ММ представлены в таблице 10.2. Механизм действия полимерных присадок основан на следующем принципе: при температурах выше 50 °С вязкость масла увеличивается больше, чем при низкой температуре (особенно отрицательной). Длинные цепи полимера расширяются при высокой температуре, увеличивая вязкость. При низкой температуре они сворачиваются в клубки, становясь более компактными, и оказывают относительно небольшое сопротивление. Масла класса 4_з/6 и 4_з/8 целесообразно использовать зимой в работах с холодным климатом, а 4_з/10 - всесезонно во всех районах, кроме южных. Масла класса 5_з/10 и 6_з/10 можно применять всесезонно в районах с умеренным климатом, а 6_з/12 – в южных районах. Масла групп А и Б для автотракторных двигателей в настоящее время не выпускаются.

Таблица 10.2

Класс вязкости	Кинематическая вязкость, мм ² /с		Класс вязкости	Кинематическая вязкость, мм ² /с	
	100 °С	-18 °С		100 °С	-18 °С
3 _з	3,8	1250	3 _з /8	7,0...9,5	1250

4з	4,1	2600	4з/6	5,6...7,0	2600
5з	5,6	6000	4з/8	7,0...9,5	2600
6з	5,6	10400	4з/10	9,5...11,5	2600
6	5,6...7,0	–	5з/10	9,5...11,5	6000
8	7,0...9,5	–	5з/12	11,5...13,0	6000
10	9,5...11,5	–	6з/10	9,5...11,5	10400
12	11,5...13,0	–	6з/12	11,5...13,0	10400
14	13,0...15,0	–	6з/14	13,0...15,0	10400

Дробные классы (это обозначение всесезонных масел) указывают, что по вязкости при температуре минус 18 °С масло соответствует классу, указанному в числителе, по вязкости при 100 °С – классу, указанному в знаменателе. Масла классов вязкости 3з и 6 в настоящее время не производятся. Область применения ММ классов 4з до 12 – это быстроходные автотракторные двигатели (карбюраторные и дизельные).

Группы ММ по назначению и эксплуатационным свойствам представлены в таблице 10.3. Классификация моторных масел по эксплуатационным свойствам распространяется на масла с присадками, используемые для смазывания двигателей внутреннего сгорания.

В зависимости от области применения моторные масла делят на шесть групп: А, Б, В, Г, Д, Е. Масла группы Е отличаются повышенной диспергирующей способностью, лучшими противоизносными свойствами. В марке масла М-10-Г₂ буква М означает моторное, число 10 – вязкость в сантистоксах при 100 °С, буква Г₂ – область применения масла (для высокофорсированных дизелей). В марке М-5_з/12-Г₁ класс вязкости 5_з/12 означает следующее: 5 – вязкость при –18 °С; буква "з" в индексе – наличие загущающей (вязкостной) присадки, вследствие чего масло можно использовать всесезонно; 12 – вязкость при 100 °С; Г₁ – область применения (для высокофорсированных бензиновых двигателей).

Таблица 10.3

Группа масла по эксплуатационным свойствам	Рекомендуемая область применения
А	Нефорсированные бензиновые двигатели и дизели

Б	Б ₁	Малофорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют образованию высокотемпературных отложений и коррозии подшипников
	Б ₂	Малофорсированные дизели
В	В ₁	Среднефорсированные бензиновые двигатели, работающие в условиях, которые способствуют окислению масла и образованию отложений всех видов
	В ₂	Среднефорсированные дизели, предъявляющие повышенные требования к антикоррозионным, противоизносным свойствам масел и способности предотвращать образование высокотемпературных отложений
Г	Г ₁	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях, способствующих окислению масла, образованию отложений всех видов и коррозии
	Г ₂	Высокофорсированные дизели без наддува или с умеренным наддувом, работающие в эксплуатационных условиях, способствующих образованию высокотемпературных отложений
Д	Д ₁	Высокофорсированные бензиновые двигатели, работающие в эксплуатационных условиях более тяжелых, чем для масел группы Г]
	Д ₂	Высокофорсированные дизели с наддувом, работающие в тяжелых эксплуатационных условиях или когда применяемое топливо требует использования масел с высокой нейтрализующей способностью, антикоррозионными и противоизносными свойствами, малой склонностью к образованию всех видов отложений
Е	Е ₁	Высокофорсированные бензиновые двигатели и дизели, работающие в эксплуатационных условиях более тяжелых, чем для масел групп Д ₁ и Д ₂ . Отличаются повышенной диспергирующей способностью, лучшими противоизносными
	Е ₂	

В марке М-8-В буква В означает универсальное масло для среднефорсированных дизельных и бензиновых двигателей. В марке М-4₃/8-В₂Г₁ буквы В₂Г₁ указывают на возможность использования масла как в среднефорсированных дизельных (В₂), так и в высокофорсированных бензиновых (Г₁) двигателях. В марке М-4₃/8-Д(т) буква т означает, что масло может быть использовано и как трансмиссионное.

За критерий форсирования двигателя принимается произведение средней скорости поршня на среднее эффективное давление. Для определения нужной группы масел необходимо знать скорость поршня (V) и среднее эффективное давление (р_е) в цилиндре в конце такта сжатия.

Одной из наиболее употребительных является классификация по вязкости Американского общества автомобильных инженеров, или система SAE (таблица 10.4). В этой системе используются значения вязкости при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. В системе SAE масла описываются одним из вышеприведенных чисел (сезонные масла, например, SAE 20W или SAE 90). Если масло удовлетворяет требованиям SAE при $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, оно считается всесезонным (например, SAE 20W-50).

Рекомендованные температуры окружающей среды для распространенного спектра масел по классификации SAE находятся в пределах от $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Классификация ISO охватывает наиболее широкий диапазон вязкостей с шагом около 1,5 единиц.

Таблица 10.4

Класс вязкости по SAE	Низкотемпературная вязкость		Высокотемпературная вязкость	
	максимальная вязкость при про- ворачивании ко- ленвала, МПа·с, при температурах	предельная температура прокачиваемости масла при макси- мальной вязкости $6 \cdot 10^5 \text{ МПа} \cdot \text{с} \cdot ^{\circ}\text{C}$	Кинематическая вязкость при 100°C , $\text{мм}^2/\text{с}$	
			не менее	не более
0W	6200 при $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$	-40	3,8	–
5W	6600 при $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$	-35	3,8	–
10W	7000 при $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$	-30	4,1	–
15W	7000 при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$	-25	5,6	–
20W	9500 при $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$	-20	5,6	–
25W	13000 при $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$	-15	9,3	–
20	–	–	5,6	9,3
30	–	–	9,3	12,5
40	–	–	12,5	16,3
50	–	–	16,3	21,9

Синтетические масла класса 0W применяются только для смазки бензиновых и дизельных двигателей легковых автомобилей. Остальные классы вплоть до 40 могут использоваться для дизелей грузовых автомобилей и строительных машин. При маркировке зимних сортов масел ставится буква W (winter), а для летних сортов буква не ставится. Всесезонные масла сочетают в своем обозначении зимнюю и летнюю маркировки.

В таблице 10.5 представлено соответствие классов вязкости табл. 17 и 19. По классификации API (Американский институт нефти) установлены три эксплуатационные категории (ряда) назначения и

качества моторных масел: S, C, EC.

Категория API S (service – сервис) предназначена для бензиновых двигателей и состоит из классов качества моторных масел, расположенных в хронологическом порядке. Маслам каждого нового класса присваивают дополнительную букву алфавита: SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG, SH, SJ и SL. Классы SA, SB, SC, SD, SE, SF, SG признаны недействительными, как устаревшие. В некоторых странах эти классы масел еще выпускают, и они встречаются на рынке. Масла устаревших в США классов категории API можно применять при эксплуатации техники, если они рекомендованы заводами-изготовителями.

Таблица 10.5

ГОСТ 17479.1–85	SAEJ300	ГОСТ 17479.1–85	SAEJ300
3 _з	5W	3 _з /8	5W-20
4 _з	10W	4 _з /6	10W-20
5 _з	15W	4 _з /8	10W-20
6 _з	20W	4 _з /10	10W-30
6	20	5 _з /10	15W-30
8	20	5 _з /12	15W-30
10	30	6 _з /10	20W-30
12	30	6 _з /12	20W-30
14	40	6 _з /14	20W-40

Масла категории S предназначены для бензиновых двигателей легковых автомобилей, микроавтобусов и грузовых автомобилей малой грузоподъемности. Определяющими показателями категории масел являются комплекс физико-химических и эксплуатационных показателей качества, тип и год выпуска двигателя, особенности режима работы двигателя.

Класс SF – масла для двигателей моделей 1988г. и старше, работающих в тяжелых условиях. Они содержат более эффективные, чем масла предыдущих классов, антикоррозионные, антиокислительные, противоизносные присадки и обладают меньшей склонностью к образованию высоко- и низкотемпературных отложений.

Класс SG – масла для двигателей моделей 1993 г. и старше, работающих на неэтилированных бензинах. У этих масел более высокие термоокислительная стабильность и противоизносные свойства. Они обладают меньшей склонностью к образованию отложений и шлама. Ими заменяют масла предыдущих классов.

Класс SH – масла для двигателей выпуска с 1994 г. и ранее. Заменяют масла класса SG. Класс является условно действующим и может быть сертифицирован как дополнительный к категориям API C (API CF–4/SH).

Класс SJ – масла для двигателей, выпускаемых с 1997 г. Используются для всех бензиновых двигателей и полностью заменяют масла всех существовавших ранее классов для более старых моделей двигателей. Масла имеют высокий уровень эксплуатационных свойств.

Класс SL – моторные масла нового поколения для бензиновых двигателей легковых автомобилей. От масел класса SJ отличаются лучшими антиокислительными, противоизносными, противопенными свойствами, меньшей испаряемостью. Имеют стабильные энерго-сберегающие свойства и больший срок службы.

Категория API C (commercial – коммерческая) предназначена для дизельных двигателей и состоит из классов качества и назначения масел, следующих в хронологическом порядке. Маслам каждого нового класса присваивают дополнительную букву алфавита: CA, CB, CC, CD, CD-11, CE; CF, CF-2, CF-4, CG-4, CH-4. Классы CA, CB, CC, CD, CD-11, CE признаны недействительными, как устаревшие.

Класс CC (устаревший) – введен для дизелей без наддува в 1961 г. Допускается применение для двигателей с умеренным наддувом и для бензиновых двигателей большой мощности. Масла содержат антикоррозионные присадки и присадки, предотвращающие образование высоко- и низкотемпературных отложений.

Класс CD (устаревший) – масла обладают антиокислительными свойствами, устойчивостью к загущению под влиянием накопления сажи и повышенной защитой клапанного механизма от износа.

Класс CD-11 (устаревший) введен в 1987 г. Масла предназначены для двухтактных двигателей. Они эффективно предотвращают износ деталей двигателя и образование шлама.

Класс CE (устаревший) введен в 1987г. Масла для высокофорсированных и мощных двигателей с турбонаддувом, работающих как при малой частоте вращения и больших нагрузках, так и при больших нагрузках и частоте вращения.

Класс CF введен в 1994 г. Масла для дизелей внедорожной техники, имеющих разделенную камеру сгорания и работающих на топливе с повышенным содержанием серы. Масла содержат присадки, эффективно предотвращающие образование нагара на поршнях, износ и коррозию медных сплавов подшипников.

Класс CF-4 введен 1990 г. Масла для высокофорсированных четырехтактных дизелей с турбонаддувом и без него, которые устанавливают на мощных тягачах, осуществляющих перевозки по автострадам. Обладают лучшими моющими свойствами и меньшим расходом на угар, чем масла класса CF. Отвечают повышенным требованиям по токсичности отработавших газов.

Класс CG-4 введен в 1995 г. Масла для высокофорсированных четырехтактных дизелей грузовых автомобилей магистрального типа,

использующих топливо с массовым содержанием серы менее 0,05 % и внедорожных машин, в топливе которых содержится серы до 0,5 % по массе. Эффективно подавляют образование нагара на поршнях, пенообразование, окисление, износ, образование сажи. Удовлетворяют высоким требованиям стандартов по токсичности отработавших газов. Недостаток масел этого класса – относительно большая зависимость ресурса масла от качества применяемого топлива.

Класс СН-4 введен в 1998 г. Масла для высокоскоростных, четырехтактных дизелей. Удовлетворяют требованиям жесткого стандарта 1998г. по токсичности отработавших газов. Соответствуют высоким требованиям американских и европейских производителей дизельных двигателей. Допускается применение масел этого класса в дизелях, работающих на топливе с массовым содержанием серы более 0,5 %. Масла содержат присадки, способствующие снижению износа клапанов и уменьшению образования нагара на деталях цилиндропоршневой группы.

Класс РС-9 разрабатывают в связи с новыми экологическими требованиями, которые сформулированы Американским агентством по охране окружающей среды. Для обеспечения этих требований необходимо создать систему рециркуляции отработавших газов. Для этого следует изменить конструкцию двигателей и придать новые эксплуатационные свойства моторным маслам. Одновременно предполагается повышение удельных мощностей двигателей.

Основные особенности работы масла в условиях рециркуляции выпускных газов и повышенной удельной мощности – повышение кислотности масла, образование сажи и в связи с этим увеличение вязкости масла, значительный износ деталей двигателя и более высокий температурный режим работы двигателя и масла.

Категория API EC – энергосберегающие маловязкие масла (Energy Conserving), уменьшающие расход топлива по результатам тестов на бензиновых двигателях.

Классы масел:

SH/EC (устаревший) – экономия бензина не менее 1,5 % по сравнению с эталонным маслом SAE 20W-30;

SH/EC 11 (устаревший) – экономия топлива не менее 2,7 % по сравнению с эталонным маслом SAE 20W-30;

API SJ/EC (действующий) – экономия в зависимости от вязкости тестируемого масла.

Универсальные масла для бензиновых и дизельных двигателей обозначаются двумя символами соответствующих категорий: первый символ является основным, а второй указывает на возможность применения масла для двигателя другого типа. Например, API SH/CF-4. Это масло предпочтительно использовать в бензиновых двигателях, но его можно применять и в дизельных двигателях, для которых

предписывается класс CF-4 и ниже (CF, CE и т. д.).

Для моторных масел, отвечающих требованиям действующих категорий качества и прошедших официальные испытания API—SAE, на этикетках ставят знак "API символ обслуживания". В этом знаке указаны вязкостные и эксплуатационные свойства масел и возможная степень энергосбережения.

Высококачественные моторные масла "Лукойл-Люкс", "Лукойл-Синтетик" и "Ю-Тек" первыми среди моторных масел отечественного производства получили знак API как продукция, сертифицированная и лицензированная по международным стандартам. Качество этих масел систематически подтверждают ведущие западные производители техники, такие, как Mercedes-Bens, BMW, Volkswagen, Porsche и др.

Новейшие категории масел, сертифицированных API, обозначают символом "Свидетельство сертификации API" – знаком "Звездный взрыв". Эти масла должны удовлетворять требованиям ILSAC (Международный комитет по стандартизации и одобрению смазочных материалов). Знак присваивают только энергосберегающим маслам наивысшего качества с вязкостями SAE OW—..., 5W—... и 10W. Пример обозначения марки моторного масла по SAE и API: Кастрол SAE 5W-30, API SJ/CF-4, EC. Первые слова в марке обычно указывают на название фирмы. Масло универсальное всесезонное. Низкотемпературная вязкость соответствует классу 5W (динамическая вязкость – проворачивание 6600 МПа.с при -30 °С, прокачиваемость 60 000 мПа.с при -35 °С). Высокотемпературная кинематическая вязкость соответствует классу 30 (min 9,3, max 12,5 мм²/с). Высокотемпературная динамическая вязкость при скорости сдвига 10⁶ с⁻¹ не менее 2,9 мПа.с. Масло предпочтительно использовать в бензиновых двигателях легковых автомобилей (класс SJ), но можно применять и в дизельных двигателях легковых автомобилей (класс CF-4). Оно обладает энергосберегающими свойствами (EC).

Примерное соответствие классов моторных масел по ГОСТ 17479.1-85 классам API приведено в таблице 10.6. Классификация моторных масел ACEA (Ассоциация европейских производителей автомобилей) действует с 1996 г., заменив классификацию CCMC (Комитет изготовителей автомобилей общего рынка). Требования европейских стандартов к качеству масел являются более жесткими, чем американские, так как в Европе условия эксплуатации и конструкции двигателей значительно отличаются от американских.

Таблица 10.6

Класс масла		Класс масла	
ГОСТ 17479.1-85	API	ГОСТ 17479.1-85	API
A	SB	Д ₁	SF

Б	SC/CA	Д ₂	CD
Б ₁	SC	Е ₁	CG
Б ₂	CA	Е ₂	CF-4
В ₁	SD		SH*
В ₂	CB		SJ*
Г	SE/CC		CG-4*
Г ₁	SE		SL*
Г ₂	CC		

Производимые в Европе двигатели характеризуются более высокой степенью форсирования, максимальной частотой вращения коленчатого вала, меньшей массой и большей удельной мощностью. Транспортные средства с таким двигателем обладают высокими допустимыми скоростями передвижения, а городские режимы их более тяжелые. В классификации ACEA предусмотрено три категории моторных масел: А – для бензиновых двигателей; В – для дизельных двигателей малой мощности, устанавливаемых на легковых и грузовых автомобилях малой грузоподъемности; Е – для мощных дизелей.

Каждая категория состоит из нескольких классов. Уровень качества и назначение масел каждого класса обозначают цифрами. Кроме того, указывают год утверждения класса. Например, ACEA A3-98, ACEA E5-99.

Классы категории А: А1-96, А1-98, А2-96, А3-96, А3-98. Классы категории В: В1-96, В1-98, В2-96, В2-98, В3-96, В3-98, В4-98. Классы категории Е: Е1-96, Е2-96, Е3-96, Е4-99, Е5-99.

Класс А1-98 – это масла для двигателей легковых автомобилей, допускающих применение масел с небольшой высокотемпературной вязкостью (2,9...3,5 МПа.с) в условиях высоких скоростей сдвига, что существенно уменьшает расход топлива. Масла обладают достаточно высокими противоизносными свойствами.

Класс А3-98 – это универсальные масла с очень высокими эксплуатационными свойствами для мощных бензиновых двигателей. Допускаются удлиненные интервалы замены, круглогодичное использование и применение в тяжелых условиях эксплуатации.

Класс А5-01. Этот класс будет отвечать высшим требованиям к маслам для бензиновых двигателей современных и перспективных легковых автомобилей.

Класс В1-98 – масла для дизельных двигателей, допускающих применение масел с небольшой высокотемпературной вязкостью (2,9...3,5 МПа.с) при высоких скоростях сдвига, благодаря чему достигается большая экономия топлива. Масла имеют хорошие противоизносные свойства.

Класс В2-98 – универсальные масла, допускаемые к применению в большинстве дизельных двигателей легковых автомобилей при нормальных интервалах замены масла. Не рекомендуются для

высокофорсированных двигателей.

Класс ВЗ-98 – масла с высокими эксплуатационными свойствами для высокофорсированных дизельных двигателей легковых автомобилей. Допускаются удлиненные интервалы замены, круглогодичное использование и применение в тяжелых условиях эксплуатации.

Класс В4-98 – универсальные масла для дизельных двигателей с непосредственным впрыскиванием топлива легковых автомобилей и фургонов. Имеет высокие эксплуатационные свойства.

Класс Е4-99 – масла очень высокого качества для мощных и быстроходных дизелей Euro1, Euro2, Еиго3. Масла имеют увеличенные интервалы замены.

Класс Е5-99 – наиболее совершенные масла, не имеющие аналогов по качеству, для дизелей Euro1, Euro2, Еиго3. Масла имеют высокую стабильность, большой срок службы, обеспечивают чистоту двигателя и предотвращают износ деталей двигателя. Отвечают требованиям европейских и американских производителей автомобилей.

В маркировке моторных масел указывают "одобрение" производителей автомобилей. Оно изображается фирменным знаком или кодом и означает, что применение данного масла одобрено на автомобилях этого завода-изготовителя. На таре с моторными маслами, как правило, указывают классификацию: SAE, API или ACEA.

Пример маркировки моторного масла: SAE 5W-50, API SJ/CF, ACEA A3-98/ВЗ-98, VW 501.01/505.00, MB 229.1, BMW, Porsche. Вязкостно-температурные свойства обозначены SAE 5W-50 (всесезонное масло, сочетающее в себе свойства масел зимнего SAE 5W и летнего SAE 50 классов). Эксплуатационные свойства по классификации API и европейской ACEA. API SJ/CF означает, что масло предназначено для бензиновых двигателей (SJ), но может быть использовано и для дизелей (CF). ACEA A3-98; ВЗ-98/А3-98 – масло высшего класса для бензиновых двигателей с наддувом и без него современных европейских автомобилей; ВЗ-98 – масло высшего класса для дизелей с наддувом легковых современных европейских автомобилей.

В указанной марке одобрение производителей означает следующее: VW – Volkswagen–Audi, 501.01 – всесезонное масло; 505.00 – для двигателей с турбонаддувом; MB – Mercedes-Benz, 229.1 – масло для двигателей легковых автомобилей выпуска с 1997 г.; BMW, Porsche – названия фирм. На канистре с полусинтетическими маслами обычно указывают Semi Synthetic, а с полностью синтетическими – Fully Synthetic. В РФ несколько фирм выпускают моторные масла, соответствующие международным требованиям, причем каждая фирма специализируется на выпуске разных сортов масел как для бензиновых, так и для дизельных двигателей. Для современных двигателей отечественного производства нефтяные компании разработали новые марки масел. В таблице 10.7

указаны новые моторные масла, допущенные к производству и применению в технике.

Таблица 10.7

Марка масла	Обозначения по SAE и API	Производитель
Лада Стандарт	IOW-40, 15W-40, 5W-30	ООО "Новокуйбышевский завод масел и присадок"
Лада Супер зима	5W-40 (категория SG/CD)	Он же
Лада Супер плюс	IOW-40, 15W-40	Он же
Лукойл-Авангард	15W-40	ООО "Лукойл-Пермнефтеоргсинтез"
Лукойл супер	5W-40, 15W-40	ООО "Лукойл-Волгоград-нефтепереработка"
Норси Ультра плюс	5W-30, 5W-40, 10W-40, 15W-40	ООО "Норси"
Норси	20W-50, 20W-40, 20W-30	Он же
Рольс Турбо	15W-40	ОАО "Рязанский НПЗ"
Рольс Супер	5W-40, IOW-40, 15W-40	Он же
Омскойл (М-5 _з /12-Г)	10W-30	ОАО "Сибнефть-Омск НПЗ"
Омскойл (М-6з/14-Г)	15W-40	Он же
Спектрол Турбо Универсал	10W-40	ЗАО ПГ "Спектр-Авто"
Спектрол Чемпион (М-5 _з /14-ДМ)	5W-40	Он же
Новойл Экстра I (М-5 _з /14-Д)	15W-40	ООО ИЦ "ИНТЕКО"
Сириус	5W-30, 5W-40	НПП "КВАЛИТЕТ"
Сатурн	5W-40	Он же
Альтаир	10W-30, 10W-40, 15W-40	Он же
Consol Титан Супер	SAE 30, API СД, SAE 15W-40, API СД	"Виалойл"
Consol Титан Транзит	SAE 15W-40, API CF ₄ /SG	Он же
Consol Титан Континент	SAE 15W-40, API CG/SJ	Он же
Consol Титан Премиум	SAE 15W-40, API CH-4/SJ, SAE 20W-50, API CH-4/SJ	Он же

Продолжение таблицы 10.7

Visco 7000	OW-40	SL/CF	A3/B3/B4	British Petroleum
Visco 5000	5W-40	SL/CF	A3/B3/B4	Он же
Visco 3000	1 OW-40	SL/CF	Л3/В3	Он же
Visco 2000	15W-40	SL/CJ	A3/B3	Он же
Formula SLX	OW-30	SL/CF	A3/B3/B4	Cactrol
TXT Softec Plus	5W-30	SL/SF	A3/B3/B4	Он же
Performance	1 OW-30	SL/CF	A3/B3	Он же
Formula RS	OW-40	SL-CF	A3/B3/B4	Он же
GTX Magnatec	5W-40	SL/CF	A3/B3/B4	Он же
GTX 3 Protection	15W-40	SL-CF	A3/B3	Он же
Rimula Super FE	10W-40	CH-4	E3	Shell
Ultra	1 OW-40	SJ/CF	A3/B3	Esso
Ultron Diesel	5W-40	CF	B3	Он же
Essolube 301	20W-20	CF/SG	E2	Он же
Mobil 1	OW-40	SJ/CF/EC	A3/B3	Mobil
Mobil Delvac SHC	5W-40	SJ/CF	B3/B4	»
Neste Turbo Super	1 OW-40	CF	E2/E3/E4	Fortum
Neste Turbo LXE	15W-40	CH-4/SJ	E2/E3/E5	Он же
Neste Farm Universal	10W-30	CF-4, CE/SF,	E2	Он же
SYN POWER	OW-40	SJ/CF	A3/B3	Valvoline
BURA BLEND	10W-40	SJ/CF	A3/B3	Он же
TURBO V	15W-40	SJ/CG-4	A3/B3	Он же
MaxLife	15W-40	SJ/CF	A3/B2	Он же

В связи с повышением мощности, изменением конструкции и усложнением эксплуатации современных двигателей, условия работы масел стали более жесткими. Но сроки замены масел непрерывно увеличиваются благодаря улучшению их качества. Преждевременная замена масел экономически нецелесообразна, так как увеличивается их расход, затраты на техническое обслуживание, на запасные части и т. д. Неоправданное увеличение сроков службы масел приводит к повышенному износу деталей двигателя, что снижает надежность двигателя и увеличивает отказы в его работе. Определение оптимальной периодичности замены масел является трудоемкой длительной работой, имеет важное экономическое и техническое значение.

Периодическое добавление масла в процессе эксплуатации частично восстанавливает первоначальные свойства масел. Через определенное время масло подлежит полной замене. Периодичность замены масла зависит от его свойств, типа двигателя, его технического состояния и условий

эксплуатации, технического состояния масляной системы, способа фильтрации, используемого топлива, профессиональности водителя и других факторов.

Необходимость полной замены обусловлена потерей основных эксплуатационных качеств масла, т. е. его старением. Основная причина старения масла – окисляемость масла и срабатываемость присадок. Происходит загрязнение масла твердыми продуктами его окисления, углеродистыми частичками, пылью, песком, попадающими в масло извне, металлическими частичками, образующимися в результате износа деталей двигателя, и продуктами коррозии металлов, несгоревшим топливом, сернистыми соединениями, содержащимися в отработавших газах, водой, образуемой при конденсации из отработавших газов и попадающей извне с воздухом, а также испарение легких фракций масла.

Загрязнение масла происходит также в процессе его транспортировки, хранения и заправки. Количество механических примесей в масле может составлять 0,2 %. Примеси, попадающие извне и образующиеся в процессе эксплуатации масла, изменяют характер трения, засоряют масляные фильтры и каналы, увеличивают температурный режим работы деталей двигателя, вызывают их повышенный износ.

Загрязнение масла примесями вызывается повышением прорыва газов в масляный картер, а также продуктами неполного сгорания топлива. Повышенное содержание механических примесей в масле свидетельствует о плохом техническом состоянии системы фильтрации. В результате использования системы тонкой очистки моторного масла износ основных деталей двигателя снижается в два-три раза и значительно увеличивается срок службы моторного масла.

Современные двигатели характеризуются уменьшенным объемом масляной системы, вследствие чего увеличены производительность масляных насосов и кратность циркуляции масла. Последнее повышает насыщение масла воздухом, что, в свою очередь, ведет к увеличению скорости окисления масла и повышению износов деталей двигателя.

Наряду с эксплуатацией на форсированных режимах для многих автомобилей характерна работа двигателя с частыми остановками, продолжительной работой на холостом ходу. В городских условиях двигатели работают на частичных нагрузках около 80 % времени. При этом режиме двигатели работают на низкотемпературных режимах, особенно в зимний период времени. Например, при температуре окружающего воздуха – 10... –15 °С и поездке на расстояние до 20 км температура жидкости в системе охлаждения составляет около 50 °С. При пониженных тепловых режимах работы двигателя увеличивается скорость образования низкотемпературных осадков, загрязнение масла вследствие неполного сгорания топлива и повышенной конденсации водяных паров. Длительная работа двигателя на пониженных режимах приводит к

загрязнению поршней, колец и повышенному расходу масла вследствие увеличения его угара.

Относительный расход масла в зависимости от состояния маслосъемных колец и изношенности двигателя следующий, %:

новый, после обкатки.....	100
новый, с забитыми прорезями маслосъемных колец.....	460
изношенный.....	722
изношенный, с забитыми прорезями маслосъемных колец..	4400

На образование углеродистых и других отложений на деталях дизелей существенно влияют вид и состав топлива.

В отработавших газах дизелей содержится значительное количество сажи. Количество сажи, попадающей в масло, например, в двигателе типа ЯМЗ-238 за 200 ч работы может составлять от 60 до 600 г. Чем хуже техническое состояние двигателя, тем больше сажи содержится в отработавших газах и тем больше попадает ее в масло. Состав и количество отложений на деталях двигателя ведет к серьезным нарушениям в его работе и может служить причиной выхода из строя. Влияние топлива на количество органических отложений в масле резко уменьшается при работе двигателя на газообразном топливе. Так, примесей в масле дизельных двигателей в 5 раз больше, чем в бензиновых, и в 10..20 раз больше, чем в масле двигателей, работающих на газообразном топливе.

По данным НАМИ, в масле двигателя, работающего на газообразном топливе, после 10 тыс. км пробега примесей значительно меньше, чем после 5 тыс. км пробега того же автомобиля, работающего на бензине; в масле грузового автомобиля, работающего на газообразном топливе, после 5 тыс. км пробега количество примесей составляло 0,07 %, после 10 тыс. км пробега – 0,11 %, а в масле грузового автомобиля, работающего на бензине, содержание примесей после 5 тыс. км пробега составляло 0,4 %.

Старение масла приводит к закоксовыванию поршневых колец, их пригоранию, потере подвижности; повышению температуры деталей цилиндропоршневой группы из-за ухудшения теплоотвода; заклиниванию клапанов в направляющих втулках; прогару клапанов; уменьшению проходного сечения впускного и выпускного трактов; загрязнению сеток маслоприемников насосов, фильтров, масляных каналов смазочной системы, дренажных отверстий в маслосъемных кольцах и поршне; изменению вязкости масла; повышению коррозионного износа деталей цилиндропоршневой группы; абразивному износу деталей твердыми частичками примесей; коррозии подшипниковых сплавов и ржавлению железосодержащих деталей.

Фильтрующие элементы и вентиляция картера замедляют, но не предотвращают старение масел. Периодичность замены масел

устанавливают на основе тщательного изучения эксплуатационных свойств масел и их изменения в процессе эксплуатации. В современных автотракторных парках используют качественные новые масла. Однако принятая периодичность замены масел пока недостаточно обоснована, так как лишь частично учитывается опыт эксплуатации новой техники. Поэтому требуется корректировка сроков замены масел, устанавливаемых заводом-изготовителем, после достаточного накопления и изучения результатов эксплуатации. Установление сроков замены масел по изменению их цвета пока невозможно. Например, масло чернеет через несколько десятков часов работы вследствие приработки присадок. Однако, несмотря на черный цвет, оно еще обладает высокими эксплуатационными показателями качества. Некоторые из браковочных показателей отработанных масел указаны в таблице 10.8.

Таблица 10.8

Показатель	Показатели масла для двигателей:	
	бензиновых	дизельных
Изменение вязкости, %:		
повышение	25	40
снижение	20	30
Содержание примесей, нерастворимых в бензине, %, не более	1,0	3,0
Содержание воды, %, не более	0,3	0,3
Содержание топлива, %, не более	0,8	0,8
Щелочное число, мг КОН/г, не менее	0,5...2*	1...3*
Снижение температуры вспышки, °С, не более	20	20

Примечание: * Большие значения для масел высших групп.

Для повседневного контроля за качеством работающего масла не годятся такие методы, как определение содержания продуктов износа и определение щелочности, хотя эти анализы являются наиболее обоснованными и достоверными для определения срабатываемости масел.

Сроки службы масел устанавливают, исходя из экономической и технической целесообразности. Длительность эксплуатации масел в двигателях, работающих на газообразном топливе, в 2 раза больше, чем в двигателях, работающих на жидком топливе. При работе двигателя на этилированном бензине срок службы моторного масла снижается в 1,5...2 раза по сравнению со сроком службы масла в двигателе, работающем на неэтилированном бензине.

Периодичность замены масла устанавливает завод-изготовитель,

указывая ее в картах и таблицах смазок. Для увеличения срока службы масла при его замене необходима промывка смазочной системы.

Специалистами НПП "Квалитет" разработана саморегулирующая смазочная система двигателей, которая обеспечивает значительное продление сроков службы моторного масла и повышает их эффективность при эксплуатации. Система состоит из высокооборотных ($n = 10\ 10000 \dots 12000 \text{ мин}^{-1}$) центробежных фильтров – суперцентрифуг и прибора, поддерживающего стабильность физико-химических свойств масел. Этот прибор вводит в масло новую порцию присадки по мере ее срабатывания. Саморегулирующая смазочная система – первый шаг к эксплуатации двигателей без замены моторного масла.

10.3.1.2. Трансмиссионные масла

Трансмиссионные масла (ТМ) применяются для смазывания механических и гидромеханических трансмиссий наземных транспортных средств: автомобилей, тракторов, строительных, подъемных и других мобильных машин. Основные назначения ТМ для механических передач – снижение износа трущихся сопряжений, уменьшение затрат энергии на преодоление трения, отвод теплоты от деталей и предохранение их от коррозии.

Характерные формы повреждения зубчатых колес и подшипников трансмиссий – выкрашивание рабочих поверхностей (питтинг), а при высоких контактных температурах – еще и задир.

Одним из эффективных способов борьбы с задиром является применение присадок для сверхвысоких давлений.

Усталостную долговечность поверхностей зубьев в трансмиссиях можно увеличить, применяя масла с высокой вязкостью.

При выборе масла по вязкости следует учитывать, что вязкость и поведение масла при низких температурах определяют возможность начала работы транспортного средства при низкой температуре без подогрева трансмиссии. Они также определяют расход топлива и легкость слива масла. Требуемые вязкость и низкотемпературные свойства масла обусловлены температурным режимом работы и хранения транспортного средства, конструктивными особенностями трансмиссии и отношением мощности двигателя к массе транспортного средства. Важно, чтобы кривая "вязкость–температура" для трансмиссионных масел, применяемых в широком температурном диапазоне, была плавной.

Одной из особенностей трансмиссий транспортных средств, особенно автомобилей, является высокое контактное давление на зубьях шестерен (до 3000 МПа) и изменяющиеся условия работы. Температура подшипников гипoidной главной передачи автомобиля может достигать 200 °С, а объемная температура масла – 150 °С.

Общие требования к трансмиссионным маслам определяются конструктивными особенностями, назначением и условиями работы

трансмиссии. К основным функциям трансмиссионного масла относят следующие: предохранение поверхностей трения агрегатов трансмиссии от износа, заедания, питтинга и других повреждений, смягчение в них ударных нагрузок; снижение до минимума потерь энергии на трение; отвод теплоты из зоны контакта зубчатых передач; снижение шума и вибрации шестерен.

Трансмиссионные масла работают в условиях высоких контактных напряжений и скоростей. В цилиндрических, конических, червячных и спирально-конических передачах контактные напряжения составляют 1000...2500 МПа. Особенно тяжелые условия работы масла в гипоидных передачах: контактные напряжения 3000 МПа и более. В таких условиях должна обеспечиваться особо прочная масляная пленка. С этой целью в состав трансмиссионных гипоидных масел вводят "осерненные" растительные масла и серо-, фосфор- и хлорсодержащие присадки.

Кроме предупреждения истирания, задира, возникновения усталостного выкрашивания трущихся поверхностей трансмиссионные масла должны отвечать общим требованиям, предъявляемым к смазочным материалам. Так как под действием высоких давлений температура в зоне контакта зубьев резко повышается (иногда до 400 °С), то масла должны обладать также высокими антиокислительными и антикоррозионными свойствами. Трансмиссионные масла работают в широком диапазоне температур, поэтому у них должны быть обеспечены требуемые вязкостно-температурные свойства. В процессе работы трансмиссионные масла окисляются и загрязняются, присадки в них срабатываются, вследствие чего масла необходимо заменять. Срок службы масла зависит от его марки, типа машины, условий эксплуатации, качества масла, сезонности и т. п. Высокие эксплуатационные свойства ТМ обеспечиваются качественной основой, комплексом вводимых присадок, добавлением в некоторые марки растительных масел. Наиболее часто применяют загущенные масла.

В РФ классификация ТМ по вязкости и по эксплуатационным свойствам в нашей стране регламентированы ГОСТом 1749.2–85. В зависимости от значения кинематической вязкости при 100°С трансмиссионные масла разделены на четыре класса (таблица 10.9).

Таблица 10.9

Класс вязкости	Кинематическая вязкость при температуре 100 °С, мм ² /с	Температура, при которой динамическая вязкость не превышает 150 Па·с, °С, не выше
9	6,00...10,99	–45
12	11,00...13,99	–35
18	14,00...29,99	–18
34	25,00...41,00	–

В соответствии с классом вязкости ограничены допустимые пределы кинематической вязкости при 100 °С и отрицательная температура масла, при которой динамическая вязкость не превышает 150 Па·с. При этой вязкости масла еще обеспечивается надежная работа сборочных единиц трансмиссии.

По эксплуатационным свойствам (таблица 10.10) и возможным областям применения масла для трансмиссий автомобилей, тракторов и другой мобильной наземной техники разделены на пять групп: ТМ-1, ..., ТМ-5.

В зависимости от климатических условий промышленность выпускает летние, северные и арктические, а также всесезонные масла. Масла классов 9 и 12 используются соответственно в арктических и северных районах страны. Масла класса 18, марки которых наиболее широко представлены в ассортименте ТМ, используются всесезонно для районов умеренного климата.

Масла класса 34 применяются ограниченно в умеренной (летом) и южной климатических зонах. Соответствие продуктов действующего ассортимента ТМ, выпускаемых перерабатывающими предприятиями по разным нормативно-техническим документам (НТД) и стандарту ГОСТ 17479.2-85, дано в таблице 10.11.

Таблица 10.10

Группа масел	Состав масла	Рекомендуемая область применения
1	Минеральные масла без присадок	Цилиндрические, конические и червячные передачи, работающие при контактных напряжениях 900...1600 МПа и температуре масла в объеме до 90 °С
2	Минеральные масла с противоизносными присадками	То же при контактных напряжениях до 2100 МПа и температуре масла в объеме 130°С
Группа	Состав масла	Рекомендуемая область применения
3	Минеральные масла с противозадирными присадками умеренной	Цилиндрические, конические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях 2500 МПа и температуре масла в объеме до
4	Минеральные масла с противозадирными присадками высокой эффективности	Цилиндрические, спирально-конические и гипоидные передачи, работающие при контактных напряжениях 3000 МПа и температуре масла в объеме до 150°С

5	Минеральные масла с присадками упомянутых выше видов высокой эффективности и многофункциональные	Гипоидные передачи, работающие с ударными нагрузками при контактных напряжениях выше 3000 МПа и температуре масла в объеме до 150 °С
---	--	--

С помощью буквенных и цифровых знаков определяется принадлежность масла к классу вязкости и к группе эксплуатационных свойств. Пример обозначения трансмиссионного масла: ТМ-4-9₃, где ТМ – трансмиссионное масло; 4 – группа масел с противозадирными присадками высокой эффективности; 9 – класс вязкости; 3 – наличие загущающей присадки.

Таблица 10.11

По ГОСТ 17479.2-85	Обозначения по НТД
ТМ-1-18	АК-15
ТМ-2-9	ГСП-ЮЭФО
ГМ-2-18	ТЭп-15
ТМ-3-9 ₃	ГСзп-8
ТМ-3-9	ГСП-10
ТМ-3-18	ГСП-15К
ТМ-3-18	ГАП-15В
ГМ-4-9 ₃	ГСз-9 гип
ТМ-4-18	ГСП-14гип
ГМ-4-34	ТСгип
ТМ-5-12	ГМ5-12
ТМ-5-18	ГАД-17И

Незагущенные зимние ТМ с противозадирными и противоизносными присадками ОТП используются для зубчатых передач грузовых автомобилей под маркой ТСП-10, а для тракторов с присадкой ЭФО-ТСП-ЮЭФО. Индекс "гип" в марке ТМ указывает на то, что оно может быть использовано в гипоидных передачах. Масло ТМ-5-12 используется как всесезонное для холодной климатической зоны и зимнее для средней полосы. Предназначено для смазывания зубчатых передач мобильной техники, включая гипоидные передачи. Если в это масло вводят консервационную присадку НГ-107Т, то оно под маркой ТМ-5-12 рк (ТМ-5-12з(рк)) используется как рабоче-консервационное масло.

Зарубежные ТМ по вязкости классифицируются по SAEJ306 (таблица 10.12). Различают зимние масла с индексом W (северные,

арктические) и летние – без индекса. Если масло всесезонное, то у него двойная маркировка, например, SAE80W-90.

Вязкость масла следует выбирать с учетом максимальной и минимальной температур применения техники. Поэтому стандарт SAE распространяется только на значения вязкости трансмиссионного масла, измеряемые при высоких и низких температурах. Масла классов вязкости SAE 70W...85W предназначены для эксплуатации в зимнее время; классов SAE 80...250 – в летнее время.

Трансмиссионные масла, которые одновременно удовлетворяют высоко- и низкотемпературным требованиям, называют всесезонными. Их наиболее часто используют в технике. Масло для средней климатической зоны класса SAE 80W-90 удовлетворяет низкотемпературным требованиям для масла SAE 80W (т. е. при температуре –26 °С динамическая вязкость масла не превышает 150000 сПз) и высокотемпературным для масла SAE 90 (т. е. при 100 °С кинематическая вязкость находится в пределах 13,5...24 сСт).

Таблица 10.12

Класс вязкости	Максимальная температура для вязкости 150000 сПз, °С	Кинематическая вязкость при 100°С, сСт	
		минимальная	Максимальная
70W	–55	4,1	–
75W	–40	4,1	–
80W	–26	7	–
85W	–12	11	–
80	–	7	< 11
85	–	11	<13,5
90	–	13,5	<24
140	–	24	<41
250	–	41	–

В таблице 10.13 представлено соответствие классификаций ТМ по классам вязкости по стандартам SAEJ306 и ГОСТ 17479.2-85. Выпускаемые зарубежными производителями минеральные летние масла классов 80, 85 и 250 не имеют соответствующих аналогов среди отечественных марок, а всесезонные масла – это синтетические или полусинтетические продукты. Они обеспечивают длительную работоспособность по сравнению с минеральными маслами, а также имеют высокий индекс вязкости, достигающий до 170.

Таблица 10.13

Класс вязкости	Минимальная температура	Кинематическая вязкость при 100 °С, мм ² /с	Соответствие класса по SAE
----------------	-------------------------	--	----------------------------

поSAE	достижения динамической вязкости 150 Па·с	не менее	не более	классу вязкости по ГОСТ
Зимние масла				
70W	-55	4,1	—	—
75W	-40	4,1	—	9
80W	-26	7,0	—	9
85W	-12	11,0	—	12
Летние масла				
90	—	13,5	24	18
110	—	18,5	24	18
140	—	24	41	34
190	—	32,5	41	34

Большие интервалы замены масел достигаются за счет высокой механической стойкости масляной пленки в широком диапазоне температур. Кроме того, их отличает высокая термо-окислительная стабильность, которая предотвращает загустевание масла и образование шлаков и отложений. В соответствии с классификацией API трансмиссионных масел по эксплуатационным свойствам предусматривается деление их на 6 групп, первые 5 (GL-1, GL-2, GL-3, GL-4, GL-5) из которых идентичны 5 группам ТМ по ГОСТ 17479.2-85 по условиям нагружения и области применения. В классификации API в отличие от упомянутого ГОСТа нормируется содержание противозадирных присадок в группах GL-4 (ТМ-4) до 4% по объёму и GL-5 (ТМ-5) до 6,5%. В новой версии классификации API вместо шестой группы GL-6 введена категория МТ-1. К ней относятся масла для высоконагруженных механических передач мощных тягачей. В таблице 10.14 представлена классификация ТМ по API в зависимости от конструктивных особенностей трансмиссий, условий их эксплуатации и содержания присадок.

Таблица 10.14

Категория масла API	Состав масла	Условия эксплуатации	Область Применения
GL-1	без присадок или с депрессорной и антипенной присадками	малые нагрузки и скорости скольжения	механические коробки передач
GL-2	как и GL-1, дополнительно может быть антифрикционная присадка	умеренные	червячные передачи транспортных средств
GL-3	со слабоэффективной противозадирной присадкой	средние	передачи механические и спирально-

			конические
GL-4	обычно 50% присадок масла GL-5	тяжелые	то же
GL-5	с высокоэффективными противозадирными и противоизносными присадками	тяжелые и ударные	гипоидные передачи
MT-1	аналогично GL-5, и с присадками, повышающими термостабильность и совместимость с материалом уплотнений	очень тяжелые и ударные	механические передачи при большой грузоподъемности
PG-2	аналогично MT-1	то же	спирально-конические и гипоидные передачи

Примеры обозначения трансмиссионных масел по SAE и API:

а) Норси SAE 85W-90, API GL-5 где Норси – название фирмы, 85W – вязкость при низкой температуре, 90 – вязкость при 100 °С, – GL – смазочный материал для передач, 5 – группа масла;

б) Тейбол SAE 10W-30, API CD/SF, GL-4 – универсальное масло, применяется в двигателях, в основном в дизелях, в трансмиссиях и гидравлических системах.

В таблице 10.15 представлен ассортимент ТМ, выпускаемый нефтеперерабатывающей промышленностью. Здесь приняты следующие обозначения показателей: 1 – кинематическая вязкость при 100°С мм²/с, не менее; 2 – индекс вязкости, не менее; массовая доля, %; 3 – механических примесей; 4 – воды; температура, °С; 5 – застывания, не более; 6 – вспышки в открытом тигле, не более; 7 – испытания на коррозию пластинок из стали и меди в течение 3 часов при 100 °С; 8 – плотность при 20 °С, кг/м³, не более.

Таблица 10.15

Показатель	ТЭп-15 (ТМ-2-18)	ТСп-10 (ТМ-3-9)	ТСп-15к (ТМ-3-18)	ТАп-15В (ТМ-3-18)	ТСп-14гип (ТМ-5-18)	ТАД-17и (ТМ-5-18)
1	15±1	10	15±1	15±1	≥14	≥17,5

2	–	90	90	–	85	100
3	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	Отсутствие
4	Следы	Следы	Следы	Следы	Отсутствие	Следы
5	–18	–40	–25	–20	–25	–25
6	185	128	185	185	215	200
7	Выдерживает		–	Выдерживает		–
8	950	915	910	930	910	907

В трансмиссионные масла Тап-15В, ТСП-15-к (при температуре ниже –30 °С) и ТСП-10 (при температуре ниже –45 °С) допускается добавлять арктическое (зимнее) дизельное топливо (15...18 %) для улучшения низкотемпературных свойств этих масел. В таблице 10.16 представлены области применения ТМ в наземных транспортных средствах.

В таблице 10.17 представлены перспективные ТМ отечественного производства. В нашей стране собственные спецификации на трансмиссионные масла имеет автомобилестроительный завод – АвтоВАЗ. Эти спецификации распространяются на масла трех групп: ТМ ВАЗ 1.97.716 – для всесезонной эксплуатации агрегатов трансмиссии автомобилей ВАЗ всех моделей, за исключением ВАЗ-2108 и ВАЗ-1111 ("Ока"); ТМ ВАЗ 1.97.728 – для всесезонной эксплуатации коробок передач переднеприводных автомобилей ВАЗ-2108 и ВАЗ-1111; ТМ ВАЗ 1.97.729 – универсальное трансмиссионное масло для всесезонной эксплуатации агрегатов трансмиссии автомобилей ВАЗ всех моделей.

Таблица 10.16

Марка масла	Категория API	Область применения
ТЭп-15 (ТМ-2-18)	GL-2	Передачи и трансмиссии автомобилей и тракторов
ТСП-10 (ТМ-3-9)	GL-3	То же
ТСП-15к (ТМ-3-18)	GL-3	Трансмиссии грузовых автомобилей КамАЗ
Тап-15В (ТМ-3-18)	GL-3	Трансмиссии автомобилей и тракторов
ТСП-114гип (ТМ-5-18)	GL-5	Гипоидные передачи грузовых автомобилей
ТАД-17и (ТМ-5-18)	GL-5	Трансмиссии легковых автомобилей

С целью унификации масел для тракторов НАТИ совместно с АООТ "Ярославнефтеоргсинтез" при участии фирмы "Шеврон С. А. Оронайт" создано единое всесезонное трансмиссионно-гидравлическое масло ТГМ.

Масло имеет достаточный запас качества, что позволяет увеличить

периодичность его замены в агрегатах трансмиссии и гидросистемах тракторов. Масло допущено к применению в отечественной и зарубежной тракторной технике.

НПП "Квалитет" разработал пакет присадок к трансмиссионным маслам: Т-43 – для масел класса GL-3; Т-44 – для масел класса GL-5.

Трансмиссионные масла заменяют при значительном изменении показателей их качества.

Условия эксплуатации конкретной конструкции трансмиссии являются главным фактором, определяющим срок замены масла. Под условиями эксплуатации подразумевают нагруженность трансмиссии, температурный режим, интенсивность загрязнения масла пылью, водой и продуктами износа деталей.

Кварцевая пыль резко снижает противоизносные свойства масла, которые невозможно компенсировать (улучшить) самыми эффективными присадками.

При попадании в масло воды износ увеличивается в 2 раза. Масло следует менять при повышении вязкости на 50 %. Необходимым условием длительной работы масла является надежная герметизация трансмиссии. Среднестатистические интервалы замены отечественных масел составляют:

✓ для автоматических коробок передач легковых автомобилей, а также коробок передач и других агрегатов трансмиссий грузовых автомобилей 30...50 тыс. км;

✓ для коробок передач и других агрегатов трансмиссий подвижной техники в тяжелых режимах работы 15... 30 тыс. км.

Таблица 10.17

Марка масла	Обозначения		Производитель
	по SAE	по API	
Рексол Т Гипоид (ТМ-5-18)	80W-90	GL-5	ОАО "Рязанский НПЗ"
Рексол Т Гипоид (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Норси Транс-80 (ТМ-5-18)	80W-90	GL-5	ООО "Норси"
Норси Транс-85 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Норси Транс Классик (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Спектрол Синакс	75W-90	GL-5	АО ПГ "Спектрол-Авто"
Спектрол Форвард (ТМ-5-18)	80W-90	GL-5	Он же

Спектрол Круиз (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Омскойл Супер Т (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	ОАО "Омский НПЗ"
Омскойл К (ТМ-3-18)	80W-90	GL-3	Он же
Волонез Супер Т (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	ДАО "Лукойл-Волгоград- нефтепереработка"
Волонез Т-1 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Волонез Т-2 (ТМ-3-18)	80W-90	GL-3	Он же
Ангрол Т (ТМ-3-18)	80W-90	GL-3	ОАО "Ангарская нефтехимическая компания"
Ангрол Супер Т (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Ян-Марка Супер Т (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	ОАО "Славнефть- Ярославнефтеоргсинтез"

Окончание таблицы 10.17

Марка масла	Обозначения		Производитель
	по SAE	по API	
Ян-Марка Т ГМ (ТМ-4-9/МГ-68-В*)	75W-80	GL-4	Он же
Новойл Супер Т (ТМ-5-18)	80W-90	GL-5	ОАО "Ново-Уфимский НПЗ"
ВЕЛС ТРАНС-3 (ТМ-3-18)	85W-90	GL-3	"Лукойл- Пермнефтеоргсинте"
ВЕЛС ТРАНС-5 (ТМ-5-18)	80W-90	GL-5	Он же
ТЕМП-1 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	ОАО "Пермский завод смазок и смазочно- охлаждающих жидкостей"
Самойл 4402 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	ОАО "Новокуйбышевский НПЗ"
Самойл 4404 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же
Самойл 4405 (ТМ-5-18)	85W-90	GL-5	Он же

Примечание. *Обозначение единого трансмиссионно-гидравлического масла.

В таблице 10.18 представлены импортные ТМ.

Таблица 10.18

Марка	Обозначение		Фирма
	SAE	API	
NESTE TURBO SUPER LS	80W-90	GL-5	Fortum
NESTE TURBO SUPER LF	80W-90	GL-5	Он же
NESTE GEAR	80W-90	GL-4	Он же
NESTE TURBO GEAR EP	80W-90	GL-5	Он же
Valvoline SYn Power TDL	75W-90	GL-1	Valvoline
Castrol SYNTRANS	75W-90	GL-4	Castrol
Castrol SMS	75W-90	GL-4	Он же
Castrol EP-90	90	GL-4	Он же
Castrol SAF-X	75W-140	GL-5	Он же
B.P. Entrgear HT	80W-90	GL-5	British Petroleum
B.P. Entrgear Hypo	80W-90	GL-5	Он же
ESSO GEAR OIL GX-D	85W-90	GL-5	ESSO
GETRIEBEOEL FE	75W-90	GL-4	Он же
ESSO GETRIEBE OEL GX	75W-90	GL-5	Он же
Mobilube 1 SHS	75W-90	GL-5	Mobil
Mobilube ATF SHC	75W-90	GL-5	Он же
TURBO V			Он же

10.3.1.3. Индустриальные масла

Нефтеперерабатывающая промышленность производит большой ассортимент современных индустриальных масел с высокими эксплуатационными свойствами. К индустриальным маслам относится большая группа масел, предназначенных для смазывания поверхностей трения металлообрабатывающих станков, электродвигателей, вентиляторов, насосов и другого промышленного оборудования при температурах до 50 °С. Кроме того, индустриальные масла используют в качестве рабочей жидкости в гидроусилителе руля автомобиля, гидросистемах грузоподъемных машин, станков и другого оборудования. Главный показатель, характеризующий эксплуатационные свойства индустриальных масел, – это вязкость, нормируемая при 40 °С.

Основные эксплуатационные требования, предъявляемые к индустриальным маслам: отсутствие коррозионно-активных веществ, абразивных примесей и воды; вязкостно-температурная стабильность и низкая температура застывания.

В зависимости от назначения индустриальные масла делят на четыре группы (ГОСТ 17479.4–87):

Л – легко нагруженные сборочные единицы (шпиндели, подшипники и сопряженные с ними соединения);

Г – гидравлические системы;

Н – направляющие скольжения;

Т – тяжело нагруженные сборочные единицы (зубчатые передачи).

Обозначение по указанному стандарту соответствует классификации ИСО 6743/0–81, группы масел в которой соответственно обозначают буквами F, H, G и C.

По эксплуатационным свойствам промышленные масла делят на подгруппы: А, В, С, Д, Е. Масла подгруппы А без присадок, предназначены для машин и механизмов промышленного оборудования, условия работы которых не предъявляют особых требований к антикоррозионным и антиокислительным свойствам масел. В зависимости от вязкости промышленные масла делят на 18 классов.

Пример обозначения промышленного масла: И-ЛГ-А-15 (И-12А), где И – промышленное, ЛГ – для легконагруженных сборочных единиц и гидравлических систем, А – без присадок, 15 – класс вязкости, в скобках – общепринятое обозначение.

Области применения некоторых промышленных масел:

И-ЛГ-А-15 (И-12А) – в качестве рабочей жидкости в гидросистемах сельскохозяйственных машин, гидроусилителя руля автомобилей, в подшипниках маломощных электродвигателей, гидросистемах станков, шпинделях металлорежущих станков, работающих с частотой вращения до $10\,000\text{ мин}^{-1}$;

И-Г-А-32 (И-20А) – гидросистемы строительных, дорожных и других машин, подшипники вентиляторов, насосов, шпиндели сверлильных станков (до 1500 мин^{-1});

И-Г-А-46 (И-30А) – гидросистемы тяжелых станков, подшипники насосов и вентиляторов, товарные, фрезерные станки (до 1000 мин^{-1});

И-Г-А-68 (И-40А) – гидросистемы тяжелого оборудования и крупных станков, тяжело нагруженные малоскоростные механизмы.

В таблице 10.19 представлены промышленные масла общего назначения (ГОСТ 20799-88) без присадок; приняты следующие обозначения показателей:

1 – кинематическая вязкость при 40 °C $\text{мм}^2/\text{с}$, не менее;

2 – плотность при 20 °C , $\text{кг}/\text{м}^3$, не более;

3 – кислотное число, $\text{мг КОН}/\text{г}$, не более;

температура, °C : 4 – вспышки в открытом тигле, не ниже;

5 – застывания, не выше;

6 – цвет, ед. ЦНТ, не более;

стабильность против окисления:

7 – приращение кислотного числа, $\text{мг КОН}/\text{г}$, не более ;

8 – приращение смол, %, не более.

Таблица 10.19

Показатель	И-Л-А-10 (И-8А)	И-ЛГ-А-15 (И-12А)	И-Г-А-32 (И-20А)	И-Г-А-46 (И-30А)	И-Г-А-68 (И-40А)
------------	--------------------	----------------------	---------------------	---------------------	---------------------

1	9...11	13...17	29...35	41...51	61...75
2	880	880	890	890	900
3	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05
4	150	165	200	210	220
5	-15	-30	-15	-15	-15
6	1,5	2,5	2,0	2,5	3,0
7	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4
8	1,5	1,5	2,0	3,0	3,0

10.3.1.4. Компрессорные масла

В зависимости от предъявляемых требований и областей применения компрессорные масла подразделяют на три класса: для поршневых и ротационных компрессоров, для турбокомпрессорных машин, для компрессоров холодильных машин.

Для поршневых и ротационных компрессоров. В этих компрессорах масло непосредственно контактирует со сжатым газом, имеющим высокую температуру. Эксплуатационные требования к компрессорному маслу в значительной степени определяются составом и свойством газа.

В соответствии с существующими нормами температура воздуха после каждой ступени сжатия воздушных компрессоров должна быть не более 170 °С для общепромышленных компрессоров и не выше 180 °С для компрессоров технологического назначения. Поэтому основные эксплуатационные требования, предъявляемые к компрессорным маслам, это их высокая термоокислительная стабильность и способность предотвращать коксообразование в нагнетательной линии компрессора. Образование этих твердых продуктов распада и уплотнение масла служат причиной пожаров в компрессорах.

Вязкость масла является основной характеристикой компрессорных масел. От вязкости зависят износ трущихся поверхностей деталей, потеря энергии на трение, уплотнение поршневых колец, длительность пуска компрессора, температура поверхностей трения. Образование коксовых отложений зависит как от термоокислительной стабильности, так и от вязкости масла. Маловязкое масло быстрее перемещается по нагнетательному тракту компрессора, благодаря чему в системе нагнетания меньше образуется отложений. Согласно правилам Международной ассоциации по стандартизации (ИСО), коксовые отложения следует своевременно удалять. Толщина слоя коксовых отложений между чистками нагнетательной системы должна быть не более 3 мм при давлении менее 1 МПа, 2 мм при 2...3 МПа и 1 мм при 3...5 МПа. Компрессорные масла делят на четыре группы:

1 – для компрессоров, работающих при умеренных режимах сжатия газа и температуре нагнетания ниже 160 °С;

- 2 – то же, при температуре нагнетания ниже 180 °С;
- 3 – для компрессоров, работающих в тяжелых условиях при температуре нагнетания выше 200 °С;
- 4 – для компрессоров высокого давления, работающих в особо тяжелых условиях при температуре нагнетания выше 200 °С.

Пример обозначения марки компрессорного масла К-19: К – компрессорное масло; 19 – кинематическая вязкость при 100 °С. Относится к первой группе. Группу масла указывают цифрой после буквы К, за исключением первой группы. В таблице 10.20 представлены основные показатели масел для воздушных компрессоров.

В таблице 10.20 приняты следующие обозначения показателей:

кинематическая вязкость, мм²/с:

1 – при 100 °С мм²/с,

2 – при 40 °С;

3 – индекс вязкости, не менее;

4 – кислотное число, мг КОН/г, не более;

температура, °С:

5 – вспышки в открытом тигле, не ниже;

6 – застывания, не выше;

содержание, %:

7 – водорастворимых кислот и щелочей,

8 – механических примесей,

9 – воды,

10 – серы,

11 – селективных растворителей;

12 – коксуемость, %, не более;

13 – зольность, %, не более;

стабильность против окисления, не более:

14 – осадок, %, (масс. доля),

15 – увеличение коксуемости, %,

16 – потери от испарения, %;

коррозия, г/см²:

17 – на пластинках из стали,

18 – на пластинках из свинца;

19 – плотность при 20 °С, кг/м³, не более.

Таблица 10.20

Показатель	Масла без присадок		Масла с присадками	
	К-19	КС-19	КЗ-10	КЗ-10Н
1	17...21	18...22	8,8...10,5	9...13
2	–	–	73,7...96,2	76...130
3	–	92	90	90

4	0,04	0,02	0,2	0,2
5	245	260	205	205
6	-5	-15	-10	-30
7	Отсутствие		-	-
8	0,07	Отсутствие	Отсутствие	
9	Отсутствие		Следы	
10	0,3	1,0	0,65	0,65
11	-	Отсутствие	-	-
12	0,5	0,5	0,2	0,2
13	0,01	0,005	0,005	0,005
14	0,015	Отсутствие	-	-
15	-	-	1,5	1,5
16	-	-	15	15
17	Выдерживает	-	Выдерживает	
18	-	10	-	-
19	-	905	900	900

Масло К-19 без присадок получают из малосернистых нефтей путем селективной очистки. Служит для смазывания поршневых компрессоров среднего и высокого давления, где требуются масла с низким содержанием серы.

Масло КС-19 без присадок вырабатывают из сернистых парафинистых нефтей методом селективной очистки. Применяют для поршневых компрессоров среднего и высокого давления.

Масло КС-19п содержит антиокислительную присадку "Ионол". Получают из сернистых парафинистых нефтей методом селективной очистки. Служит для смазывания поршневых компрессоров среднего и высокого давления.

Масло КЗ-10 содержит присадки, уменьшающие образование коксовых отложений в нагнетательной линии компрессора, а также повышающие антиокислительные, антикоррозионные, смазывающие и антипенные свойства масла. Предназначено для смазывания поршневых и ротационных компрессоров с температурой нагнетания до 200⁰С.

Масло КЗ-10Н получают по той же технологии, что и масло КЗ-10, дополнительно вводя депрессорную присадку с целью понижения температуры застывания масла. Обладает хорошими пусковыми свойствами при низких температурах окружающего воздуха. Предназначено для смазывания поршневых и ротационных компрессоров с температурой нагнетания до 200 °С.

Для компрессоров холодильных машин. В промышленности и сельском хозяйстве широко применяют различные холодильные установки, для компрессоров которых выпускают специальные масла.

Основные особенности условий работы этих масел: постоянный

контакт с холодильным агентом (фреоном, аммиаком, углекислотой); непрерывное изменение давления и температуры среды. Масла для холодильных установок должны обладать следующими свойствами: не реагировать с холодильным агентом, не вызывать коррозии цветных металлов, иметь пологую вязкостно-температурную кривую и низкую температуру застывания.

В герметичных неразборных агрегатах компрессоров холодильников применяют высокостабильные масла, работающие без замены весь период эксплуатации.

Наиболее часто используют маловязкие, глубоко очищенные нефтяные масла с антиокислительной присадкой и депрессорами, а также масла на синтетической основе.

Масла для компрессоров холодильных установок делят на две группы: ХА – для компрессоров, работающих на аммиаке или углекислоте; ХФ – для компрессоров, работающих на фреонах.

Для компрессоров холодильных машин выпускают масла: ХА-30 – смесь остаточного и дистиллятного минеральных масел; ХФ12-16 – минеральное масло с антиокислительной присадкой; ХФ22-24 – минеральное загущенное; ХФ22С-16 – синтетическое с антиокислительной присадкой. В таблице 10.21 даны основные показатели масел для компрессоров холодильных машин (ГОСТ 5546–86).

Таблица 10.21

Показатель	ХА-30	ХФ12-16	ХФ22-24	ХФ22С-16
1	≤150	≥17	–	–
2	28...32	≥16	24,5...28,4	≥16
3	0,05	0,02	0,04	0,35
4	185	174	130	225
5	–38	–42	–55	–58
6	0,004	–	–	–
7	0,02	0,005	–	0,02
8	0,5	0,04	–	0,4
9	–	1	–	–
10	Выдерживают			
11	Отсутствие	–	–	Отсутствие

В таблице 10.21 приняты следующие обозначения показателей:
 кинематическая вязкость, мм²/с:
 1 – при 20 °С,
 2 – при 50 °С;
 3 – кислотное число, мг КОН/г, не более;
 температура, °С:

- 4 – вспышки в открытом тигле, не ниже;
- 5 – застывания, не выше;
- содержание, %:
- 6 – зольность, %, не более;
- стабильность против окисления, не более:
- 7 – осадок, %, (масс. доля),
- 8 – кислотное число после испытания, мг КОН/г;
- 9 – цвет, ед. ЦНТ, не более;
- коррозия, г/см²:
- 10 – на пластинках из меди,
- 11 – на пластинках из стали.

Пример обозначения марки масла для компрессоров холодильных машин: ХА-30, где Х – холодильное, А – аммиак, 30 – кинематическая вязкость в мм²/с при 50 °С.

10.3.1.5. Электроизоляционные масла

Электроизоляционные масла, являясь жидкими диэлектриками, служат для изоляции токонесущих частей трансформаторов, конденсаторов, кабелей и т. п. Они также служат теплоотводящей средой и способствуют быстрому гашению электродуги в выключателях.

Электроизоляционные масла делят на: трансформаторные, конденсаторные и кабельные. В сельском хозяйстве, например, наиболее распространены трансформаторные масла, которые используют в сердечниках трансформаторов, реостатах, масляных выключателях.

Трансформаторное масло получают из малосернистых и сернистых парафиновых нефтей методом фенольной очистки с последующей низкотемпературной депарафинизацией. Тщательная очистка масла необходима для получения высоких диэлектрических свойств (высокое пробивное напряжение) и стабильности. Промышленность выпускает трансформаторные масла нескольких сортов, которые классифицируют по использованному сырью, способу получения и области применения.

Масло ТКп вырабатывают из малосернистых нефтей методом кислотно-щелочной очистки. Оно содержит присадку "Ионол". Кинематическая вязкость масла при 50 °С не более 9 сСт, температура застывания не выше –45 °С. Его рекомендуют использовать для оборудования напряжением до 500 кВ.

Масло селективной очистки получают из сернистых парафинистых нефтей фенольной очисткой. Вязкость масла при 50 °С не более 9 сСт, температура застывания не выше –45 °С. Его применяют для оборудования напряжением до 220 кВ.

Масло Т-1500У вырабатывают из сернистых парафинистых нефтей, вводя присадку "Ионол". При производстве используют процессы

селективной очистки и гидрирования. Вязкость масла при 50 °С не более 8 сСт, температура застывания не выше –45 °С. Оно предназначено для электрооборудования напряжением до 1500кВ.

Масло ГК получают гидрокрекингом из сернистых парафинистых нефтей, вводя присадку "Ионол". Масло обладает высокими диэлектрическими свойствами и стабильностью к окислению. Его применяют в электрооборудовании высшего класса.

9.3.1.6. Консервационные масла

В последнее время для внутренней защиты от коррозии металлических изделий взамен пластичных консервационных смазочных материалов используют консервационные масла (КМ). Они обладают лучшими антикоррозионными свойствами, а стоимость консервации и расконсервации техники во много раз меньше, чем при использовании обычных смазочных материалов.

Механизм защитного КМ основан на химическом взаимодействии антикоррозионных присадок (ингибиторов коррозии), входящих в состав масел, с поверхностью металла. При этом на поверхности образуются защитные пленки, которые препятствуют проникновению агрессивных веществ и влаги к металлу.

Различают три группы нефтепродуктов, предназначенных для защиты внутренних полостей агрегатов машин от коррозии:

- *консервационные масла* (например, К-17, НГ203Р), предназначенные для внутренней консервации двигателей и картеров трансмиссий на время хранения и транспортирования строительных машин и не пригодные для их эксплуатации;
- *консервационно-рабочие масла* (масла моторные, трансмиссионные и гидравлические с антикоррозионными присадками АКОР-1 и КП), предназначенные для той же цели, что и консервационные, и для одноразового использования при введении машин в эксплуатацию (до первой смены масла);
- *рабоче-консервационные масла* (М-43/8Грк и ТМ-5-12рк), содержащие антикоррозионные присадки, предназначенные для хранения, транспортирования и постоянной эксплуатации техники.

Консервационные масла наливают в картеры ДВС, трансмиссий и других механизмов, слив предварительно рабочие масла, и дают им проработать на холостом ходу (15...20 мин). В результате защитное масло должно присутствовать на всей поверхности зеркала цилиндров и других деталей. После этого консервационные масла сливают. Эксплуатировать технику, даже кратковременно, на консервационных маслах запрещено. Для ввода машины в эксплуатацию достаточно залить в ее картеры рабочие масла.

Консервационные масла (вязкие маслянистые жидкости) представляют собой смеси нефтяных масел с $\nu = 10 \dots 15 \text{ мм}^2/\text{с}$ для К-17 и для НГ203Р – $15 \dots 35 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$ с комплексом присадок и ингибиторов коррозии. Для получения консервационно-рабочих масел антикоррозионные присадки АКОР-1 и КП при $80 \dots 90 \text{ }^\circ\text{C}$ на местах эксплуатации техники смешивают с соответствующими рабочими маслами до образования однородной смеси. Обычно в моторные и трансмиссионные масла вводят 10 % присадки АКОР-1 или 20% присадки КП; в гидравлические масла присадку АКОР-1 вводят в концентрации 3...5 %. Присадки АКОР-1 и КП – это вязкие маслянистые жидкости с $\nu = 65$ и $25 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $100 \text{ }^\circ\text{C}$, которые изготовлены на базе моторных масел, обладающих антикоррозионными, моющими и антиокислительными свойствами. Приготовленные консервационно-рабочие масла заправляют в картеры агрегатов, после чего они должны проработать в течение 10 мин. Эти масла могут быть оставлены в картерах на период хранения (до трех лет), эксплуатация техники на них разрешена до первой смены масел после определенной наработки.

Рабоче-консервационные масла по сравнению с рабочими и консервационными маслами обладают лучшими коррозионноизносными характеристиками, они превосходят по защитным свойствам консервационно-рабочие масла. К рабоче-консервационным маслам относится единое для карбюраторных и дизельных двигателей всесезонное масло М-4з/8Грк на полусинтетической основе. Масло содержит комплекс присадок, присущих моторным маслам класса 4з/8, а также маслорастворимый ингибитор коррозии. Масло применяется как в районах умеренного, так и холодного климата. ТМ-5-12рк – единое всесезонное трансмиссионное масло для автомобилей различных типов. Оно обладает высокими функциональными и защитными свойствами.

Применение масел возможно при постоянной и периодической эксплуатации, а также при хранении техники сроком до 3,5 года.

Аналогичные, а в ряде случаев более унифицированные рабоче-консервационные масла выпускаются зарубежными производителями. Например, компания Shell поставляет единое масло с $\nu = 94 \text{ мм}^2/\text{с}$ при $40 \text{ }^\circ\text{C}$ для консервации как двигателей, так и агрегатов механической трансмиссии.

11. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ

Рабочим телом для гидромеханических передач и гидравлических систем являются легкоподвижные и практически несжимаемые жидкости. Они работают в очень тяжелых условиях – при температуре от $+70$ до $-40 \text{ }^\circ\text{C}$, давлении до 10 МПа в контакте с деталями, выполненными из различных материалов. Поэтому к рабочим жидкостям предъявляются особые требования.

10.1. Масла для гидромеханических передач (ГМП)

Масла для гидромеханических передач (состоящих из разнородных агрегатов: гидротрансформатора, фрикционных дисков системы переключения передач и планетарной коробки перемены передач) помимо своего основного назначения (смазки зубчатых колес и фрикционных дисков сцепления) являются еще и рабочими жидкостями гидротрансформатора. Такие конструктивные особенности ГМП предъявляют сложные и противоречивые требования к характеристикам масел.

Их выпускают по техническим условиям (ТУ) отечественные предприятия из маловязких фракций сернистых парафинистых нефтей путем глубокой очистки и загущения их вязкостными полимерными присадками. Кроме того, для удовлетворения противоречивых требований к свойствам масел в процессе работы ГМП к ним добавляется комплекс функциональных присадок, среди которых особое место занимают фрикционные, моющие, противозадирные и противоизносные, антиокислительные и антипенные.

Фрикционные свойства масла определяются процессами трения покоя и движения фрикционных дисков сцепления, находящихся в масле и применяемых для включения шестерен. При плохих фрикционных свойствах масла в моменты переключения скоростей может происходить проскальзывания дисков. Эти свойства оцениваются соотношением коэффициентов статического $f_{ст}$ и динамического трения $f_{д}$ ($f_{ст}: f_{д} > 1,0$).

Однако масла с фрикционными присадками типа АДТФ вызывают значительные потери энергии на преодоление трения в других агрегатах ГМП.

Условия работы гидротрансформаторов (обеспечение высоких скоростей потоков масла (до 100 м/с) с целью повышения КПД и обеспечения работы при низких температурах) требуют минимальной вязкости масла ($\nu = 6...7 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 100 °С). Но это негативно может сказаться на работе зубчатых передач. Опасность устраняется введением в масло противоизносных и противозадирных присадок, улучшающих их смазывающую способность. Несмотря на антиокислительный потенциал, придаваемый маслу присадками, в нем при воздействии повышенных рабочих температур со временем начинают накапливаться продукты окисления, которые могут "засаливать" фрикционные диски сцепления. Чтобы этого не происходило, в масло вводят моющие присадки, которые препятствуют агрегированию частичек окисленных продуктов и отложению их на трущихся поверхностях.

В РФ выпускаются две марки минеральных масел (А и МГТ). Масла работоспособны соответственно для районов умеренного и холодного климата. Индекс вязкости МГТ составляет не менее 175.

Масла для ГМП зарубежных производителей не имеют специфици-

каций типа SAE и API. Они классифицируются только по требованиям производителей ГМП. Наибольшее распространение получили спецификации Dexron (General Motors) и Mercon (Ford). Выпускаются масла минерального, синтетического и полусинтетического происхождения.

Вязкость их по требованиям производителей строительной техники колеблется в пределах $\nu = 6...10 \text{ мм}^2/\text{с}$ при 100°C . Индекс вязкости $95 < \text{HV} < 250$. Нижний температурный предел работоспособности достигает -50°C . В целях идентификации и скорейшего обнаружения протечек масла в ГМП их окрашивают в красный цвет. Масла обладают в процессе работы стабильными характеристиками трения, высокими противоизносными свойствами и термоокислительной стабильностью за счет введения композиции присадок. Выпускаются масла как для автоматических переключаемых передач, так и с ручным приводом переключения. По своим физико-химическим характеристикам масла марок А и МГТ примерно соответствуют характеристикам зарубежных производителей на последнюю четверть XX в. Масло А соответствует требованиям Type A, а МГТ – Dexron II фирмы GM.

В настоящее время зарубежные масла для ГМП соответствуют более высоким требованиям, отраженным, например, в спецификации Dexron III и ее последующих версиях. В них, например, температура вспышки нормируется на уровне не ниже $180...190^\circ$, а у МГТ – 160° . По нормам Dexron III при 95° должна отсутствовать пена в масле гидротрансформатора, а по ТУ на МГТ содержание пены допускается до 100 см^3 .

11.2. Рабочие жидкости для гидравлических систем

Рабочие жидкости для гидравлических систем подразделяются на минеральные и синтетические. По назначению их делят в соответствии с областью применения:

- для гидравлических систем мобильной наземной техники;
- для гидротормозных и амортизационных устройств пневмоколесных строительных машин и автомобилей;
- для гидросистем летательных аппаратов и другой техники.

11.2.1. Гидравлические масла (ГМ)

Здесь рассматриваются рабочие жидкости для гидравлических систем мобильной техники (строительные машины на специальном шасси, на базе грузовых автомобилей и тракторов), которые называют гидравлическими маслами. Большинство строительных машин имеют гидропривод своих рабочих органов и механизмов передвижения.

Основная функция гидрожидкости – рабочее тело для передачи механической энергии от источника (гидронасоса) до потребителя (гидродвигателей). Так как она практически несжимаема, то происходит быстрая передача усилия на большие расстояния. Кроме этого, гидрожидкости выполняют роль масел, так как предохраняют трущиеся сопряжения от износа, отводят избыточную теплоту, очищают детали от накапливающихся продуктов износа, загрязнений и осадков.

Условия работы масел в гидросистемах тяжелые: большие перепады температур (от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ с началом холодного пуска и до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ в установившихся режимах работы); высокие перепады давления (от 0,1 до 50 МПа). При таких режимах эксплуатации масла (особенно минеральные, а в РФ преимущественно они изготавливаются) окисляются, соприкасаясь с цветными и черными металлами.

Для обеспечения надежной и долговечной работы гидросистем к гидромаслам предъявляют определенные требования. Они должны иметь температуру застывания на $10\dots15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже температуры окружающего воздуха, при которой начинает работать гидросистема без разрыва потока жидкости на входе в насос. В системе не должны образовываться паровые пробки (пузырьки газа будут сжиматься под давлением, поэтому исполнительные механизмы либо не будут срабатывать, либо будут срабатывать с большим запаздыванием). Поэтому гидромасла должны иметь температуру испарения на $20\dots30\text{ }^{\circ}\text{C}$ выше рабочих температур, так как выделяемые из масла газообразные продукты вместе с засасываемым атмосферным воздухом образуют при работе гидросистемы пену.

Кроме явления кавитации (образование полостей в потоке жидкости, заполненных воздухом) повышенная аэрация (насыщение гидрожидкости воздухом) приведёт еще к ряду отрицательных последствий, например: окисление масел, уменьшение его смазочных свойств, снижение производительности и ресурса насоса.

Вязкость гидрожидкостей должна быть невысокой, чтобы обеспечить малые потери мощности на трение. В то же время она должна быть достаточной для обеспечения плавности хода элементов гидропривода, предотвращения износа трущихся деталей и снижения потерь жидкости через подвижные соединения и уплотнения (особенно при высоких давлениях и температурах). Поэтому наибольшая допустимая вязкость гидрожидкости определяется по ее прокачиваемости насосом при температуре $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (обычно она не превышает $1500\text{ мм}^2/\text{с}$ для зимних сортов).

Установлено, что для отечественных гидроприводов мобильных строительных машин минимально допустимая кинематическая вязкость рабочей жидкости не должна быть ниже 15 для шестеренных, 12 для пластинчатых и $10\text{ мм}^2/\text{с}$ для поршневых насосов при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Гидравлические минеральные масла отечественного производства

обладают высоким индексом вязкости не менее 80 – нижний порог для незагущенных масел и до 180 – для всесезонных масел, используемых на Севере, и зимних для районов средней полосы.

Гидравлические масла минерального происхождения вырабатывают на основе хорошо очищенных после перегонки рядовых или легких фракций нефти определенного углеводородного состава или на базе индустриальных масел. Физико-химические и эксплуатационные свойства гидравлических масел улучшаются при введении в них функциональных присадок: антиокислительных, антикоррозионных, противоизносных, антипенных и др.

Стабильность против окисления жидкости при повышенных температуре и давлении, воздействии кислорода воздуха при аэрации и контакте с материалами гидросистемы оценивается *кислотным числом* (КЧ). В гидромаслах для строительных машин значения КЧ находятся в пределах 0,03...0,15.

Для отдельных марок (особо качественных, с загущающей присадкой гидромасел, работающих в особо холодных условиях эксплуатации, включая условия Арктики) в число нормируемых показателей стабильности входит значение вязкости ν (мм²/с) после окисления. Антиокислительные и антикоррозионные присадки обеспечивают способность гидромасел сохранять рабочее состояние в течение заданного времени.

В процессе эксплуатации строительных машин в гидросистему может попасть вода (конденсат из-за неплотностей и др. причин). Вода в масле стимулирует коррозионную активность находящихся в нем органических кислот и вымывает присадки из масла, способствуя тем самым потере заложенных в масло качеств. В зимний период эксплуатации замерзшие объемы воды могут привести к полной остановке работы гидросистемы.

Стойкость рабочей жидкости к образованию эмульсии (частицы воды, не растворенные в масле) характеризуется способностью ее расслаиваться и отделяться от попавшей в нее воды. Далее отделившуюся воду необходимо дренировать из гидросистемы. С этой целью в гидрожидкость вводят спецвещества – деэмульгаторы, разрушающие масляные эмульсии и предотвращающие смешивание гидромасел с водой.

Наличие в гидрожидкостях воздуха и воды ускоряет процесс пенообразования, из-за которого масла интенсивно окисляются, ухудшаются их охлаждающие свойства, увеличиваются потери через зазоры.

Антипенные присадки предотвращают вспенивание масел за счет снижения поверхностного натяжения, вследствие чего образующиеся воздушные пузырьки легко лопаются.

Смазывающие свойства гидрожидкости обусловлены ее вязкостью, так как большинство элементов гидросистемы смазываются в гидродинамическом режиме работы. Масла большой вязкости обеспечивают более высокую прочность масляной пленки при сдвиге и

износостойкость, чем маловязкие масла. Но это ведет к излишним затратам энергии на преодоление сил трения. Подбор масел по вязкостному уровню всегда представляет собой некоторый компромисс.

Обеспечение противоречивых требований к смазывающим свойствам гидромасел требует применения маловязких масел, загущенных полимерными присадками высокого качества, обладающими устойчивостью к деструкции (разрушение молекул полимера под действием сдвиговых нагрузок). При разрушении некачественных полимеров масло не в состоянии обеспечивать надлежащий индекс вязкости, что приводит к усиленному изнашиванию и отказам элементов гидропривода в условиях работы при повышенной температуре.

Улучшение *противоизносных свойств* гидромасел достигается добавлением соответствующих присадок, которые уменьшают износ трущихся металлических поверхностей. При этом обеспечиваются небольшие объемные потери в гидроприводе через зазоры между сопряженными поверхностями. Уменьшение протечек является важнейшим требованием, предъявляемым к рабочим жидкостям.

К этим же требованиям относится совместимость масла с материалами уплотнений манжет и прокладок из резины или других материалов. Небольшое набухание до 5...7% допустимо для их применения. Усыхание или большее набухание неизбежно ведет к возникновению утечек в гидросистеме.

Отказы в работе гидропривода из-за ухудшения эксплуатационных свойств гидрожидкости в основном (до 80%) вызвано загрязнением масла. Продуктами загрязнения могут быть частицы износа металлических деталей, пыль, грязь при заправке и другие инородные частицы, осевшие в фильтрах и баках.

В НТД на новые масла регламентируется отсутствие механических примесей и воды при производстве масел. В процессе эксплуатации необходимо периодически удалять эти накапливающиеся вещества из масел.

11.2.1.1. Классификация и обозначения ГМ

Система классификации и обозначения минеральных гидравлических масел, применяемых в гидростатических приводах мобильной наземной техники, эксплуатируемой на открытом воздухе, установлена в ГОСТ 17479.3-85.

В зависимости от величин кинематической вязкости при 40 °С гидравлические масла делят на 10 классов (таблица 11.1), а по эксплуатационным свойствам – на 3 группы (таблица 11.2).

В масла всех этих групп могут вводиться загущающие (вязкостные) и антипенные присадки.

Таблица 11.1

Класс вязкости	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм /с	Класс вязкости	Кинематическая вязкость при 40 °С, мм /с
5	4,14...5,06	32	28,8...35,2
7	6,12...7,48	46	41,4...50,6
10	9,0...11,0	68	61,2...74,8
15	13,5...16,5	100	90,0...110,0
22	19,8...24,2	150	135,0...165,0

Таблица 11.2

Группа масел	Состав масел	Рекомендуемая область применения
А	Минеральные масла без присадок	Гидросистемы с шестеренными и поршневыми насосами, работающими при давлении до 15 МПа и температуре масла в объеме полостей системы до 80 °С
Б	Минеральные масла с антиокислительными и антикоррозионными присадками	Гидросистемы с насосами всех типов, работающие при давлении до 25 МПа и температуре масла в объеме более 80 °С
В	Минеральные масла с антиокислительными, антикоррозионными и противоизносными присадками	Гидросистемы с насосами всех типов, работающие при давлении свыше 25 МПа и температуре масла в объеме более 90 °С

Обозначение минеральных масел состоит из букв МГ (минеральное гидравлическое); цифр, характеризующих класс кинематической вязкости; буквы, указывающей на принадлежность масла к группе по эксплуатационным свойствам. Пример: МГ-15-В – минеральное гидравлическое масло, класс вязкости 15, группа В по эксплуатационным свойствам.

В таблице 11.3 приведено соответствие продуктов действующего ассортимента минеральных гидромасел, выпускаемых нефтеперерабатывающими предприятиями по разным НТД и по ГОСТ 17479.3-85.

По уровню вязкости гидромасла классифицируют на маловязкие (классы вязкости 5, 7, 10); средневязкие (классы вязкости 15, 22, 32); вязкие (классы вязкости 46, 68, 100, 150).

Средневязкое масло АУ (веретенное) – это хорошо очищенное от

парафинов нефтяное масло без присадок. Применяют его в гидросистемах в диапазоне температур -30.. 90 °С.

Масло АУП – получают добавлением в масло АУ антиокислительной и антикоррозионной присадок. Работоспособно в температурном диапазоне – 35... 100 °С.

Средневязкое масло ЭШ – хорошо очищенное от парафинов масло с добавлением загущающих и депрессорных присадок. Применяют его в гидросистемах шагающих экскаваторов. Работоспособно при давлении до 15 МПа и в интервале температур –45... 100 °С.

Таблица 11.3

Обозначение по ГОСТ 17479.3-85	Существующие обозначения по НТД
МГ-22-А	АУ
МГ-32-А	ЭШ
МГ-5-Б	МГЕ-4А
МГ-15-Б	АМГ-10
МГ-22-Б	АУП
МГ-46-Б	МГ-30
МГ-15-В	ВМГЗ
МГ-15-В	МГЕ-10А
МГ-22-В	Р
МГ-46-В	МГЕ-46В

Средневязкое масло Р – получают добавлением в масло АУ моющей, противоизносной, антиокислительной и антипенной присадок. Применяют его для гидроусилителей рулевого управления грузовых автомобилей. Работоспособно в диапазоне температур –35... 125 °С.

Маловязкое масло МГЕ-4А – глубокоочищенная легкая фракция малопарафинистой нефти с загущающей, антиокислительной и антикоррозионной присадками. Применяется в гидросистемах наземной техники в особо холодных условиях эксплуатации, включая условия Арктики.

Средневязкие масла МГЕ-10А и АМГ-10 – получают на основе низкозастывающей маловязкой нефти с добавлением загущающей, антиокислительной, антикоррозионной и противоизносной присадок для масла МГЕ-10А и загущающей и антиокислительной присадок для масла АМГ-10. Применяются в гидросистемах наземной техники в районах Крайнего Севера; работоспособны в диапазоне температур: для МГЕ-10А: – 60.. 70 °С, а для АМГ: –60.. 55 °С.

Средневязкое масло ВМГЗ – является основным ГМ для всех типов гидроприводов строительных машин. Работоспособно при давлениях 40...50

МПа. Предназначено для всесезонной эксплуатации в холодной климатической зоне, а также в качестве сезонного зимнего сорта в районах умеренного климата в интервале температур $-50...70^{\circ}\text{C}$. Срок эксплуатации ВМГЗ без замены доходит до 4000 ч работы, т.е. в 2...3 раза превышает срок эксплуатации перечисленных выше неспециальных масел. Получают ВМГЗ на основе глубокоочищенной маловязкой низкозастывающей нефти с добавлением вязкостной полимерной, противоизносной, антиокислительной, антикоррозионной, антипенной и депрессорной присадок.

Вязкое масло МГ-30 – предназначено для применения в гидростатических гидроприводах строительных машин в качестве летнего сорта в районах умеренного климата и всесезонного сорта в южных районах страны в интервале температур $-20...75^{\circ}\text{C}$. Масло получают на базе индустриального И-30 с введением антиокислительной, депрессорной и антипенной присадок. Ресурс работоспособности МГ-30 такой же, как и у ВМГЗ, что позволяет заменить все другие сорта неспециальных масел.

Вязкое масло МГЕ-46В – изготавливают на базе индустриальных масел с антиокислительной, противоизносной, депрессорной и антипенной присадками. Применяют в гидросистемах комбайнов и тракторов, работающих при давлении до 35 МПа. Работоспособно в диапазоне температур от -10 до 80°C . Ресурс работы в гидроприводах с аксиально-поршневыми гидроагрегатами достигает 2500 ч.

Строительная техника, созданная на базе тракторов, часто используется в отдаленных местах, где нет условий для бесперебойной доставки и хранения большого ассортимента масел.

Разработчики техники, учитывая эти обстоятельства, а также требования к чистоте гидрожидкостей, которые для шестеренных насосов (гидроприводы навесных агрегатов тракторов) гораздо ниже, чем для аксиально-поршневых гидронасосов, рекомендуют использовать для первых моторные масла группы В. Высококачественные масла группы Г и выше разрешено применять только для двигателей.

В дальнейшем это обусловило создание специальной группы масел – это *универсальные тракторные масла*. У Российской Федерации выпускаются для промышленных гусеничных тракторов две марки моторно-трансмиссионно-гидравлических масел: МТ-4₃/8ДС (полностью синтетическое северное) и МТ-5₃/10Д (минеральное для работы в умеренных климатических условиях).

Масла эти всесезонные с вязкостью, указанной в маркировке, температурами застывания соответственно -55 и -40°C . Вязкостно-температурные характеристики обеспечивают легкий пуск двигателя и высокое быстродействие гидросистемы в условиях низких температур, а также хорошую работу при высоких температурах.

Применение этих масел в 3 раза сокращает потребный ассортимент и исключает возможность смешивания разнородных видов масел как в

процессе заправки, так и при работе машины. В ряде конструкций тракторов картеры двигателя или КПП и насоса разделены только резиновым сальником, при износе или разрушении которого произойдет перемешивание масел и гидрожидкости.

Зарубежные гидравлические масла выпускаются на основе международного стандарта ISO (Международная организация стандартизации). Классы вязкости по ISO 3448 соответствуют стандарту ГОСТ 17479.3-85.

По эксплуатационным свойствам они делятся на 4 группы. В таблица 11.4 представлено соответствие обозначений групп масел стандарта ISO 6074 и ГОСТ РФ.

Таблица 11.4

Группа по ГОСТ РФ	Группа по ISO
А	НН
Б	НL
В	НМ
Масла группы В с загущающей полимерной присадкой	НV

Гидравлические масла выпускаются зарубежными компаниями для мобильной техники как на минеральной, так и синтетической основе для всех типов насосов и моторов, работающих с высоким давлением и в большом диапазоне температур окружающей среды. Масла имеют значения ИВ от 100 до 360.

Кроме этого, многими компаниями выпускаются биоразлагаемые масла для гидравлических систем, которые используются для соблюдения требований нормативных актов в отношении охраны окружающей среды. Выпуск таких масел актуален в связи с тем, что строительные машины, особенно больших параметров, имеют большие объемы заправляемой рабочей жидкости в гидросистему (несколько сот литров). При использовании обычных масел в случае аварии это может привести к тяжелой экологической ситуации.

Биоразлагаемые масла вязкостью 32, 46, 68 классов создаются из синтетических продуктов (полигликоли, сложные эфиры или полиальфаолефины) или растительного масла с композицией высокоэффективных присадок с ИВ до 200 и температурой застывания в диапазоне от -40 до -60 °С.

Биомасло быстро разлагается (согласно нормам более 80% объема за 14 дней), не загрязняя при этом ни воду, ни почву.

Зарубежные производители смазочных продуктов также выпускают универсальные тракторные масла (УТМ), однако их ассортимент гораздо шире. Они разбиты по назначению на ряд основных групп.

Группа STOU (Super Tractor Oil Universal) применяется в качестве моторного, трансмиссионного (все виды трансмиссий, включая ГМТ) и гидравлического масел.

Группа UTTO (Universal Tractor Transmission Oil) применяется в качестве трансмиссионного (все виды трансмиссий) и гидравлического масел.

Применение УТМ регламентировано спецификациями фирм-производителей строительной техники. Так, масла группы STOU не могут применяться для двухтактных дизелей, где масло перемешивается с топливом, и в гипоидных передачах. УТМ могут быть как минерального, так и синтетического происхождения.

Они маркируются по принадлежности к группе (STOU, UTTO и т.д.), по вязкости в соответствии с классификацией SAE: SAE 5W-30; SAE 10W-30; SAE 10W-40; SAE 15W-40 и по эксплуатационным свойствам по классификации API: CF-4 и GL-4.

Таким образом, состав базовых масел и присадок должен соответствовать условиям применения указанных групп как для дизелей, так и для трансмиссий.

В качестве гидравлического масла УТМ соответствуют стандарту ISO по вязкости классам 22...100 и принадлежат по группе эксплуатационных свойств HLR.

Группа HLR обладает теми же свойствами, что и базовая HL, за исключением того, что в нее добавляют противоизносные присадки.

11.3. Тормозные жидкости

Тормозные жидкости (ТЖ) используют в гидравлическом приводе тормозных устройств для передачи энергии тормозным цилиндрам. При торможении кинематическая энергия при трении превращается в тепловую. Освобождается большое количество теплоты, которое зависит от массы и скорости машины. Известно, что температура жидкости в гидроприводе тормозов грузового автомобиля обычно не превышает 100 °С.

В условиях интенсивного торможения, например на горных дорогах, температура может подняться до 120 °С и выше. Высокие температуры в тормозах и гигроскопичность жидкости представляют наибольшую опасность для работы тормозов из-за образования в жидкости пузырьков газа и пара, если температура приблизится к температуре кипения самой жидкости. При нажатии на педаль тормоза не обеспечивается необходимое тормозное давление из-за наличия в системе паровых пробок.

К тормозным жидкостям предъявляются следующие требования.

Температура кипения – это важнейший показатель, определяющий предельно допустимую рабочую температуру гидропривода тормозов. Для

большей части современных тормозных жидкостей температура кипения в процессе эксплуатации снижается из-за их высокой гигроскопичности. К этому приводит попадание воды, главным образом за счет конденсации из воздуха. Поэтому наряду с температурой кипения "сухой" тормозной жидкости определяют температуру кипения "увлажненной" жидкости, содержащей 3,5% воды.

Согласно требованиям международных стандартов DOT температура кипения "сухой" и "увлажненной" тормозных жидкостей должна иметь значения, согласно DOT-3, не менее 205 и 140 °С – для тихоходных автомобилей при обычных условиях эксплуатации и не менее 230 и 155 °С – для быстроходных автомобилей, эксплуатирующихся на режимах с повышенными скоростями или с частыми и интенсивными торможениями, например, на горных дорогах согласно DOT-4.

Вязкостно-температурные свойства. Процесс торможения длится обычно несколько секунд, а в экстренных условиях – доли секунды. Поэтому необходимо, чтобы сила, прилагаемая водителем к педали тормоза, с помощью рабочей жидкости быстро передавалась на колесные тормоза.

Это обеспечивается необходимой текучестью жидкости и определяется максимально допустимой вязкостью при температуре –40 °С: не более 1500 – для жидкостей общего назначения и не более 1700 мм²/с – для высокотемпературных жидкостей. Жидкости для Севера должны иметь вязкость не более 1500 мм²/с при –55 °С.

Антикоррозионные свойства. Для предотвращения коррозии жидкости должны содержать ингибиторы, защищающие стальные и цветные металлы от коррозии. Эффективность ингибиторов оценивается по изменению массы и состоянию поверхности пластин из указанных металлов после их выдерживания в тормозной жидкости, содержащей 3,5% воды, в течение 120 ч при 100 °С.

Совместимость с резиновыми уплотнениями. Для обеспечения герметичности гидросистемы на поршни и цилиндры ставят резиновые уплотнительные манжеты. Необходимое уплотнение обеспечивается, когда под воздействием тормозной жидкости манжеты несколько набухают и их уплотнительные кромки плотно прилегают к стенкам цилиндра. При этом недопустимо как слишком сильное набухание манжет, так как может произойти их разрушение при перемещении поршней, так и усадка манжет, чтобы не допустить утечки жидкости из системы.

Смазывающие свойства. Влияние жидкости на износ рабочих поверхностей тормозных поршней, цилиндров, манжетных уплотнений определяется ее смазывающими свойствами, которые проверяются при стендовых испытаниях, имитирующих работу гидропривода тормозов в тяжелых условиях эксплуатации.

Химическая и физическая стабильность. Тормозные жидкости в

интервале рабочих температур от -50 до 150 °С должны сохранять исходные показатели, т.е. противостоять окислению и расслаиванию, образованию осадков и отложений на деталях гидропривода тормозов.

Одной из наиболее важных и отличительных характеристик ТЖ, применяемых всесезонно, является показатель морозостойкости (стабильность на холоде). По этому показателю регламентируют выдержку ТЖ в течение определенного времени (до 6 ч) и при температуре -50 °С без заметного расслоения.

Основные ТЖ получают на базе растительных масел (чаще касторового) или гликолей (двухатомных спиртов). При использовании растительных масел вторым компонентом является спирт, как правило, бутиловый. С целью экономии потребления натуральных жиров стремятся снизить долю касторового масла в некоторых рецептурах ТЖ. При этом для сохранения вязкости вводят загущающие присадки.

В умеренном климате (температура воздуха не ниже -17 °С) рекомендуется использовать *жидкость БСК* – смесь равных частей касторового масла и бутилового спирта. При более низких температурах жидкость БСК из-за интенсивной кристаллизации начинает переходить в твердую фазу. Температура кипения достигает 115 °С.

Улучшенные эксплуатационные свойства (надежная работа тормозных систем в интервале температур воздуха от -50 до 50 °С, противоизносные и защитные характеристики) у *жидкостей ГТЖ-22М* и *"Томь"* на основе гликолей с комплексом присадок (вязкостные, противоизносные, антикоррозионные и др.). Они имеют хорошие вязкостно-температурные свойства (прокачиваемость). Кинематическая вязкость при 100 °С равна 2 мм²/с, при 40 °С равна 1500 мм²/с. Температуры кипения "сухой" жидкости соответственно равны 190 и 205 °С.

Высокие эксплуатационные свойства (в частности, высокотемпературные) имеет жидкость *"Роса"*, представляющая собой композицию боросодержащих веществ и непредельных углеводов (алкинов), в которую введены антиокислительная и антикоррозионная присадки. "Роса" имеет такие же вязкостно-температурные характеристики, что и жидкости ГТЖ-22М и "Томь", но превосходит их по температуре кипения "сухой" жидкости, которая не ниже 260 °С. Температура "увлажненной" жидкости "Роса" достигает значения не ниже 155 °С, в чем она превосходит все остальные ТЖ, выпускаемые в России. ТЖ "Роса" примерно соответствует нормам DOT-4 по обеспечению работоспособности тормозной системы в диапазоне температур от $С 55$ до 150 °С. Требования DOT-3 и 4 разработаны Министерством транспорта США (Department of Transportation).

11.4. Амортизационные жидкости

Ходовая система пневмоколесного шасси включает в себя подвеску

колес, которая у скоростных машин является упругой (рессорной). Для уменьшения амплитуды колебаний при движении машины по неровной поверхности используются гидравлические амортизаторы, которые закрепляются в кронштейнах рамы и рессоры.

Гидроамортизаторы телескопического типа представляют собой гидроцилиндр двухстороннего действия, заполненный амортизационной жидкостью (АЖ), которая является рабочим телом и служит для поглощения кинетической энергии колебаний шасси машины.

АЖ должны иметь хорошие смазывающие и вязкостно-температурные характеристики при положительных и отрицательных температурах, а также высокую термоокислительную и механическую стабильность. Последние свойства связаны с бессменной длительной работой амортизатора (до 100 тыс. км пробега машины), подвергаясь значительному механическому и термическому воздействию при многократном (десятки миллионов циклов) истечении под давлением через отверстия клапанов и дросселей.

Высокие требования предъявляются к вязкости амортизационных жидкостей при отрицательных температурах. Например, при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ вязкость не должна превышать 1000 сСт. При более высокой вязкости работа амортизаторов резко ухудшается и происходит блокировка подвески. Обеспечить требуемую вязкость (при температурах ниже $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$) могут лишь амортизационные жидкости на синтетической основе. Применяется в температурном диапазоне от -50 до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидкость АЖ-12Т, которая представляет собой смесь маловязкого минерального масла, полиэтилсилоксановой жидкости и кремнийорганических соединений с добавлением противоизносной и антиокислительной присадок. Жидкость МПП-10 используется всесезонно в районах умеренного климата. Температура застывания до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$. МПП-10 является смесью трансформаторного масла, полиэтилсилоксановой жидкости и животного жира с добавлением противоизносной и антиокислительной присадок. Высокими эксплуатационными свойствами обладает АЖ-170, которая может работать всесезонно в арктических районах. Температурный диапазон от -60 до $130\text{ }^{\circ}\text{C}$. АЖ-170 представляет из себя композицию полиэтилсилоксанов с хорошо очищенным маловязким минеральным маслом.

11.5. Пусковые жидкости

При низких температурах воздуха (ниже $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) применяют для облегчения запуска двигателей пусковые (легковоспламеняющиеся) жидкости. Они могут: хорошо испаряться при низкой температуре и быстро воспламеняться от искры или самовоспламеняться от сжатия; они имеют высокие антикоррозионные и противоизносные свойства, низкую температу-

ру застывания.

Промышленностью выпускаются два вида жидкостей: "Холод Д-40" для дизелей и "Арктика" для карбюраторных двигателей, обеспечивающих холодный пуск до пусковых 40 °С. В таблице 11.5 представлены составляющие их компоненты (в %-ном соотношении).

Таблица 11.5

Компоненты	"Холод Д-40"	"Арктика"
Этиловый эфир	60	45...60
Газовый бензин или петролейный эфир	15	35...55
Изопропилнитрат	15	До 5
Масло турбинное с противоизносными и противозадирными присадками	10	2

Применение для пуска чистого эфира недопустимо, так как в этом случае скорость нарастания давления в цилиндрах двигателя (жесткость) очень велика. Для уменьшения жесткости работы двигателя в пусковую жидкость вводят дополнительные составляющие (таблица 40). Тогда воспламенение компонентов смеси происходит в следующей последовательности: этиловый эфир, изопропилнитрат, петролейный эфир или газовый бензин, а затем основное топливо.

Эфир обладает невысокой температурой самовоспламенения. При низкой температуре окружающего воздуха (невысокая температура в камере сгорания в конце такта сжатия дизеля) этиловый эфир позволяет обеспечить самовоспламенение смеси при 190...220 °С. В карбюраторных двигателях эфир позволяет воспламенять очень бедные смеси. Добавление к пусковой жидкости для дизелей петролейного эфира и изопропилнитрата ускоряет самовоспламенение и сгорание основного топлива.

В пусковой жидкости "Арктика" для карбюраторных двигателей небольшое количество изопропилнитрата ускоряет подготовку эфира и газового бензина к воспламенению от искры, а газовый бензин обеспечивает плавный переход к работе на основном топливе. Масло добавляют для снижения износа двигателя в период пуска. В жидкости "Арктика" содержание масла невелико во избежание ухудшения работоспособности свечей зажигания из-за замасливания электродов.

Пусковые жидкости поставляются в аэрозольной упаковке вместимостью до 50 мл, а также в алюминиевых баллонах до 500 мл. Для введения жидкости в камеру сгорания устанавливаются форсунки на впускном трубопроводе двигателей. При нажатии на распылительную головку (вручную на аэрозольных ампулах или с помощью механизмов для баллонов) пусковая жидкость по трубопроводу подается к форсунке, а оттуда она поступает во впускной коллектор и, смешиваясь с засасываемым воздухом, а затем с топливом в камере сгорания, образует низковоспламеняющуюся

смесь. Применение пусковых жидкостей сокращает длительность пуска и повышает долговечность работы двигателей в зимнее время по сравнению с пуском их без применения таких средств.

11.6. Охлаждающие жидкости

В наше время ДВС, применяемые в приводах строительных машин, в основном имеют жидкостное охлаждение, которое поглощает и отводит до 30% тепловой энергии. Охлаждающие жидкости (ОЖ) выполняют важную роль в поддержании оптимального температурного режима и обеспечении долговечности двигателя.

Во время работы двигателя циркуляция ОЖ в системе охлаждения создается центробежным насосом, а оптимальный температурный режим в пределах 95 °С поддерживается термостатом, радиатором и вентилятором.

Ассортимент ОЖ включает в себя воду и антифризионные низкотемпературные жидкости при отрицательных температурах воздуха. Наиболее распространенной ОЖ до появления антифризов была вода. В регионах, где температура зимой не опускается ниже нуля, или в теплое время года вода нормально работает и в наше время. Она имеет преимущества: высокая теплоемкость (при $t = 20\text{ °C}$ – 4,2 кДж/кг·°C) и теплопроводность; дешевизна; доступность; безвредность и пожарная безопасность. В то же время у нее есть и существенные недостатки: относительно низкая температура кипения (100 °C); высокая температура замерзания (уже при 0° начинается кристаллизация и увеличение объема, а при отрицательных температурах образующийся лед может привести к разрушению головки блока цилиндров и радиатора); способность к образованию в системе охлаждения накипи (отложения солей на стенках рубашки двигателя ухудшают теплопроводность в 10-15 раз по сравнению с металлами и увеличивают расход топлива на 30 % при толщине слоя накипи 6 мм), а в некоторых случаях растворенные в воде соли могут вызвать коррозию стальных и чугунных деталей двигателя.

Последние два недостатка можно устранить, применяя дистиллированную воду или воду с антинакипинами – специальными добавками, препятствующими образованию накипи. Однако понизить температуру застывания и повысить температуру кипения воды при помощи добавок очень сложно и дорого. Поэтому вместо этого в последние годы широко начали использоваться антифризы.

По составу антифризы можно разделить на следующие типы: этиленгликолевые, водно-глицериновые, водно-спиртовые, солевые. Лучшими и наиболее распространенными являются этиленгликолевые жидкости. Они, обеспечивая надежное охлаждение двигателя, полностью исключают возможность, в отличие от воды, размораживания системы охлаждения неработающего двигателя при межсменной стоянке машины в условиях низких температур.

Этиленгликоль (двухатомный спирт) – это прозрачная бесцветная вязкая жидкость без запаха, хорошо смешивается с водой и нерастворима в нефтепродуктах. Этиленгликоль имеет температуру замерзания $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$, температуру кипения $197\text{ }^{\circ}\text{C}$ и удельную теплоемкость при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $2,4\text{ кДж/кг}\cdot\text{ }^{\circ}\text{C}$. Несмотря на то, что в случае применения этиленгликоля рабочая температура жидкости в системе охлаждения может быть повышена до $120\dots130\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для улучшения охлаждения из-за большого перепада температур между ОЖ и окружающим воздухом), в чистом виде его не используют. Причинами этого являются высокая температура застывания и низкая температура вспышки (пожароопасность) этиленгликоля ($122\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для охлаждения используют водные растворы этиленгликоля. Смешивая этиленгликоль с водой в разных соотношениях, можно получить жидкости с температурой замерзания от 0 до $-75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Использование антифризов в системе охлаждения имеет много преимуществ: низкая температура застывания, высокая температура кипения. Жидкость имеет достаточно высокую теплоемкость, а при замерзании образуется рыхлая масса, объем которой увеличивается на $0,2\dots0,3\%$ от первоначального, и поэтому система не разрушается. Основные недостатки этиленгликолевых жидкостей – это их токсичность: они вызывают при попадании в организм человека тяжелые отравления, а также их коррозионное воздействие на металлы. С этими недостатками борются следующими способами: не следует допускать попадание антифриза в рот и необходимо работать с ним в резиновых перчатках. Коррозионное воздействие устраняют введением специальных антикоррозионных присадок.

Отсутствие в антифризах присадок (в случае приобретения подделок) или их ненадлежащее качество приводит к быстрому развитию коррозии системы охлаждения, вплоть до образования сквозных отверстий – "свищей" в корпусе двигателя, и попаданию антифриза в систему смазки.

Попадание только 5% антифриза в моторное масло приводит к мгновенному его загустеванию и прекращению прокачиваемости вплоть до заклинивания двигателя.

Гарантийный срок работы отечественных антифризов обычно не превышает 2-х лет и связан с накоплением в них механических примесей и коррозионно-активных продуктов.

Отечественная промышленность выпускает несколько марок антифризов на базе этиленгликоля. Наиболее распространены антифризы марок 40 и 65 с температурой застывания -40 и $-65\text{ }^{\circ}\text{C}$ с антикоррозионными присадками, которые защищают от коррозии как черные, так и цветные металлы деталей.

Антифризы практически не действуют на резиновые детали и обладают повышенной текучестью. Поэтому в процессе эксплуатации необходимо тщательно следить за уплотнением соединений между деталями. Для всесезонной эксплуатации легковых и грузовых автомобилей ("КамАЗ"),

тракторов (К-701) предназначены антифризы Тосол-АМ, марок А40М и А65М. Цифры в марках характеризуют температуру застывания. Тосол готовят на основе этиленгликоля с добавкой 2,5...3,0% сложной композиции противокоррозионных и антипенной присадок.

В качестве антикоррозионных присадок в антифризы вводят двухзамещенный фосфорнокислый натрий и декстрин (углеводород). Для улучшения их антикоррозионных свойств в отношении цинковых и хромовых покрытий в антифризы добавляют молибденовокислый натрий.

В таблице 11.6 даны физико-механические характеристики отечественных антифризов. Использовать антифризы можно только после удаления из системы охлаждения накипи, которая разрушает антикоррозионные присадки. При нагревании этиленгликолевые жидкости значительно увеличиваются в объеме. В связи с этим систему охлаждения заполняют на 92...94%. В автомобилях с учетом этого явления предусматриваются расширительные бачки.

При обнаружении подтекания антифриза из системы добавляют до нужного объема только антифриз. Если система исправна, а уровень жидкости уменьшился, то доливать можно дистиллированную воду, так как температура кипения воды значительно ниже, чем у этиленгликоля, и вода быстрее испаряется.

Таблица 11.6

Показатели	Марка 40	Марка 65	А40М	А65М
Внешний вид	Слабомутная желтоватая жидкость	Слабомутная оранжевая жидкость	Жидкость голубого цвета	Жидкость красноватого цвета
Плотность при 20 °С, кг/м ³	1067...1072	1085...1090	1078...1085	1085...1100
Температура кристаллизации, °С, не выше	-40	-65	-40	-65
Температура кипения, °С, не ниже	108	112	108	112
Массовая доля этиленгликоля, %, не менее	52	65	53	63
Водородный показатель рН раствора при 20 °С	Не более 8,5		7,5...8,5	7,5...8,5

Природная вода (водные растворы) имеют кислую, нейтральную и щелочную реакцию, определяемую по величине концентрации водородных ионов, выражаемой числом их граммов на 1 л воды.

Нейтральной реакцией обладает вода, содержащая 10^{-7} г в 1 л воды. Для характеристики величины концентрации водородных ионов используется водородный показатель рН, численно равный показателю степени без знака минус. Для практической оценки используется следующая шкала:

Величина рН	Реакция воды
5,5	Сильнокислая
5,5-6,5	Слабокислая
6,5-7,5	Нейтральная
7,5-8,5	Слабощелочная
8,5	Сильнощелочная

Водные растворы, используемые в системах охлаждения двигателей, должны обладать нейтральной или слабощелочной реакцией.

За рубежом выпускают широкий ассортимент антифризов на основе этиленгликолей, моноэтиленгликолей и монопропиленгликолей. Они поступают в продажу либо в виде концентратов для последующего разбавления деионизированной водой в пропорциях, соответствующих температурным условиям применения (-10 ; -15 ; -25 ; -40 ; -50 °С), либо в готовом виде с температурой замерзания -40 и -50 °С (для антифризов на основе этиленгликолей) и до -30 °С на основе пропиленгликолей. В антифризы добавляются присадки для защиты системы охлаждения: от известковых отложений; от коррозии металлических деталей; от кавитационного изнашивания гильз цилиндров и водяного насоса (микродетонация пузырьков пара, вызывающая разрушение поверхности деталей); от вспенивания жидкости, предотвращая ухудшение теплопередачи и падение давления в системе охлаждения. Величина рН антифризов составляют значения от 7 до 9.

Выпускаемые зарубежные антифризы не имеют стандартов типа SAE, API и т.д. Основополагающими документами в определении качества антифриза, его выбора для условий эксплуатации, обслуживания систем охлаждения являются спецификации производителей двигателей и фирм – производителей нефтепродуктов. Выпускаются антифризы с безопасными для окружающей среды присадками, не содержащими нитритов, аминов, фосфатов и силикатов, со сроком службы 2 и 4 года.

12. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Пластичные смазочные материалы (ПСМ), в отличие от масел обладают аномальным внутренним трением. Их вязкость не описывается законом Ньютона и является функцией не только температуры, но и скорости деформации (градиента скорости). По своей природе ПСМ – это вещества различной консистенции (от жидкой до густо-твёрдой). Они состоят из дисперсной среды (жидкой основы – минерального, растительного или синтетического масла), твёрдого загустителя (мыла, органические и неорганические вещества и углеводы), присадок и наполнителей (материалы, нерастворимые в маслах).

Большинство ПСМ отечественного производства (более 95 %) готовят из нефтяного масла. Синтетические масла применяют для ПСМ, работающих в экстремальных условиях (для узлов трения, работающих в диапазоне температур ниже 60 и выше 150 °С). Эти масла представляют собой кремнийорганические жидкости, сложные эфиры, фтор- или фторхлоруглероды, полиалкиленгликоли и др. В отдельных случаях применяют растительные (например, касторовое) масла.

От масляной основы зависят работоспособность ПСМ в определенном интервале температур, силовых и скоростных нагрузок, устойчивость к агрессивным средам, а также набухаемость контактирующих изделий из резины, полимеров и т.п.

Зависимость вязкости ПСМ от вязкости масла в тестовых режимах описывается уравнением: $\eta_{\text{СМ}} = a + b \cdot \eta_{\text{д.с.}}$, Па·с, где $\eta_{\text{СМ}}$ – динамическая вязкость ПСМ; $\eta_{\text{д.с.}}$ – динамическая вязкость масла; **a** и **b** – коэффициенты. Коэффициент **a** характеризует касательное сопротивление движению слоев ПСМ, которое противодействует разрушению каркаса загустителя. Коэффициент **b** характеризует тангенс угла наклона прямой $\eta_{\text{СМ}}$ в зависимости от значений $\eta_{\text{д.с.}}$, ПСМ работоспособны до температуры, при которой их вязкость не превышает 2000 Па·с.

Вязкостно-скоростные и вязкостно-температурные характеристики определяют возможность заправки ПСМ в узлы трения со-лидолонагнетателями, прокачиваемость по мазепроводам при централизованной смазочной системе, а также противоизносные свойства в процессе эксплуатации.

Вещества загустителей образуют трехмерный структурный каркас, заполненный маслом. Температурные пределы применения ПСМ во многом определяются температурами плавления и химического разложения загустителя, а также его концентрацией. От природы загустителя зависят антифрикционные и антикоррозионные свойства, водостойкость, коллоидная и антиокислительная стабильность ПСМ. В

них используют мыльные загустители, которые представляют собой щелочи, т.е. гидраты окислов кальция, натрия, лития и других металлов. Верхний температурный предел применения мыльных ПСМ: обычные кальцевые $-60...70$ °С, а комплексные алюминиевые – $150...170$ °С. Углеводородные ПСМ работоспособны до $50...70$ °С, неорганические смазки в зависимости от дисперсной среды: от 60 до 170 °С и выше. ПСМ на органических загустителях применяют в качестве высокотемпературных.

Для улучшения свойств ПСМ используются в основном те же присадки, что и для легирования масел: противоизносные, противо-задирные, антифрикционные, вязкостные, антиокислительные и др.

Наполнители улучшают ряд свойств ПСМ. Например, низкий коэффициент трения достигается введением графита, дисульфида молибдена, полимеров, оксидов металлов и проч. Адгезионные, антикоррозионные и низкотемпературные свойства ПСМ улучшают введением в их состав различного вида восков.

Резюме: ПСМ представляют собой сложные многокомпонентные системы, которые в зависимости от условий работы обладают свойствами как твердых, так и жидких тел. Под действием небольших усилий ПСМ ведут себя как твердое тело (могут удерживаться на вертикальных и наклонных поверхностях). Под воздействием больших нагрузок смазки работают как жидкость (обладают текучестью). Эти особенности ПСМ обусловили применение комплекса показателей оценки их эксплуатационных свойств, не характерного для жидких масел.

Температура каплепадения (ТК) характеризует переход из пластического состояния смазки под воздействием тепла в жидкое состояние. Для предупреждения вытекания ПСМ из нагретого узла трения необходимо, чтобы ее ТК была на $15...20$ °С выше рабочей температуры узла трения. Определяют ТК с помощью специального лабораторного прибора. ТК – это температура первой капли нагреваемого ПСМ из чашки прибора. Значения ТК позволяют судить о верхнем температурном пределе работоспособности ПСМ.

Пенетрация характеризует консистенцию (густоту) ПСМ, ее способность проникать в зазор между трущимися поверхностями и нести нагрузку в подшипнике. Определяется это свойство числом пенетраций (ЧП). Чем выше ЧП, тем подвижнее (жиже) ПСМ. Для летних сортов ПСМ ЧП составляет $150...250$, для зимних $-250...350$, всесезонных – $200...300$ единиц. ЧП измеряется в лабораторных условиях и показывает глубину погружения в ПСМ стандартного металлического конуса массой 150 г при $t = 25$ °С за время 5 с в десятых долях мм. Таким образом, указанные условные значения ЧП необходимо умножить на $0,1$, чтобы получить истинную глубину погружения конуса в мм. Ниже представлена

пенетрация ПСМ в зависимости от класса консистенции:

ЧП при 25 °С	Класс консистенции
400...430	00
335...385	0
310...340	1
265...295	2
220...250	3
175...205	4
130...160	5
85...115	6
Меньше 70	7

Предел прочности (ПП) определяет свойство ПСМ: механическую стабильность (восстановление своих первоначальных свойств после снятия нагрузки). Он оценивается минимальным напряжением сдвига, которое разрушает каркас ПСМ, после чего наступает необратимая деформация – ПСМ становится текучим. Т.е., ПП характеризует способность ПСМ сопротивляться вытеканию через неплотности узлов трения, удерживаться на наклонных и вертикальных поверхностях и противостоять сбрасыванию с движущихся деталей под действием инерционных сил. Измеряется ПП в Па или г/см^2 при положительных температурах ПСМ, начиная с 20 °С. Чем выше значения ПП, тем лучше прочностные характеристики ПСМ на сдвиг.

Эффективная вязкость (ЭВ) характеризует состояние ПСМ, когда он под воздействием внешнего давления и температуры, разрушающей каркас смазки, начинает течь, подобно жидкости. Особенно чувствительна вязкость ПСМ к изменению скорости деформации. При постоянной температуре и с увеличением скорости деформации в 10...100 раз вязкость ПСМ понижается в сотни и тысячи раз.

С помощью ЭВ оценивают прокачиваемость ПСМ по трубопроводам и через пресс-масленки. Для обеспечения хорошей прокачиваемости ПСМ должен обладать невысокой вязкостью, особенно при низкой температуре. ЭВ измеряют на автоматическом капиллярном вискозиметре или пластовискозиметре. Так как ЭВ зависит от температуры и градиента скорости сдвига, то при измерении её значения (Па·с) указывают температуру (–50 °С, –30 °С или 0 °С) и средний градиент скорости сдвига (10 с^{-1} , 100 с^{-1} , 1000 с^{-1}). ПСМ высокой вязкости применяют в тех узлах, где есть опасность испарения, требуется высокая водостойкость, необходимо уменьшать шум и т.д.

При повышенных температурах наблюдается улетучиваемость, т.е. потеря масла из-за его испаряемости, что приводит к увеличению вязкости ПСМ и изменению других эксплуатационных свойств за счет

повышенного содержания загустителя в ПСМ. Под *водостойкостью* понимают способность ПСМ не растворяться в воде, не смываться и не изменять своих свойств в контакте с ней. Кроме того, специфическими показателями, определяемыми для ПСМ, являются коллоидная стабильность и антиокислительная стабильность.

Под *коллоидной стабильностью* (КС) понимается способность ПСМ сопротивляться выделению из них масла во время хранения и применения. При сильном выделении масла качество ПСМ ухудшается, так как вытекшее из узла трения масло приводит к образованию в ней затвердевшей массы загустителя и нарушению режима смазывания. В то же время небольшое выделение масла из ПСМ желательно, так как, попадая на трущиеся поверхности, масло обеспечивает их нормальную работу. КС оценивают в % выделившегося масла из определенного объема ПСМ, находящейся под давлением груза при положительной температуре.

Антиокислительная стабильность ПСМ характеризует устойчивость против окисления кислородом воздуха во время хранения и применения. Окисление сопровождается уплотнением ПСМ и образованием агрессивных продуктов, вызывающих коррозию металлов. Оценивается кислотным числом и нормируется в пределах 2...3 мг КОН на 1 г смазки.

ПСМ с *антифрикционными свойствами* применяют в открытых, в труднодоступных, негерметизированных и герметизированных узлах трения (без замены ПСМ в течение всего срока службы узла) для уменьшения трения и износа трущихся деталей. К ним относят: шарнирные соединения, шестеренные и червячные передачи, подшипники качения и скольжения. Для защиты от коррозии машин и их составных частей и деталей при длительном хранении применяют специальные *консервационные ПСМ*. Для герметизации зазоров в механизмах и оборудовании, а также соединений трубопроводов и запорной арматуры применяют *уплотнительные ПСМ*, которые обладают лучшими герметизирующими свойствами, чем другие смазочные материалы.

Из всех перечисленных видов ПСМ только 14% расходуется на консервацию и 2% на герметизацию, а остальные 84% являются антифрикционными. Основные преимущества применения ПСМ в сравнении с маслами: лучшая смазочная способность; лучше удерживаются в негерметизированных узлах трения; имеют больший ресурс работоспособности и меньший расход; обладают повышенной водостойкостью и более высокими защитными свойствами от коррозии. Применение ПСМ позволяет создать более компактные узлы трения.

Недостатки ПСМ в сравнении с маслами: более низкая охлаждающая способность и сложность подачи их к узлу трения.

ПСМ классифицируют и обозначают в соответствии с ГОСТ 23258-78 по следующим признакам. По областям применения их разделяют на 4 группы: антифрикционные, консервационные, уплотнительные и канатные.

Антифрикционные ПСМ делят на подгруппы, обозначаемые индексами: С – общего назначения для обычной рабочей температуры (до 70 °С); О – для повышенной температуры (до 110 °С); М – многоцелевые, которые работоспособны от –30 до 130 °С в условиях повышенной влажности; Ж – термостойкие (150 °С и выше); Н – низкотемпературные (ниже –40 °С); И – противозадирные и противоизносные (подшипники качения при контактных напряжениях – выше 2500 МПа и подшипники скольжения – выше 150 МПа); Х – химически стойкие (для узлов трения, имеющих контакт с агрессивными средами); П – приборные; Т – редукторные (трансмиссионные) – для смазки зубчатых и винтовых передач всех видов; Д – приработочные (для предотвращения задиров и ускорения приработки узлов трения после сборки), содержащие дисульфид-молибденовые, графитные и другие пасты.

Консервационные (защитные) ПСМ (З) предназначены для предотвращения коррозии металлических поверхностей при хранении и эксплуатации машин. *Канатные* ПСМ (К) предназначены для предотвращения износа и коррозии стальных канатов. *Уплотнительно-резьбовые* ПСМ (Р) – герметизация зазоров резьбовых (подвижных) соединений.

По типу загустителя смазки получили название и обозначение буквами русского алфавита (таблица 11.7).

Таблица 11.7

Загуститель	Индекс	Загуститель	Индекс
<u>Мыла:</u>		<u>Неорганические вещества:</u>	
алюминиевое	Ал	глины (бентонитовые)	Бн
бариевое	Ба	сажа	Сж
кальциевое	Ка	силикагели	Си
литиевое	Ли	<u>Органические вещества:</u>	
натриевое	На	пигменты	Пг
свинцовое	Св	полимеры	Пм
цинковое	Ци	уреаты	Ур
углеводороды твердые	Т	фтороуглероды	Фу
комплексное	к		
смесь мыл	М ₁ - М ₂		

Маркировка ПСМ. Условное обозначение состоит из наименования (солидол, литол, графитная и т. д.) и индексов, в краткой форме сообщающих о назначении ПСМ, его характеристике и составе. Индексное обозначение состоит из пяти буквенных и цифровых индексов, расположенных в следующем порядке: указатель группы или подгруппы в соответствии с назначением ПСМ; загуститель; температурный интервал применения; дисперсионная среда; консистенция ПСМ. Некоторые ин-

дексы могут быть пропущены. В марку ПСМ могут быть введены индексы "г", "д", с и другие, обозначающие твердые добавки соответственно графита, дисульфида молибдена, свинца и др. Тип загустителя (индекс) обозначают буквами русского алфавита.

Комплексное мыло обозначают строчной буквой к, после которой указывают индекс соответствующего мыла, например кКа (кальциевое), кБа (бариевое). Смесь двух и более загустителей обозначают составными индексами: Ка-На, Ли-Ба и т. д., причем на первом месте ставят индекс загустителя, входящего в состав ПСМ в большем количестве. Индексы М, О, Н, означающие загуститель (соответственно мыло, органические вещества и неорганические вещества), ставят в тех случаях, когда загуститель не предусмотрен перечнем.

Температурный интервал применения обозначают дробью, цифры которой соответствуют температуре, уменьшенной в 10 раз. Например, 3/13 означает, что данный ПСМ может работать в интервале температур от -30 до $+130$ °С.

Минимальной считают температуру, при которой вязкость ПСМ не превышает 2000 Па·с.

Тип дисперсионной среды обозначают следующими индексами: нефтяное масло – н, синтетические углеводороды – у, сложные эфиры – э, фторсилоксаны – ф, кремнийорганические жидкости – к, галогенуглеродные жидкости – ж, перфторалкилполиэфиры – а, прочие масла и жидкости – п.

Наличие в смазке твердых добавок обозначают буквами: графит – г, дисульфид молибдена – д, порошки свинца – с, порошки меди – м, порошки цинка – ц. Прочие твердые добавки – т.

Смесь двух и более масел обозначают индексом (НК, уэ и др.), причем на первом месте ставят индекс масла, входящего в состав дисперсионной среды в большем количестве.

Индекс "п" применяют, когда входящее в состав дисперсионной среды синтетическое или иное масло отсутствует в перечне. При изготовлении ПСМ на нефтяном масле индекс "н" не указывают. Его вводят в марку при обозначении смазки из смеси нефтяного и какого-либо другого масла.

Класс консистенции ПСМ обозначают арабской цифрой. По числу пенетрации ПСМ присвоено 9 классов консистенции.

Примеры обозначения ПСМ:

а) МЛи4/13-3: М – многоцелевой ПСМ; Ли – загуститель (литиевое мыло); 4/13 – температурный диапазон применения от -40 до $+130$ °С; 3 – класс консистенции (пенетрация при 25 °С составляет 220...250);

б) СКа2/7-2: С – антифрикционный ПСМ общего назначения, применяемый при температуре до 70 °С (солидол); Ка – загуститель (кальциевое мыло); 2/7 – рекомендуемый температурный диапазон применения от -20 до $+70$ °С (вязкость смазки при -20 °С близка к 2000 Па·с); индекс дисперсионной среды отсутствует, следовательно,

смазка приготовлена на нефтяном масле; 2 – класс консистенции смазки (пенетрация при 25 °С составляет 265...295);

в) КТ6/5к-г4: К – канатный ПСМ; Т – загуститель (твердые углеводороды); 6/5 – температурный интервал эксплуатации от –60 до +50°С; к – ПСМ приготовлен на основе кремнийорганической жидкости; г – в качестве добавки использован графит; 4 – класс консистенции ПСМ (пенетрация при 25 °С составляет 175...205).

Мыльные ПСМ в зависимости от применяемого для их получения жирового сырья называют *синтетическими* (на основе синтетических жирных кислот) и *жировыми* (на основе природных жиров). Например, С – синтетический солидол, Ж – жировой солидол.

Зарубежные производители выпускают широкий ассортимент смазок, которые имеют примерно такую же структуру и характеристики, что и отечественные смазки. Изготавливают их по требованиям европейского стандарта DIN, международного ISO, американского NLGI.

В Российской Федерации наиболее распространены требования стандарта NLGI – National Lubricating Greases Institute (Национальный институт пластичных смазок).

Система классификации NLGI включает в себя после написания товарного названия ПСМ буквенные индексы (таблица 11.8): обозначение области применения, тип используемых базовых масел и цифровое обозначение классов консистенции, а также значения ЧП в стандартах NLGI и ГОСТ 23258-78 которые совпадают с отечественными обозначениями (кроме класса 7 индексации), применяемого только в российском стандарте.

Таблица 11.8

Индекс NLGI ГОСТ	ЧП при 25 °С	Консистенция (визуальная)	Область применения и условия работы
000	445...475	Очень жидкая	Централизованные смазочные системы (ЦСМ), механические трансмиссии
00	400...430	Жидкая	То же
0	355...385	Полужидкая	Слабонагруженные подшипники и ЦСМ
1	310...340	Очень мягкая	Легконагруженные подшипники и ЦСМ
2	265...295	Мягкая	Средне- и тяжелоагруженные подшипники, средние скорости, шприцмасленки
3	220...250	Густоватая	Средне- и тяжелоагруженные подшипники, повышенные скорости

4	175...205	Густая	Высокоскоростные подшипники
5	130...60	Очень густая	Открытые зубчатые передачи
6	85...115	Твердая, мылообразная	Открытые зубчатые передачи
7- ГОСТ	Ниже 70	Твердая, мылообразная	Резьбовые соединения и пробковые краны топливных систем

В таблице 11.9 приведён ассортимент отечественных ПСМ, которые применяются при эксплуатации строительных и дорожных машин.

Из приведенных данных видно, что современный многоцелевой литиевый ПСМ "Литол-24" превосходит старые кальциевые ПСМ общего применения "Солидолы С и Ж".

Наибольшим достоинством этого ПСМ является широкий температурный диапазон работоспособности ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $120\text{ }^{\circ}\text{C}$), а у солидолов ($-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $65\text{ }^{\circ}\text{C}$), большие значения ТК и ПП. Последний показатель характеризует механическую стабильность ПСМ.

Из-за более низкой механической стабильности солидолы в процессе эксплуатации (подшипники, шарнирные соединения) разупрочняются и вытекают из узлов трения. А "Литол-24" сохраняет свои свойства, удерживается в узле и обеспечивает длительную работоспособность. Периодичность смены "Литола-24" по сравнению с "Солидол С" увеличена в 3 раза. Но "Солидол С" имеет низкое значение ЭВ, что обеспечивает его преимущественное применение в ЦСМ при низких температурах. Другие физико-химические показатели и состав ПСМ приводятся в стандартах и ТУ. Использование тех или иных марок ПСМ для конкретных узлов трения машин рекомендуется в карте смазки, которая является составной частью "Руководства по эксплуатации" для определенного вида строительных машин.

Назначением защитных ПСМ является препятствование проникновению к металлическим наружным поверхностям конструкций машин коррозионно-агрессивных веществ, влаги и кислорода из воздуха для предотвращения коррозии. Они должны обладать высокой влагостойкостью, хорошей адгезией к металлам, высокой антиокислительной и коллоидной стабильностью.

Этим качествам отвечают мазеподобный углеводородный ПСМ – ПВК и полужидкий алюминиевый ПСМ – ЗЭС. Они обеспечивают защиту металлоконструкций машин при их длительном хранении до 5 лет на открытой площадке при колебаниях температур от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ПВК и $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ для ЗЭС.

Марки канатных смазок, применяемых на кранах, экскаваторах и других строительных машинах, имеют следующие диапазоны работоспособности: "Канатная 39У" работоспособна от $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; "Торсиол-35Э" – от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$; "Торсиол-55" – от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

ПСМ, в составе которых находятся мягкие металлы или их оксиды,

называют *плакирующими*.

Солидол синтетический готовят загущением индустриального масла кальциевыми мылами синтетических жирных кислот, полученных окислением парафина. В состав солидолов, кроме обязательных двух компонентов – дисперсионной среды (масла) и дисперсной фазы (загустителя), входит третий компонент – стабилизатор структуры, которым служит вода. Поэтому максимальная температура применения солидолов 65 °С. При более высокой температуре они необратимо разрушаются. Синтетические солидолы выпускают двух марок: солидол С и пресс-солидол С. Солидол С заправляют в узлы трения машин, работающих при температуре до –10 °С, а пресс-солидол С – при температуре до –30 °С. Преимущества солидолов – высокая влагостойкость и хорошие защитные свойства. Солидолы применяют в сборочных единицах автомобилей, тракторов, комбайнов, сельскохозяйственных машин, оборудования ферм и в станочном оборудовании. К недостаткам солидолов относятся низкие рабочие температуры и плохая механическая стабильность.

Таблица 11.9

Марка	ТК, °С	ЧП 25 °С, Па	ЧП 20 °С, Па	ЭВ 0 °С и 10 с ⁻¹ , Па·с	Коллоидная стабильность, %
АНТИФРИКЦИОННЫЕ ПСМ:					
ПСМ общего назначения для обычных температур					
Солидол С	85...10	260...310	300...700	<200	1-5
Солидол Ж	75...87	230...290	300...600	≤250	7-13
Графитная	77...85	250...280	300...700	≤100	2-5
ПСМ общего назначения для повышенных температур					
1-13	≥120	180...250	500...1000	≤500	≤20
Многоцелевые ПСМ					
Литол-24	≥185	220...250	500...1000	≤280	≤12
Фиол-2М	≥180	265...195	300	≤250	≤15
Термостойкие ПСМ					
ВНИИНП-235	≥250	325	100...150	≤ 300 (-40 °С)	≤19
Низкотемпературные ПСМ					
ЦИАТИМ-201	≥175	265...310	350...500	≤1100(-50°С)	≤26
ЦИАТИМ-203	≥160	250...300	350...700	≤1000(-30°С)	≤10
ЗИМОЛ	≥190	240...290	300...1000	≤ 2000 (-50 °С)	≤20
Редукторные (полужидкие) ПСМ					

ЦИАТИМ-208	—	300...360	—	1800 (-30 °С)	—
Трансол-100	≥150	400...430	—	1200 (-30 °С)	≤35
Трансол-150	≥150	400...430	—	1400 (-30 °С)	≤30
Консервационные (защитные) ПСМ общего назначения					
Пушечная ЗЭС	≥60	—	1000...2500	1500...4000	1...4
	≥105	—	150...500	1200...2000	3...4
Канатные ПСМ					
Канатная 39У	65...75	—	—	2000	—
Торсиол-35Э	≥65	—	—	—	—
Торсиол-55	60...80	350	—	200-260	—

Солидол жировой получают загущением кальциевыми мылами жирных кислот, входящих в состав естественных жиров. Этот солидол выпускают двух марок: солидол Ж и пресс-солидол Ж. Несколько лучшие вязкостно-температурные характеристики жировых солидолов обуславливают более широкое их применение по сравнению с синтетическими. Однако в большинстве случаев жировые и синтетические солидолы взаимозаменяемы. При смешивании в любом соотношении жировых и синтетических солидолов их эксплуатационные характеристики не ухудшаются. Заменитель – Литол-24.

Графитный ПСМ представляет собой мазь черного цвета. Это кальциевая гидротированная смазка с добавлением 10 % мягкого чешуйчатого графита. Несмотря на плохие низкотемпературные свойства, этот ПСМ используют всепогодно в тяжело нагруженных тихоходных механизмах, где увеличение сопротивления, вызываемое смазкой, не имеет практического значения (в рессорах автомобилей, открытых шестернях, торсионных подвесках гусеничных машин и др.). Для точных соединений и подшипников качения он непригоден. Этот ПСМ работоспособен при температуре $-20...+70$ °С. Заменители – солидол С, солидол Ж или Литол-24 с добавлением 10 % графита.

Консталин (универсальная тугоплавкая смазка УТ) выпускают двух марок: Консталин-1 и Консталин-2, которые различаются температурой каплепадения и числом пенетрации. Жировые консталины получают загущением очищенного или выщелоченного минерального масла натриевыми мылами. Их применяют для подшипников качения, работающих при температуре до 110 °С (в ступицах колес, карданных валах, осях и шарнирах педалей управления, электродвигателях). Заменители – Литол-24, Литол-459/5.

1-13 – смесь нефтяных масел низкой и средней вязкости, загущенная натриевым мылом жирных кислот касторового масла. Содержит небольшое количество кальциевого мыла. ПСМ работоспособен при температуре $-20...+110$ °С. Его применяют для смазывания подшипников качения электродвигателей, ступиц колес устаревших автомобилей. Заменитель –

Литол-24.

Литин-2 – минеральное масло, загущенное литиевым мылом 12-оксистеариновой кислоты и аэросилом. ПСМ содержит антиокислительную, противозадирную, противоизносную, адгезионную и противокоррозионную присадки, обладает высокими три-бологическими и адгезионными свойствами. Работоспособен при температуре $-40...+120$ °С. Предназначен для смазывания игольчатых подшипников карданных шарниров и других узлов трения автомобилей. Заменитель – Литол-24.

Литол-24 – ПСМ коричневого или вишневого цвета, представляющий собой минеральное масло, загущенное литиевым мылом стеариновой кислоты. В состав ПСМ входят вязкостная и антиокислительная присадки. Литол-24 обладает высокой влагостойкостью и не подвержен тиксотропному термоупрочнению. Имеет высокую коллоидную, химическую и механическую стабильность. Водостоек, не растворяется в кипящей воде. Работоспособен при температуре $-40...+120$ °С. ПСМ используют в узлах трения автомобилей, тракторов, гусеничных, электрических, дорожно-строительных, сельскохозяйственных и других машин, успешно применяют в игольчатых подшипниках карданных шарниров.

В соединениях, не защищенных от грязи и воды, нецелесообразно применять ПСМ Литол-24, как и другие высококачественные ПСМ. Литол-24 заменяет многие ПСМ: солидолы, карданную АМ и др. Если Литол-24 используют в закрытых сборочных единицах (ступицах колес, подшипниках водяных насосов и др.) взамен ПСМ общего назначения, то сроки проведения смазочных работ увеличивают более чем в 2 раза. Заменитель – Литол-24РК.

Литол-24РК – смесь минеральных масел, загущенных литиевым мылом гидроксистеариновой кислоты. В состав ПСМ входят антикоррозионная, вязкостная, антиокислительная и защитная присадки. ПСМ водостоек, обеспечивает консервацию узлов трения в течение 10 лет, работоспособен при температуре $-40...+120$ °С. Служит для смазывания подшипников качения и скольжения всех типов колесных и гусеничных транспортных средств, электрических машин. Заменитель – Литол-24.

ЛКМтранс-2 – смесь минеральных масел, загущенных комплексным литиевым мылом. Водостоек, содержит многофункциональные присадки. Обладает высокой термической и механической стабильностью, а также хорошими антикоррозионными и смазывающими свойствами. Работоспособен при температуре $-40...+150$ °С, кратковременно до 170 °С. Применяют для смазывания узлов трения транспортных средств и промышленного оборудования. Заменитель – Литол-24.

Таврол-2 – смесь минеральных масел, загущенных литиевым мылом жирных кислот. Содержит вязкостную и антикоррозионную присадки. Обладает высокой термической и механической стабильностью. Работоспособен при температуре $-40...+150$ °С, кратковременно до 170 °С.

Служит для смазывания узлов трения транспортных средств и промышленного оборудования. Заменитель – Литол-24.

Фиол-2У – нефтяное масло, загущенное гидрооксистеаратом лития. Содержит антиокислительную присадку и антифрикционную добавку. Обладает высокими антиокислительной, механической и коллоидной стабильностями, хорошими противоизносными и противозадирными свойствами. Водостойка, работоспособна при температуре – 40...+120 °С. Применяют для смазывания игольчатых подшипников карданного вала автомобилей. Заменители – ШРУС-4, смазка № 158.

Литол 459/5 – минеральное масло, загущенное литиевыми мылами стеариновой и 12-гидрооксистеариновой кислот. Содержит антиокислительную присадку. Водостойка, работоспособна при температуре –40...+120 °С, кратковременно до 130 °С. Служит для смазывания прерывателя-распределителя системы зажигания автомобилей.

ЛСЦ-15 – смесь минеральных масел, загущенных литиевым мылом кислот гидрированного касторового масла. Содержит антиокислительную и вязкостную присадки и оксид цинка. Обладает достаточно хорошей термической, коллоидной и антиокислительной стабильностью, а также консервационными и адгезионными свойствами. Водостойка, работоспособна при температуре –40...+130 °С. Применяют для смазывания шарниров и осей привода акселератора, рычагов включения, шлицевых соединений, механизмов стеклоподъемников автомобилей. Заменитель – Литол-24.

ШРУС-4 – минеральное масло, загущенное гидроксистеаратом лития. Содержит антиокислительную и противозадирную присадки, а также антифрикционные добавки. Водостойка. Обладает высокой механической и антиокислительной стабильностью, а также противоизносными и противозадирными свойствами. Работоспособна при температуре –40... + 120 °С. Предназначена для смазывания шарниров равных угловых скоростей полноприводных автомобилей и других узлов трения. Заменитель – смазка № 158.

№ 158 – минеральное масло, загущенное литиево-кальциевым мылом кислот касторового масла и канифолью. Содержит антиокислительную присадку. Обладает хорошей антиокислительной и механической стабильностью, высокими противоизносными свойствами. Водостойкость удовлетворительная. Работоспособна при температуре – 30...+ 110 °С. Предназначена для смазывания подшипников качения автотракторного оборудования, игольчатых подшипников карданных шарниров непостоянной угловой скорости. ПСМ закладывают в закрытые подшипники (например, в выжимной подшипник сцепления грузовых автомобилей) и не пополняют в течение всего срока их службы. Заменитель – ШРУС-4.

Карданная смазка АМ, получаемая загущением минерального и касторового масел и канифоли кальциевым мылом, предназначена для смазывания карданных шарниров передних ведущих мостов автомобилей. Эта смазка вымывается из узлов трения, поэтому температурный диапазон ее применения от -20 до $+100^{\circ}\text{C}$. Заменители – Литол-24, ШРУС-4.

ЦИАТИМ-201 – приборный ПСМ, представляющий собой вазелиновое приборное масло (МВП), загущенное литиевым мылом стеариновой кислоты и содержащее антиокислительную присадку. Смазка работоспособна от -60 до $+90^{\circ}\text{C}$. Применяют в подшипниках качения и скольжения, шарнирах направляющих, узлах трения автомобилей и тракторов, работающих с малым усилием сдвига при невысоких нагрузках.

ПВК – углеводородный защитный ПСМ от желтого до коричневого цвета, получаемый сплавлением петролатума с вязким остаточным маслом при дополнительном введении 5 % церезина и присадки. Используют для черных и цветных металлов любой формы и размеров. Обладает высокими водостойкостью и стабильностью, нерастворим в воде. Металлические детали окунают в расплавленный ПВК или наносят на деталь кистью, щеткой при температурах не ниже 10°C . Работоспособен при температуре от -50 до $+45^{\circ}\text{C}$. Срок хранения деталей, законсервированных этим ПСМ, 10 лет.

13. ПРИСАДКИ К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ

Вязкостные (загущающие) присадки добавляют в моторные масла для повышения их вязкости и индекса вязкости. Такие масла называют загущенными. Загущающие присадки (сейчас все чаще употребляют термин «модификаторы вязкости») в сочетании с присадками, улучшающими смазочные свойства моторных масел, позволяют создавать энергосберегающие масла. В отличие от незагущенных масел, вязкость которых зависит в основном от температуры и давления, загущенные масла обладают еще способностью изменять свою вязкость в зависимости от напряжения и градиента скорости сдвига. Они определяют временное падение вязкости с увеличением скорости сдвига. Такие жидкости называют «разжижаемые сдвигом». Примеры таких жидкостей: резиновый клей, густотертая краска, битум. Вязкость этих жидкостей называют кажущейся вязкостью. Ее снижение при определенном градиенте скорости сдвига тем больше, чем ниже температура масла. У загущенных масел также наблюдается перманентное снижение вязкости из-за механической и термохимической деструкции загущающих присадок. В нашей стране в качестве товарных вязкостных присадок в основном используют полиметакрилаты. К вязкостным присадкам относятся и сополимеры стирола с диеновыми углеводородами (изопреном или бутадиеном), сополимеры этилена с пропиленом и с высшими олефинами, эфиры одно- и многоосновных кислот.

Молекулы полиметакрилатов при низкой температуре, когда масло вязкое, находятся в скрученном состоянии и мало влияют на вязкость. С ростом температуры они раскручиваются и повышают вязкость. Полимеры компенсируют значительную потерю вязкости самого масла при повышении температуры. Таким образом, повышается индекс вязкости масла. Присадки типа полиметакрилатов ПМА В-1, ПМА В-2, "Дизакрил" представляют собой масляные растворы эфиров метакрилатовой кислоты и масел синтетических жирных спиртов. Вязкостные присадки КП-5, КП-10 и КП-20 являются продуктами полимеризации изобутилена. Средняя молекулярная масса присадок от 4000 до 25000. Их применяют в виде масляных растворов в трансформаторном или индустриальном масле.

Загущенные масла обладают высоким индексом вязкости, хорошей текучестью при низких температурах, способствуют легкому и быстрому пуску двигателя в холодное время года, образуют небольшое количество нагара, обеспечивают минимальные потери мощности на трение, что ведет к экономии топлива.

Моюще-диспергирующие присадки предназначены для предотвращения или уменьшения образования лаковых отложений и осадков на рабочих поверхностях, предупреждения пригорания поршневых колец, а также для поддержания продуктов окисления масла во взвешенном состоянии. Для этих целей в моторные масла вводят моющие (*детергенты*) и диспергирующие (*диспергенты*) присадки. Моюще-диспергирующие присадки условно делят на две группы: зольные и беззольные.

В молекуле зольных присадок содержатся полярные группы, которые адсорбируются на поверхностях частиц окисления масла, препятствуя их укрупнению и отложению на рабочих поверхностях. Таким образом предотвращается образование отложений и лаков на деталях двигателя. Зольные моющие присадки повышенной щелочности нейтрализуют кислые продукты, которые образуются в результате окисления масла.

При производстве моторных масел применяют отечественные детергенты трех классов: алкилфеноляты, сульфонаты и алкилсали-цилаты щелочно-земельных металлов. Эти присадки составляют преобладающую часть композиций присадок в моторных маслах, однако наметилась тенденция к их уменьшению в связи с ростом доли беззольных дисперсантов и антиокислительных присадок.

Алкилфенольные присадки широко применяют в моторных маслах. Кроме моющего действия они могут обладать также антиокислительными и противоизносными свойствами.

Выпускают следующие алкилфенольные присадки.

АПФ-73 – щелочная присадка нового поколения. Разработана технология получения и организовано ее промышленное производство.

Эта присадка представляет собой коллоидную дисперсию карбоната кальция, стабилизированную алкилфенолятом кальция и производным тиофосфорной кислоты.

ВНИИ НП-714 – среднешелочная присадка нового поколения, получаемая карбонатацией сульфидаалкилфенолята кальция и представляющая собой коллоидную дисперсию. Обладает нейтрализующим и антиокислительным действием.

МАСМА-1603 – это раствор осерненного алкилфенола в дистиллятном минеральном масле. Служит для улучшения моющих, антиокислительных и противоизносных свойств.

ЦИАТИМ-339 – одна из старейших присадок. Она представляет собой дисульфидалкилфенолят бария, который получают путем взаимодействия алкилфенола с моноклористой серой с дальнейшей нейтрализацией гидроксидом бария. Присадка улучшает моющие и антикоррозионные свойства моторных масел. Массовая доля присадки в маслах составляет 3...6 %.

Начат выпуск алкилфенольных присадок нового поколения на основе нонилфенола К-35 и К-33, которые заменят морально устаревшую присадку ЦИАТИМ-339 и др.

Сульфатные присадки представляют собой соли кальция или магния, реже соли натрия, бария и цинка. В зависимости от содержания активных металлов в сульфатных присадках их подразделяют на нейтральные, средне- и высокощелочные. В состав средне- и высокощелочных присадок входит дисперсия карбонатов и гидроксидов металлов, стабилизированная сульфонатом металла. В России вырабатывают следующие сульфатные присадки.

НСК – нейтральный сульфонат кальция, растворенный в масле. Массовая доля активного вещества – сульфоната кальция в присадке составляет 38...45 %. КНД – коллоидная дисперсия карбоната кальция в дизельном масле, стабилизированная сульфонатом кальция. Присадка повышает моющие и нейтрализующие свойства масел. Ее добавляют в количестве 1,5...5 % (массовая доля). С-150 – коллоидная дисперсия карбоната кальция в индустриальном масле, стабилизированная сульфонатом кальция. Присадку изготавливают двух марок: А и В. Она улучшает моющие и нейтрализующие свойства масел. Ее добавляют в количестве 1,5...5 % (мае. доля). Организовано производство синтетических сульфатных присадок на основе алкилбензолов: К-31 – нейтральная; К-312 – высокощелочная; К-313 – сверхщелочная. У этих присадок ряд существенных преимуществ по сравнению с нефтяными сульфонатами.

Алкилсалицилатные присадки имеют высокие моющие свойства, а также обладают антиокислительным, антикоррозионным и антифрикционным действием. Эти присадки вырабатывают в ограниченном

объеме в связи со сложностью их получения. Алкилсалициловые присадки представляют собой соли алкилсалициловых кислот, которые получают алкилированием фенола альфаолефинами. Промышленность вырабатывает следующие присадки. Депрессол Д-50 – концентрат алкилсалицилата кальция в минеральном масле. При концентрации 0,5 % (массовая доля) придает маслам антиокислительные свойства, а при концентрации более 2 % (массовая доля) – моющие свойства. Депрессол Д-140 и Д-180 – растворы карбонатированного алкилсалитата кальция в масле. Их применяют в моторных маслах различного назначения. Присадки улучшают моющие, нейтрализующие и антиокислительные свойства масел. Депрессол Д-300 – сверхщелочная алкилсалицилатная присадка, представляющая собой дисперсию карбонатированного алкилсалицилата кальция в масле. Ее применяют для улучшения моющих, нейтрализующих и антиокислительных свойств моторных масел групп Г, Д и Е.

Беззольные диспергирующие присадки поддерживают во взвешенном состоянии твердые частицы, которые образуются при окислении моторного масла в двигателе. При их использовании снижаются нагарообразование и образование низкотемпературных отложений. К беззольным диспергирующим присадкам относятся сукцинимиды алкенилированные полиамины, полиэфиры и др. В нашей стране выпускают следующие беззольные диспергирующие присадки. СД-73 – смесь моно- и биалкилсукцинимидов в масле, обладающая хорошими диспергирующими свойствами. Применяют в моторных маслах. С-5А – 40...50 %-ный концентрат алкилсукцинимидов в масле и непрореагировавшем полибутене. Обладает высокими диспергирующими свойствами, применяется в моторных маслах нескольких групп.

Антиокислительные присадки представляют собой дитиофосфаты цинка и других металлов. Наиболее эффективны дитиофосфаты цинка, которые обладают способностью сорбироваться на поверхности металла с образованием адсорбционных слоев и тем самым снижать коэффициент трения. При высоких температурах и нагрузках он образует химически активные соединения, вступающие во взаимодействие с металлом с образованием модифицированных слоев, тем самым снижая износ и повышая нагрузку заедания. Дитиофосфат цинка взаимодействует с продуктами окисления, образуя в масле при эксплуатации.

Выпускают следующие зольные дитиофосфатные присадки. А-22 – присадка нового поколения, представляющая собой дитиофосфат цинка, модифицированный бромом, с содержанием активного вещества не менее 85 %. Присадка обладает антиокислительными, противоизносными, антикоррозионными и антифрикционными свойствами. Ее применяют в моторных, трансмиссионных и промышленных маслах в концентрации от 0,5 до 1,5 % (массовая доля). ДФ-11 – 50%-ный раствор диалкилдитиофосфата цинка в минеральном масле. Она улучшает

антиокислительные, антикоррозионные и противоизносные свойства. В моторных и других маслах присадку применяют в концентрации 1...2 % (массовая доля). Производят беззольные антиокислительные присадки следующих марок. ВНИИП-715 – 50%-ный раствор продукта взаимодействия ди-тиофосфатной кислоты с диэтилентриамином в масле. Эта присадка повышает антиокислительные и антикоррозионные свойства масел. "Борин" – 50%-ный раствор модифицированного основания Манниха. Повышает антиокислительные свойства минеральных масел.

Депрессорные присадки служат для понижения температуры застывания масел, т. е. сохраняют их подвижность при пониженных температурах. Наличие в масле парафиновых углеводородов обуславливает в первую очередь застывание масла. Подвижность масла теряется из-за образования кристаллической структуры парафиновых углеводородов. Чтобы понизить температуру застывания масел, в них вводят депрессорные присадки, которые модифицируют кристаллические структуры твердых углеводородов с сохранением подвижности масла.

Промышленность выпускает следующие депрессорные присадки. Депрессатор АзНИИ – продукт алкилирования нафталина хлорированным парафином в присутствии хлорида алюминия. Присадку применяют в моторных, трансмиссионных и гидравлических маслах в концентрации до 0,5 % (массовая доля). АзНИИ-ЦИАТИМ-1 – продукт взаимодействия дисульфида ал-килфенола с гидроксидом бария. Применяют в моторных и трансмиссионных маслах в концентрации 1 % (массовая доля). АФК – продукт взаимодействия алкилфенола с гидроксидом кальция. Применяют в моторных и трансмиссионных маслах в концентрации 1 % (массовая доля). ПМА Д – 30...40%-ный раствор полимеров эфиров метакриловой кислоты и синтетических жирных первичных спиртов в индустриальном масле. Применяют в моторных, трансмиссионных и гидравлических маслах в концентрации до 1 % (массовая доля). Присадка обладает также загущающими свойствами, поэтому ее используют для повышения вязкости. Депресал – модифицированный продукт алкилирования фенола хлорпарафинами. Применяют в моторных и трансмиссионных маслах в концентрации 1 % (мае. доля).

Присадки, улучшающие смазывающие свойства масел, в нашей стране следующие: ЭФО – цинкобариевая соль изобутилового эфира арилдитио-фосфоновой кислоты. Улучшает противоизносные свойства тракторных масел, обладает антиокислительным действием; АДГФ – беззольная азотосодержащая присадка, улучшающая противоизносные и антифрикционные свойства трансмиссионных и индустриальных масел; Т-42 – серосодержащая присадка, повышающая противоизносные свойства трансмиссионных и индустриальных масел; автопрепарат "Экомин-С" – маслорастворимое содержащее молибден соединение, используемое в моторных и трансмиссионных маслах; ВИГОС – продукт взаимодействия

изобутилена с сероводородом и серой. Применяют в трансмиссионных и промышленных маслах.

Антипенные присадки служат для предупреждения образования пены или ускорения ее разрушения в масле. Действие этих присадок основано на снижении поверхностного натяжения на границе раздела жидкость-воздух. К антипенным присадкам относятся эфиры и соли жирных кислот, фосфорсодержащие соединения, фторированные углеводороды, силоксановые полимеры. Антипенную присадку полиметилсипоксан ПМС-200А применяют в различных маслах в концентрации 0,007...0,005 % (массовая доля).

Модификаторы трения, или антифрикционные присадки входят в состав энергосберегающих моторных масел. Модификаторы трения обеспечивают гарантированную экономию топлива за счет снижения затрат мощности на трение и соответственного повышения механического коэффициента полезного действия двигателя. Они наиболее эффективны в местах при граничном режиме смазывания. Так, между компрессионными поршневыми кольцами и цилиндрами вблизи верхних мертвых точек. В качестве антифрикционных присадок применяют тонкодиспергированные тетрафторэтилен, ацетаты и бораты металлов, а также растворимые в масле эфиры жирных кислот, органические соединения молибдена. Механизм действия твердых модификаторов трения основан на адгезии частиц твердого смазочного материала на смазываемой поверхности. Во время работы на поверхностях деталей образуется сплошной слой, обладающий малым коэффициентом трения и предотвращающий контакт поверхностей. Твердые модификаторы образуют адсорбированный слой молекул на поверхностях сопряженных деталей. Особенность этого слоя состоит в том, что обращенные наружу длинные молекулы очень легко деформируются вдоль направления движения одной детали относительно другой.

Композиции и пакеты присадок. Возрастающие требования к качеству масел привели к необходимости создания композиций многофункциональных присадок, которые повышают многие эксплуатационные свойства масел. При составлении композиций присадки не просто механически смешиваются, а химически взаимодействуют. Поэтому усиливаются старые или проявляются новые качества присадок. Для упрощения хранения, транспортирования и облегчения смешивания базовых масел с присадками выпускают пакеты присадок, в состав которых не входят только вязкостные и депрессорные присадки. При необходимости их вводят в масло дополнительно. Изменяя дозирование пакета присадок, можно приготавливать масла с различным уровнем эксплуатационных свойств. Пакеты присадок обычно содержат до 15 компонентов. Их вводят в масло в концентрации до 12 % (массовая доля).

СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Антифрикционные смазки

К антифрикционным смазкам общего назначения относят [СОЛИДОЛЫ](#) – наиболее дешевые пластичные смазки. Они водостойкие, хорошо защищают металлы от коррозии, имеют достаточно хорошие противоизносные свойства. У них, однако, низкие температуры плавления и механическая стабильность. При температурах выше 60...70°C используются натриевые (Na-) и кальциевые (Ca-) смазки. В настоящее время их выпуск сокращается в связи с применением в большинстве узлов трения многоцелевых смазок.

Смазки общего назначения

Солидол С. Область применения: относительно грубые узлы трения механизмов и машин, транспортных средств, сельскохозяйственной техники; ручной и другой инструмент, шарниры, винтовые и цепные передачи, тихоходные шестеренчатые и т.п. Хорошие водостойкость, коллоидная стабильность, защитные свойства, узкий диапазон рабочих

температур и низкая механическая стабильность ($T_p = -30 \dots +65 \text{ }^\circ\text{C}$).

Солидол Ж. Область применения: смазывание узлов трения, качения и скольжения различных машин и механизмов ($T_p = -25 \dots +65 \text{ }^\circ\text{C}$).

Графитин. Область применения: тяжелонагруженные тихоходные механизмы-рессоры, подвески тракторов и гусеничных машин, открытые шестереночные передачи, резьбовые соединения и др. ($T_p = -20 \dots +60 \text{ }^\circ\text{C}$).

Графитная Ж. Предназначена для смазывания грубых тяжелонагруженных механизмов (открытых шестеренчатых передач, резьбовых соединений, ходовых винтов, домкратов, рессор и т.п.). Допускается применять смазку при температуре ниже $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ в рессорах и аналогичных устройствах. Смазка работоспособна при температурах $-20 \dots 60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Смазки общего назначения для повышенных температур

Смазка 1-13. Смазывание узлов трения качения и скольжения механизмов и машин. Применяется для подшипников электродвигателей, ступиц колес автомобилей и др.

Консталин. Область применения: смазывание узлов терния вентиляторов литейных машин, доменных и цементных печей, подшипников качения на железнодорожном транспорте и др. Водостойкость низкая. Работоспособна при температуре $-40 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Литин-2. Применяется для смазывая игольчатых подшипников в карданных шарнирах и др. узлов автомобилей. Работоспособна при температуре $-40 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Многоцелевые смазки

Многоцелевые смазки можно применять в различных узлах трения (подшипниках качения и скольжения, шарнирах, зубчатых и цепных. передачах и т. п.), рассчитанных на использование пластичных смазок. Они во всех случаях могут служить заменой смазок общего назначения и в большинстве узлов трения – смазок общего назначения для повышенных температур.

Эти смазки водостойки и работоспособны в широком интервале скоростей, температур и нагрузок, имеют хорошие защитные свойства. Многоцелевые смазки не предназначены для замены морозостойких, термостойких, приборных и других специализированных смазок.

В шариковых и роликовых подшипниках допустимо использование пластичных одностипных многоцелевых антифрикционных смазок (Литол-24, ШРУС-4М). Применение указанных типов смазок позволяет сократить расход пластичных смазок, снизить износ оборудования и увеличить срок

службы оборудования.

Литол - 24, Литол-24 РК. Антифрикционная многоцелевая водостойкая смазка представляет собой смесь нефтяных масел, литиевых мыл 12-оксистеариновой кислоты и пакета присадок. Смазка имеет хорошие консервационные свойства, хорошо защищает металлические изделия от коррозии. Предназначена для применения в узлах трения колесных, гусеничных транспортных средств и промышленного оборудования, судовых механизмов различного назначения, работающих при температурах от -40 до 120 °С (допускается кратковременный нагрев до 130 °С).

Литол-24М. Область применения: узлы трения колесных и гусеничных транспортных средств, промышленного оборудования и судовые механизмы различного назначения ($T_r = -40 \dots +120$ °С). Она достаточно надежно защищает от коррозии, широко используется в качестве единой автомобильной смазки, успешно заменяет солидолы всех типов, Na- и Li-смазки общего назначения. Применение указанного типа смазки позволяет сократить расход пластичных смазок, снизить износ оборудования и увеличить срок службы оборудования.

Фиол-1. Предназначена для смазывания узлов трения под давлением (через пресс-масленку) и для тросов, имеющих оболочку с внутренним диаметром <5 мм. Водостойкая. Работоспособна при температуре $-40 \dots +120$ °С.

Фиол-2. Область применения: подшипники качения и скольжения, зубчатые передачи промышленных машин и механизмов, передачи станков, конвейеров и других аналогичных устройств, работающих при малых и средних нагрузках и т.п. Водостойкая.

Фиол- 2М. Область применения: легконагруженные малогабаритные подшипники качения и скольжения автомобильного электрооборудования, высокооборотные подшипники электроверетен; оси октан-корректора прерывателя распределителя автомобилей. Водостойкая, имеет улучшенные противоизносные и противозадирные свойства (в сравнении с ФИОЛ-2). Работоспособна при температуре от -40 до $+120$ °С.

БНЗ-3. Область применения: закрытые роликовые опоры конвейеров, механизмы экскаваторов, бурильных станков, бульдозеров и в горнорудной промышленности. По производным характеристикам уступает смазке Фиол-2М. Работоспособна в температурном интервале от -40 до $+120$ °С.

Герметин. Область применения: герметизация пробковых кранов бытовой газовой аппаратуры. Водостойкая, антифрикционная, многоцелевая. Работоспособна при температуре от -40 до $+130$ °С.

Термостойкие смазки

В некоторых узлах трения температуры достигают 200...350 °С и выше. Для таких условий выпускаются (в небольших количествах) термостойкие смазки, из которых наиболее перспективными и распространенными являются ЦИАТИМ-221, ВНИИНП-207, ВНИИНП-231, ВНИИНП-246.

ЦИАТИМ-221. Пластичная смазка, представляет собой синтетическое масло, загущенное комплексным кальциевым мылом с добавлением антиокислительной присадки. Предназначена для смазывания подшипников качения электромашин, систем управления и приборов с частотой вращения до 10 000 об/мин, агрегатных подшипников летательных аппаратов, узлов трения и сопряженных поверхностей металл-металл и металл-резина, работающих при температуре от –60 до 150 °С.

Р-402. Область применения: герметизация резьбовых соединений обсадных и насосно-компрессорных труб, подвергаемых не многократному или однократному свинчиванию ($T_r = -50...+200$ °С).

Резьбол марки Б. Обеспечивает герметичность и многократность свинчивания и развинчивания деталей колонн, легкость соединения и разъединения часто свинчиваемых и развинчиваемых труб, составляющих буровую колонну, при роторном или ударном бурении нефтяных скважин. Применима для утяжеленных бурильных труб (У Б Т) и замковых соединений бурильных колонн. Обеспечивает гарантированную герметичность резьбовых соединений при давлениях до 30 МПа. ($T_r = -50...+200$ °С).

Униол-2М/1. Область применения: узлы трения промышленного оборудования, горячих конвейеров, горнодобывающего оборудования, автотракторной, сельскохозяйственной техники, городского электротранспорта, керамического производства. ($T_r = -40...+160$ °С).

ВНИИНП-207, ВНИИНП-219. Область применения: подшипники качения электрических машин и стартер – генераторов с частотой вращения до 10000 мин⁻¹ ($T_r = -60...+200$ °С).

ВНИИНП-210. Область применения: тяжело нагруженные тихоходные подшипники качения и скольжения с качательным движением поверхностей трения при малых углах качания. Работоспособна при остаточном давлении 666,5 Па и температуре –20... +250 °С.

ВНИИНП-231. Область применения: закрытые червячно-винтовые механизмы, тихоходные подшипники качения и скольжения, резьбовые соединения. По свойствам занимает промежуточное положение между смазками и полутекучими пастами. Морозостойкая. Работоспособна при остаточном давлении 666,5 Па и температуре –60... +250 °С.

ВНИИНП-233. Область применения: подшипники качения и скольжения с качательным движением, сопряженные поверхности "металл- резина" ($T_r = -30...+250$ °С).

ВНИИНП-235. Область применения: подшипники качения. Работоспособна при остаточном давлении 666,5 Па и температуре $-60\dots+250$ °С.

ВНИИНП-246. Область применения: подшипники качения и маломощные зубчатые передачи. Высокая термическая стабильность, низкая испаряемость, хорошие противозадирные характеристики и морозостойкость. Работоспособна в вакууме до $1,3\times 10^{-4}$ Па и при температуре $-60\dots+250$ °С.

Графитол. Область применения: высокотемпературные узлы трения, преимущественно скольжения; горячие вентиляторы, петли и замки дверей сушильных камер и других промышленных механизмов ($T_p = -25\dots+160$ °С).

Аэрол. Область применения: подшипники тяговых цепей конвейеров в сушильных камерах, узлов трения раздаточных печей чугунолитейного и др. механизмов, работающих при повышенных температурах и нагрузках ($T_p = -25\dots+160$ °С).

Силикол. Область применения: малонагруженные подшипники качения горячих вентиляторов печей цементации и др. промышленных механизмов. Низкая испаряемость. Водостойкость. Морозостойкость ($T_p = -50\dots+160$ °С).

Полимоп. Область применения: подшипники качения тяжело нагруженных узлов трения. Беззольная, высокая термическая, механическая стабильности и хорошая водостойкость ($T_p = -50\dots+180$ °С).

БНЗ-4. Область применения: узлы трения, соприкасающиеся с парами воды и агрессивных веществ, вертикальные и наклонные узлы трения промышленных машин, подшипники конвейеров сушильных камер на заводах. Устойчива в присутствии паров воды и агрессивных сред ($T_p = -40\dots+160$ °С).

ПФМС-4С. Область применения: авиационные узлы трения, тихоходные подшипники качения, винтовые шариковые передачи, резьбы. $T_p = -30\dots+300$ °С, кратковременно до $+400$ °С.

Морозостойкие смазки

При более низких температурах и в маломощных механизмах следует закладывать низкотемпературные антифрикционные смазки (ЦИАТИМ-201) или многоцелевые антифрикционные смазки.

Эти смазки предназначены для механизмов, работающих при низких температурах (до -60 °С). Выпускается более 10 марок морозостойких смазок, из которых наибольшее распространение получили ЦИАТИМ-201, лита, зимол,МС-70, МУС-3А.

ЦИАТИМ-203. Область применения: зубчатые, червячные передачи редукторов, опоры скольжения и подшипники качения; силовые приводы,

винтовые пары, нагруженные редукторы, механизмы, эксплуатируемые на открытых площадках, узлы трения автомобилей. Превосходит ЦИАТИМ-201 ($T_p = -50...+100\text{ }^\circ\text{C}$).

ГОИ-54п. Область применения: малонагруженные узлы трения, в том числе механизмы артиллерийских орудий, консервация механизмов и приборов. Не изменяет свойств при хранении в течение 10 лет. Защищает металлические изделия от коррозии до 5 лет. ($T_p = -40...+50\text{ }^\circ\text{C}$).

Лита. Область применения: узлы трения машин и механизмов, эксплуатируемых под открытым небом, механизмы переносного инструмента с электрическим или механическим приводом. Высокая водостойкость, хорошие консервационные свойства, низкая механическая стабильность ($T_p = -50...+100\text{ }^\circ\text{C}$).

Зимол. Область применения: узлы трения любых типов транспортных средств и инженерной техники, эксплуатируемых в районах с особо холодным климатом. Всесезонная ($T_p = -50...+130\text{ }^\circ\text{C}$).

Химически стойкие смазки

ЦИАТИМ-205. Область применения: резьбовые и контактные соединения и уплотнения, работающие в агрессивных средах. Устойчива к воздействию концентрированных неорганических кислот, щелочей, аминов, гидразинов. Высокие водостойкость и защитные свойства. ($T_p = -60...+50\text{ }^\circ\text{C}$).

ВНИИНП-279. Подшипники качения и скольжения, резьбовые соединения, разъемы, клапаны и другие детали, работающие на воздухе и в агрессивных средах. Работоспособна на воздухе при температуре $-50...+150\text{ }^\circ\text{C}$, в агрессивных средах при $-50...+50\text{ }^\circ\text{C}$.

ВНИИНП-280 ($T_p = -60...+150\text{ }^\circ\text{C}$), ВНИИНП-282 ($T_p = -45...+150\text{ }^\circ\text{C}$). Область применения: подшипники качения, резьбовые соединения, шпиндели, подвижные резиновые уплотнения, работающие в агрессивных средах, в том числе в газообразном кислороде.

ВНИИНП-294, ВНИИНП-295. Область применения: сопряженные поверхности "металл-металл" и "металл-резина" в среде спиртов, глицерина, уксусной кислоты, аминов и гидразинов. Работоспособна на воздухе при температуре $-60...+150\text{ }^\circ\text{C}$, в агрессивных средах $-60...+50\text{ }^\circ\text{C}$.

ВНИИНП-298. Область применения: стеклянные и металлические подвижные соединения, работающие в вакуумных установках, термохимическая обработка металлов в агрессивных средах. Высокие адгезия и термостойкость, низкая испаряемость, хорошая влагостойкость и морозостойкость. Работоспособность в вакууме до $1,3 \times 10^{-5}$ Па и при температуре $-60...+250\text{ }^\circ\text{C}$.

Криогель. Область применения: узлы трения арматуры, работающей в контакте с кислородом и другими газами, находящимися в жидком состоянии, а также работающей в парообразных агрессивных средах. Работоспособна в резьбовых и других неподвижных соединениях при температуре $-200...+200$ °С, в узлах трения скольжения при температуре $-60...+200$ °С.

Редукторные смазки (полужидкие)

ЦИАТИМ-208. Область применения: тяжелонагруженные редукторы червячные и зубчатые передачи гусеничной техники. Водостойкая (Тр = $-40...+70$ °С).

Шахтол У, Шахтол-К. Область применения: зубчатые редукторы угледобывающих комбайнов. Высокая водостойкость, хорошие противоизносные и противозадирные свойства, удовлетворительная механическая стабильность (Тр = $-40...+70$ °С).

СТП-Л, СТП-З. Область применения: зубчатые передачи тяговых редукторов тепловозов. СТП-Л- летняя (Тр = $-5...+50$ °С); СТП-З- зимняя (Тр = $-50...+50$ °С).

ОЗП-1. Область применения: открытые зубчатые передачи мощных приводов вращающихся печей, кузнечно-прессового оборудования. Высокие адгезионные, консервационные свойства и водостойкость (Тр = $-5...+70$ °С).

Трансол-100, Трансол-200. Область применения: червячные редукторы и мотор-редукторы, имеющие максимальные удельные нагрузки в зацеплении (Тр = $-30...+130$ °С).

Трансол-РОМ. Область применения: легко- и средненагруженные редукторы металлургического и другого промышленного оборудования. Работоспособна при температуре $-30...+90$ °С, кратковременно до $+110$ °С.

Редуктол М, Редуктол. Область применения: высоконагруженные редукторы промышленного (в том числе металлургического) оборудования, зубчатые зацепления тяговых редукторов локомотивов и мотор-вагонного подвижного состава. Работоспособна при температуре $-40...+150$ °С и контактной нагрузке в зацеплении до 2,5 ГПа.

СКП-М. Область применения: средненагруженные зубчатые (цилиндрические и конические) редукторы с картерной системой смазки (Тр = $-30...+100$ °С).

ЛЗ-ПЖЛ-00. Область применения: шарнир равных угловых скоростей промежуточного вала автомобиля ВАЗ-21213 (Тр = $-40...+120$ °С).

Приработочные пасты

ВНИИНП-225. Область применения: подвижные и неподвижные

резьбовые соединения, тяжелонагруженные тихоходные узлы трения. Работоспособна при температуре $-60...+250$ °С (алюминиевые сплавы), $-60...+350$ °С (легированные стали), $-40...+300$ °С (малооборотные узлы трения).

ВНИИНП-232, Лимол. Облегчение сборки, приработка и смазывание подшипников скольжения, шарниров зубчатых и винтовых передач, тяжелонагруженных тихоходных узлов трения, резьбовых соединений. Противозадирная. Работоспособна при температуре $-50...+300$ °С.

Узкоспециализированные (отраслевые) смазки ***Смазки для электрических машин***

ВНИИНП-242. Область применения: подшипники качения судовых электрических машин горизонтального использования. Работоспособна при температуре в пределах $-30...+110$ °С и при влажности до 98 %.

ЛДС-1. Область применения: закрытые подшипники качения электродвигателей серии 4А, работающие при высоких средних нагрузках ($T_p = -50...+120$ °С).

ЛДС-3. Область применения: закрытые подшипники качения узлов трения электродвигателей серии А1 малошумного исполнения. Снижает шум при работе электромашин ($T_p = -50...+120$ °С).

ЭШ-176. Область применения: подшипники электрических машин горизонтального и вертикального исполнения, подшипники машин в целлюлозно-бумажной промышленности ($T_p = -25...+100$ °С).

СВЭМ. Область применения: подшипники качения мощных судовых электрических машин. Высокие механическая, термическая и антиокислительная стабильности, хорошая морозостойкость и низкая испаряемость. Вызывает набухание резин и оказывает вредное воздействие на окраску металлических деталей ($T_p = -50...+120$ °С).

Автомобильные смазки

ШРУС-4. Область применения: шарниры равных угловых скоростей полноприводных автомобилей и др. узлы трения. Низкая испаряемость ($T_p = -40...+120$ °С).

Фиол-2У. Область применения: игольчатые подшипники крестовин карданного вала автомобилей и другой наземной техники. Высокие антиокислительная, механическая и коллоидная стабильности, хорошие противоизносные и противозадирные характеристики, водостойкая ($T_p = -40...+120$ °С).

№ 158. Область применения: подшипники качения автотракторного оборудования, игольчатые подшипники карданных шарниров непостоянной угловой скорости ($T_p = -30...+110$ °С).

ЛЗ-31, ЛЗ-62. Область применения: подшипники качения закрытого типа на весь срок службы. Хорошие антиокислительная стабильность и антикоррозионные свойства, низкая испаряемость, высокие противоизносные свойства, при контакте с водой дисперсионная среда гидролизуется ($T_r = -40...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Железнодорожные смазки

ЖРО. Область применения: подшипники качения букс железнодорожных локомотивов, подшипники тяговых электродвигателей. Высокие водостойкость и противозадирные характеристики, обеспечивает без замены и пополнения 400000 км пробега электровозов и тепловозов. Работоспособна при температуре $-40...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кулисная ЖК. Область применения: гнезда трения кулисного механизма, соединения рессорного подвешивания. Невысокая водостойкость, хорошие адгезионные свойства. ($T_r = -30...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

ЖТ-72. Область применения: тормоза локомотивов при трении резины по металлу. Морозостойка; не вызывает набухания резиновых уплотнений автотормозных приборов ($T_r = -60...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$).

ЖР. Область применения: уменьшение бокового износа рельс на кривых участках пути и гребней бандажей колесных пар. Растворима в воде, низкая коллоидная стабильность ($T_r = -30...+80\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Морские смазки

АМС-1, АМС-3. Область применения: предотвращение коррозии механизмов кораблей, подводных лодок, гидросамолетов. Работоспособны при температурах $-15...+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ (АМС-1) и $0...+75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (АМС-3).

МС-70. Область применения: подшипники качения и скольжения, непосредственно соприкасающиеся с морской водой. Высокие водостойкость, консервационные свойства и морозостойкость; обеспечивает периодическую работу механизмов в течение 10 лет. Работоспособна при температуре $-45...+65\text{ }^{\circ}\text{C}$, в мощных механизмах – от $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$.

МУС -3А. Область применения: высоконагруженные узлы трения, работающие в контакте с морской водой. Морозостойкая. Работоспособна при температуре от -50 до $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

МЗ. Область применения: узлы трения, работающие в контакте с морской водой. Хорошая коллоидная и удовлетворительная механическая стабильности; морозостойкая, рабоче-консервационная. Работоспособна при температуре от -50 до $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Авиационные смазки

Эра. Область применения: подшипники качения и скольжения, зубчатые передачи систем управления самолетов ($T_r = -60...+120\text{ }^{\circ}\text{C}$).

АТЛАНТА. Область применения: узлы трения скольжения, работающие при высоких знакопеременных нагрузках, игольчатые и винтовые механизмы. Морозостойкая, водостойкость; работоспособна при остаточном давлении 666,5 Па и температуре $-60...+150$ °С.

Сапфир (ВНИИНП-261). Область применения: конические роликовые подшипники ступиц колес шасси летательных аппаратов. Высокие термостойкость, механическая и антиокислительная стабильности (Тр = $-40...+150$ °С, кратковременно до $+200$ °С).

СЭДА. Область применения: скоростные агрегатные слабонагруженные подшипники некоторых самолетов. Хорошие смазывающие и низкотемпературные свойства, низкая испаряемость, водостойкость, вызывает набухание резины на основе нитрильных и силиконовых каучуков (Тр = $-60...+120$ °С).

Свинцоль 01. Область применения: тяжело нагруженные узлы трения некоторых самолетов и вертолетов. Нерастворима в воде, токсичная (Тр = $-60...+90$ °С).

НК-50. Область применения: подшипники ступиц шасси самолетов. Низкие водо- и морозостойкость (Тр = $-15...+120$ °С).

№9. Область применения: специфические узлы трения. Морозостойкая, консервационные свойства и водостойкость удовлетворительные антиокислительная и коллоидная стабильности низкие (Тр = $-60...+80$ °С).

Индустриальные смазки

Униол-2М/2. Область применения: узлы трения металлургического и горнообогатительного оборудования с системами централизованной подачи смазки. Высокая термостойкость, хорошие противозадирные характеристики и прокачиваемость, влагуупрочняется при хранении (Тр = $-30...+160$ °С).

ИП-1 (Л, З). Область применения: подшипники металлургического оборудования с централизованной подачей смазки. Работоспособна при температуре $0...+70$ °С (Л) и $-10...+70$ °С (З).

ЛКС-2. Область применения: подшипниковые узлы главных шпинделей металлорежущих станков, оснащенных как шариковыми, так и роликовыми подшипниками (Тр = $-40...+150$ °С).

ЛКС- металлургическая. Область применения: применяется в подшипниках качения металлургического оборудования. Работоспособна при температуре $-30...+150$ °С, кратковременно до $+170$ °С.

Прессол М. Область применения: для смазывания узлов трения кузнечно-прессового и другого средне- и тяжело нагруженного промышленного оборудования с централизованной системой подачи смазки (Тр = $-20...+120$ °С).

Сиол. Область применения: скоростные подшипники электроверетен и нажимных валиков прядильных машин, работающие при частотах до 16000 мин⁻¹. Высокие термо- и водостойкость; удовлетворительные консервационные свойства. Работоспособна при температуре -20...+120 °С.

ВНИИНП-273. Область применения: подшипники качения и скольжения, шариковинтовые передачи, реечные и винтовые приводы, резьбовые соединения, работающие в условиях воздействия радиации. Работоспособна при температуре в пределах -20...+120 °С.

Ротационная ИР. Применяется в узлах трения ротационных машин. Работоспособна при температуре -15...+65 °С.

Термолита. Область применения: подшипники букс чугуновозов, шлаковозов, сталевозов, подшипники агломашин и других узлов металлургического оборудования, работающих в условиях экстремальных температур. По реологическим свойствам занимает промежуточное положение между смазками и пастами. (Тр = 0...+500 °С).

Омметтерма-2, Омметсупертерма. Применяется в подшипниках качения металлургического и другого промышленного оборудования. Стойкая к действию воды и водяного пара. Сохраняет работоспособность при температуре -20...+180 °С, кратковременно до +200°С. Применяется как закладная.

Буровые смазки

Долотол Н. Область применения: шарошечные долота с негерметизированными опорами качения и скольжения. Высокие механическая, коллоидная и антиокислительная стабильности, водостойкость, противозадирные и консервационные характеристики. Работоспособна при температуре -20...+130°С.

Долотол АУ. Область применения: шарошечные долота с герметизированной опорой скольжения (Тр = -30...+220°С).

Долотол НУ. Область применения: шарошечные долота с герметизированными опорами качения и скольжения (Тр = -30...+110°С).

Геол-1. Область применения: нанесение на поверхность бурильных труб и керноприемных устройстве для высокооборотного геологоразведочного бурения. Водостойкая, консервационная и противозадирная (Тр = -10...+60 °С).

Пластол. Область применения: шарошечные долота высокооборотных бурильных механизмов с негерметизированными опорами качения и скольжения. Высокие механическая, коллоидная и антиокислительная стабильности, водостойкость, триботехнические и консервационные характеристики. Работоспособна при температуре -20...+130°С.

Электроконтактные смазки

ВНИИНП-248. Область применения: скользящие электрические контакты проволочных резисторов. Мягкая консистенция, высокое удельное сопротивление, хорошие морозо-, термо- и водостойкости (Тр = $-60...+200$ °С).

ВНИИНП-502. Область применения: слаботочные электрические контакты модульных переключателей. Электроконтактная, высокие водостойкость, адгезия, механическая стабильность и консервационные свойства. (Тр = $-40...+100$ °С).

Электра-1. Область применения; скользящие контакты типа "кольцо-щетка" коллекторного узла вращающихся трансформаторов. Высокая термическая стабильность, хорошие противоизносные характеристики и водостойкость, большой срок службы при переходном сопротивлении менее 0,1 Ом (Тр = $-40...+120$ °С).

Консервационные (защитные) смазки

Пушечная (ПВК). Область применения: защита от коррозии металлических изделий, предотвращение ржавления изделий из черных и цветных металлов, консервация металлических изделий и механизмов. Высокие адгезионные и консервационные свойства, водостойкость, удерживается на наклонных и вертикальных поверхностях. (Тр = $-50...+50$ °С).

ВНИИСТ-2. Область применения: изоляция наземных трубопроводов. Полужидкая, морозостойкая (Тр + $-60...+40$ °С).

ВТВ-1. Область применения: предотвращение окисления клемм аккумуляторов автомобилей, консервация металлических изделий и наружных поверхностей механизмов при транспортировании или длительном хранении. Высокие водостойкость, адгезионные и консервационные свойства, хорошая морозостойкость (Тр = $-40...+45$ °С).

ВТВ-1, аэрозольная упаковка. Область применения: консервация неокрашенных и декоративных металлических поверхностей, клемм аккумуляторов, замков автомобилей и т.п. Рабочая температура в пределах от -40 до $+50$ °С.

ЗЭС. Область применения: защита от коррозии грозозащитных тросов и арматуры высоковольтных линий электропередач, машин механизмов, хранящихся и эксплуатируемых на открытом воздухе. (Тр до $+80$ °С).

ПН. Область применения: смазывание малокалиберных спортивных патронов (Тр = $-30...+50$ °С).

Канатные смазки и пропиточные составы

Канатная 39У. Область применения: рудничные и буровые канаты, тросы, подъемно-транспортные машины. Хорошие водостойкость, адгезия к металлу, консервационные свойства. Рабочая температура от -25 до $+50$ °С.

БОЗ-1. Область применения: стальные канаты при их изготовлении. Хорошие адгезия к металлу, водостойкость и консервационные свойства ($T_p = -20...+50$ °С).

Торсиол-35Э. Область применения: смазывание стальных канатов различного назначения при их эксплуатации. Водо- и морозостойкая ($T_p = -35...+50$ °С).

Ваерол. Область применения: стальные канаты промышленных и грузоподъемных устройств морских судов при их изготовлении. Высокие адгезия к металлам, водостойкость, защитные свойства и антифрикционные характеристики. Рабочая температура изменяется в пределах от -30 до $+50$ °С.

Канатол. Область применения: стальные канаты в процессе их изготовления. Защищает от изнашивания и коррозии. Рабочая температура: $-35...+50$ °С.

Е-86. Область применения: пропитка органических сердечников стальных канатов общего назначения. Высокие адгезионные, консервационные и антифрикционные характеристики, водостойкость. Рабочая температура: $-35...+50$ °С.

ЛЗ-Е-91. Область применения: пропитка органических сердечников стальных канатов; смазывание контактирующих с сердечником проволок канатов. Рабочая температура: -35 до $+50$ °С.

Уплотнительные (резьбовые) смазки

Р-2. Область применения: резьбовые соединения обсадных и насосно-компрессорных труб буровых скважин. Хорошие водо- и морозостойкость. Рабочая температура: -30 до $+50$ °С.

Р-402. Область применения: резьбы обсадных труб газоконденсатных скважин и насосно-компрессорных труб любого диаметра. Водостойкая, токсичная. Рабочая температура: -50 до $+200$ °С.

ВНИИНП-291. Область применения: герметизация кранов, находящихся в системах подачи хозяйственно-питьевой воды. Хорошие водостойкость и коллоидная стабильность, нерастворима в нефтепродуктах ($T_p = -50...+200$ °С).

Замазка вакуумная. Область применения: уплотнение разборных, но неподвижных соединений вакуумных установок. Водостойкая ($T_p = -10...+40$ °С).

ЛЗ-162. Область применения: прямоточные задвижки и пробковые

краны фонтанирующих нефтяных и газовых скважин при давлении в забое до 100 Мпа. Растворима в углеводородах и не растворима в воде ($T_r = -25 \dots +130 \text{ }^\circ\text{C}$).

Насосная. Область применения: сальниковые уплотнения нефтяных и грязевых насосов высокого давления буровых установок. Водостойкая, нерастворима в углеводородах, спиртах, глицерине и т.п. ($T_r = -20 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$).

Кранол. Область применения: арматура газовых магистралей, газораспределительных и компрессорных станций при давлении до 7,5 МПа.

Арматол -238. Область применения: герметизация запорных устройств устьевого нефтепромыслового оборудования нефтяных и газовых месторождений. Мало растворима в жидких и газообразных углеводородах, частично растворяется в бензине ($T_r = -50 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$).

Смазка 1-13. Смазывание узлов трения качения и скольжения механизмов и машин. Применяется для подшипников электродвигателей, ступиц колес автомобилей и др.

Консталин. Область применения: смазывание узлов трения вентиляторов литейных машин, доменных и цементных печей, подшипников качения на железнодорожном транспорте и др. Водостойкость низкая. Работоспособна при температуре $-40 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$.

Литин-2. Применяется для смазывания игольчатых подшипников в карданных шарнирах и других узлах автомобилей. Работоспособна при температуре $-4 \dots +120 \text{ }^\circ\text{C}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аксютенков, В.Т.** Опоры возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами / В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков // Вестник БГТУ, № 2(22). – Брянск, 2009. № 2(22). – С. 49...52.

2. **Аксютенков, В.Т.** Расширение диапазона характеристик в опорах с высшими кинематическими парами / В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков // Вестник БГТУ. – Брянск, 2010. – №1(25). – С. 31...35.

3. **Аксютенков, В.Т.** Буксовая направляющая с элементами качения./В.Т. Аксютенков, А.В. Титенок, А.К. Тимаков // Вестник БГТУ. – Брянск, 2010. – №4(28). – С. 50...54.

4. **Белова, Т.И.** Обеспечение эксплуатационной безопасности тягово-приводных МТА / Т.И. Белова, А.П. Лапин. Орел: ФГБОУ ВПО "Госуниверситет УНПК", 2011. – 352 с.

5. **Васильева, Л.С.** Автомобильные эксплуатационные материалы: Учеб. для вузов. Изд. 2-е / Л.С. Васильева - М.: Наука-Пресс, 2004. - 421 с.

6. **Гаевик, Д.Т.** Справочник смазчика / Д.Т. Гаевик. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

7. **Евдокимов, Б.П.** Эксплуатационные материалы [Электронный ресурс]: учебное пособие: самот. учеб. электрон. изд. / Б. П. Евдокимов; Сыкт. лесн. ин-т. – Электрон. дан. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – Режим доступа: <http://lib.sfi.komi.com>. – Загл. с экрана.

8. **Кузнецов, А.В.** Топливо и смазочные материалы / А.В. Кузнецов. – М.: Колос, 2005. –199 с.

9. **Мышкин, Н.К.** Трение, смазка, износ / Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. – 368 с.

10. **Погонышев, В.А.** Триботехника в сельском хозяйстве / В.А. Погонышев, Н.А. Романеев, М.В. Панов. – Брянск: Изд-во Брянской ГСХА, 2010. – 480 с.

11. **Титенок, А.В.** Механическое контактное взаимодействие поверхностей деталей машин: монография / А.В. Титенок. – Брянск, ГУП "Брянск. обл. полигр. объединение", 2007. – 72 с.

12. **Титенок, А.В.** Трение и смазка деталей машин: учеб. пособие / А.В. Титенок. – Брянск: БГТУ, 2009. – 144 с.

13. **Титенок, А.В.** Эксплуатационные материалы для подъемнотранспортной, строительной и дорожной техники: учеб. пособие / А.В. Титенок. – Брянск: БГТУ, 2013. – 112 с.

14. **Титенок, А.В.** Обеспечение долговечности узлов трения технологических, грузоподъемных и транспортных машин: монография / А.В. Титенок. – Брянск: БГТУ, 2013. – 141 с.
15. **Титенок, А.В.** Прибор для исследования коэффициента трения / А.В. Титенок. - Брянск: ЦНТИ, 1990. - ИЛ № 312.
16. **А.В. Титенок.** Законы и гипотезы в технике //Международн. научн. - техн. конф. "Износостойкость машин". Тез. докл. - Брянск, 1994.- С. 43.
17. **Титенок, А.В.** Гидромеханическая разгрузка подшипника скольжения // Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 4. - М, 1994. - С. 16.
18. **Титенок, А.В.** Гипотеза о макромеханизме внешнего трения // Циклы природы и общества. Вып. 3, 4. - Ставрополь: СтУ, 1995. - С. 146...148.
19. **Титенок, А.В.** Классификация транспортно-технологических процессов //Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 1, 1994. С. 30, 31.
20. **Титенок, А.В.** Материализация технических объектов //Циклы природы и общества. Матер. 3-й Междунар. конф. Вып. 1,2. Ставрополь: СтУ, 1995. С. 257...263.
21. **Титенок, А.В.** Законы и закономерности цивилизованной антропогенной системы /Наука и образование возрождению сельского хозяйства России в XXI веке. Материалы международной научн.-практич. и учебно-методич. конференции. Брянск, 2000. С. 458...463.
22. **Титенок, А.В.** Экспертная система информационного проектирования новшеств //Управление изменением, № 1, 2001. С. 15...38.
23. **Титенок, А.В.** Проблема незавершенности цикла // Циклические процессы в природе и обществе. Матер. 2-й Междунар. конф. Вып. 2.– Ставрополь: Изд-во СтУ, 1994.– С. 122.
24. **Титенок, А.В.** Классификация транспортно-технологических процессов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. № 1, 1994.– С. 30, 31.
25. **Титенок, А.В.** Теория развития систем – основа качественной продукции // Проблема повышения качества машин. Тез. докл. Международной научно-технич. конф.– Брянск, 1994.– С. 172, 173.
26. **Титенок, А.В.** Гипотезы, законы и методы в творческой деятельности: монография.– Брянск: БГСХА, 1996.– 118 с., ил.
27. **Титенок, А.В.** Элементы теории совершенствования техники. Брянск: БГСХА, 1997.– 32 с., ил.
28. **Титенок, А.В.** Принципы разрешения агроэкологических проблем / Актуальные проблемы экологии на рубеже третьего тысячелетия и пути их разрешения. Ч.2. Материалы международной научной конференции.– Брянск: БГСХА, 1999.– С. 495...498.

29. **Титенок, А.В.** Совершенствование средств механизации сельскохозяйственного производства в России: монография.– Брянск: БГСХА, 1999.– 434 с., ил.

30. **Титенок, А.В.** Техническая эволюция // Состояние, проблемы и перспективы автоматизации технической подготовки производства на промышленных предприятиях. Материалы научн.-практ. конф.– Брянск: БГТУ, 2000.– С. 90.

31. **Титенок, А.В.** Развитие механизации сельского хозяйства в России. Дисс. д.т.н. 07.00.10. – История науки и техники.– Москва: ИИЕиТ РАН, 2002.– 448 с., ил.

32. **Титенок, А.В.** История механизации посевных работ / Проблемы природообустройства и экологической безопасности. Материалы ХУІ межвузовской конференции.– Брянск: БГСХА, 2003.– С. 16...26.

33. **Титенок, А.В.** Исторические закономерности развития техники // А.В. Титенок, И.А. Титенок. Проблемы современного антропогенного сознания. Сб. статей. Вып. 3.– Брянск: БГУ, 2005.– С. 83...95.

34. **Титенок, А.В.** Анализ и экспертиза транспортно-технологических процессов / Технические, экономические и экологические проблемы транспорта: Материалы международной конференции.– Брянск, 2008. С. 67...79.

35. **Титенок, А.В.** Инновационная система для производственного процесса // Вестник БГТУ, № 4(20).– Брянск: БГТУ, 2008. – С. 90...98.

36. **Троицкий, С.Н.** Топлива, смазочные материалы и технические жидкости для строительных машин / С.Н. Троицкий. – М.: Изд-во АСВ, 2010. 96 с.

37. **Шульц, В.В.** Форма естественного износа деталей машин и инструмента / В.В. Шульц. – Л.: Машиностроение, 1990. – 208 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
РЕТРОФРАГМЕНТЫ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ	4
РАЗВИТИЕ УЧЕНИЯ О ФАКТИЧЕСКИХ ПЛОЩАДЯХ КОНТАКТА	11
1. МАКРОМЕХАНИЗМ ВНЕШНЕГО ТРЕНИЯ: ИНЖЕНЕРНЫЙ АНАЛИЗ	20
1.1. Неподвижный контакт двух тел.....	21
1.2. Непосредственное скольжение двух тел.....	23
1.3. Трение качения.....	31
1.4. Избирательный перенос при трении.....	32
2. МЕХАНИЗМ ИЗНОСА КОНТАКТИРУЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ	35
2.1. Элементарные понятия	35
2.2. Факторы, влияющие на изнашивание поверхности деталей машин	41
2.3. Предельные износы	41
3. СМАЗКА	45
3.1. Влияние смазки на поверхностное изнашивание	45
3.2. Макромеханизм жидкостного трения	46
3.3. Вязкость	49
3.4. Измерение вязкости	52
3.5. Виды смазки	55
3.5.1. Гидродинамическая смазка	58
3.5.2. Упруго-гидродинамическая смазка	69
3.5.3. Граничная смазка	72
3.6. Механизм смазки	75
4. СИСТЕМЫ СМАЗКИ	79
5. СМАЗКА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ ПТМ	90
5.1. Назначение смазки для ПТМ	90
5.2. Подшипники скольжения	91
5.3. Подшипники качения	91
5.4. Зубчатые и червячные передачи	92
5.5. Зубчатые муфты	93
5.6. Стальные канаты	93
5.7. Цепные передачи и тяговые цепи	101
5.8. Крановые колеса и рельсы	102
5.9. Техническая документация на смазку	102

5.10. Техника смазки и смазочное хозяйство	103
5.11. Замена смазочных материалов	103
5.12. Смазка грузоподъемных машин	104
5.13. Сбор и утилизация отработанных масел	106
5.14. Организация смазочного хозяйства	107
5.14.1. <i>Пример схемы и организации процесса смазки технологического оборудования.....</i>	109
6. КОНСТРУКТИВНЫЕ СПОСОБЫ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА.....	117
6.1. Опоры возвратно-поступательного движения с высшими кинематическими парами	117
6.2. Расширение диапазона характеристик в опорах с высшими кинематическими парами.....	122
6.3. Буксовая направляющая с элементами качения.....	129
6.4. Основы теоретических исследований.....	129
6.4.1. Расчет и проектирование буксового узла.....	133
7. УЧЕТ ЕСТЕСТВЕННОГО ИЗНОСА ДЕТАЛЕЙ МАШИН.....	135
СНИЖЕНИЕ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ МАШИН.....	138
8. ПРОИЗВОДСТВО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	139
8.1. Нефть.....	144
8.2. Переработка нефти.....	150
8.2.1. Получение топлив прямой перегонкой.....	150
8.2.2. Вторичная переработка нефти	152
8.3. Очистка топливных дистиллятов и получение бензинов.....	159
1.4. Получение масел.....	159
9. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТОПЛИВАХ.....	161
9.1. Нефтяные топлива.....	161
9.1.1. Автомобильные бензины.....	161
9.1.2. Дизельное топливо.....	166
9.1.3. Импортные жидкие топлива.....	169
9.2. Альтернативные виды топлив.....	174
10. СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ	187
10.1. Производство смазочных материалов в 20-м веке...	187
10.2. Классификация смазочных материалов.....	190
10.3. Жидкие смазочные материалы	192
10.3.1. Характеристика жидких смазочных материалов..	193
10.3.1.1. <i>Моторные масла.....</i>	192
10.3.1.2. <i>Трансмиссионные масла.....</i>	214
10.3.1.3. <i>Индустриальные масла.....</i>	225

10.3.1.4. Компрессорные масла.....	227
10.3.1.5. Электроизоляционные масла.....	231
10.3.1.6. Консервационные масла.....	232
11. РАБОЧИЕ ЖИДКОСТИ.....	234
11.1. Масла для гидромеханических передач (ГМП).....	234
11.2. Рабочие жидкости для гидравлических систем	236
11.2.1. Гидравлические масла (ГМ)	236
11.2.1.1. Классификация и обозначение ГМ.....	240
11.3. Тормозные жидкости	245
11.4. Амортизационные жидкости	248
11.5. Пусковые жидкости	249
11.6. Охлаждающие жидкости.....	250
12. ПЛАСТИЧНЫЕ СМАЗОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	255
13. ПРИСАДКИ К СМАЗОЧНЫМ МАТЕРИАЛАМ	270
СПРАВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ.....	277
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	292

Научное издание

Александр Владимирович Титенок

Игорь Александрович Титенок

СНИЖЕНИЕ ТРИБОНАПРЯЖЕННОСТИ
ТРАНСПОРТИРУЮЩЕЙ И СПАСАТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ

Редактор издательства Павлютина И.П.
Компьютерный набор А.В. Титенок



Подписано в печать 21.03.2016. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л.14,99. Тираж 550 экз. Изд. №4983.

Издательство Брянского государственного аграрного университета
243365, с. Кокино, Выгоничского р-на, Брянской обл., БГАУ