

Л.В. Таланов

Смазка авиационного двигателя

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 656
ББК 39.1
Л11

Л11 **Л.В. Таланов**
Смазка авиационного двигателя / Л.В. Таланов – М.: Книга по Требованию, 2021. – 218 с.

ISBN 978-5-458-38395-0

Смазка авиационного двигателя

ISBN 978-5-458-38395-0

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Из этого можно сделать вывод, что добавочный груз q уравновешивает силу трения.

На основании подобного опыта была выведена следующая зависимость между коэффициентом трения μ_1 , давлением на каток N и движущей силой P (равной и прямо противоположной силе трения) и диаметром катка D .

$$\mu_1 = P \frac{D}{N} \frac{\text{кгм}}{\text{кг}},$$

где

$$N = 2Q + q \text{ кг}$$

$$p = q \text{ кг}$$

$$D = 2 r \text{ м.}$$

Из вышеприведенного уравнения можно получить силу трения

$$P = \mu_1 \frac{N}{D}.$$

Отсюда можно сделать заключение, что сила трения качения:

- 1) прямо пропорциональна нормальному давлению (N),
- 2) обратно пропорциональна диаметру катка,
- 3) зависит от материала соприкасающихся тел и от их обработки (так как от этого зависит величина коэффициента трения μ_1).

В отношении размерности коэффициента трения качения, необходимо обратить внимание, что он выражается в единицах длины.

Это существенно отличает рассматриваемый коэффициент от коэффициента трения скольжения, который является величиной отвлеченной.

На табл. 2 приводятся средние значения коэффициента трения качения для различных условий качения.

Таблица 2. Значение коэффициента трения качения

Условия качения	Коэффициент трения в сантиметрах
1. Дерево по дереву	0,48—0,81
2. Чугун по дереву	0,046
3. Железо по железу и сталь по стали в механизмах	0,005
4. Колеса со стальными или железными бандажами по рельсам	0,05
5. Тачка по деревянному настилу	0,04—0,06
6. Железный обод по шоссе (езда шагом)	0,185
7. " " " " (езда рысью)	0,238
8. " " " обыкновенной мостовой	0,634
9. Резиновая шина по твердому шоссе	0,24
10. Дерево по гладкой мостовой	0,74

В шариковых и роликовых подшипниках трение обычно не зависит от смазки и оно бывает обычно ниже, чем у лучших подшипников скользящего типа.

На табл. 3 даются приблизительные величины коэффициента трения.

Таблица 3. Приблизительные величины коэффициента трения

Условия трения	Коэффициент трения	
	Пределы	Среднее значение
Трение скольжения		
1. Не смазываемые или очень слабо смазанные поверхности	0,1 — 0,4	0,16
2. Полусухое трение	0,01 — 0,1	0,03
3. При полной смазке (жидкостное трение)	0,002 — 0,01	0,006
Трение качения		
4. Для шариковых подшипников	0,001 — 0,003	0,002
5. Для роликовых подшипников	0,002 — 0,007	0,005

Значения коэффициентов трения, приведенные в этой таблице, являются кинетическими величинами, относящимися к поверхностям, находящимся в движении.

СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ СОБОЙ ТРЕНИЯ СКОЛЬЖЕНИЯ И ТРЕНИЯ КАЧЕНИЯ

Из сопоставления между собой обоих видов трения можно вывести заключение, что условия работы материала в обоих случаях различны.

При скольжении точки одного тела перемещаются относительно соприкасающихся с ними точек другого тела. При качении же можно допустить¹, что соприкасающиеся частицы не перемещаются одна относительно другой.

Отсюда можно сделать вывод, что изнашивание трущихся поверхностей больше в первом случае, чем во втором.

Самая же существенная разница заключается в потере энергии, которую влечет за собой каждый из обоих видов трения.

Рассмотрим это на примере.

Пусть металлический цилиндр диаметром в 1 см вращается в подшипнике и подвергается действию нагрузки Q .

Сила трения в этом случае составит, если принять среднее значение коэффициента трения в цапфах $\mu = 0,075$;

$$F_1 = \mu_1 Q = 0,075 Q.$$

Пусть тот же цилиндр катится, тогда сила трения составит:

$$F_2 = \mu_2 \frac{Q}{D}.$$

¹ Исследования показывают, что некоторое скольжение имеет место и при качении, но очень незначительное.

Приняв обычное значение коэффициента трения качения равным $\mu_2 = 0,005$ см, получим:

$$F_2 = \frac{0,005 Q}{1} = 0,005 Q.$$

Таким образом ясно видно, что движущая сила, приложенная к окружности цилиндра, в первом случае больше в $\frac{0,075}{0,005} = 15$ раз, чем во втором.

Само собой понятно, что это отношение движущих сил не остается постоянным, так как F_2 зависит от диаметра катящегося ролика.

Благодаря экономии в расходе энергии, которую дает трение качения по сравнению с трением скольжения, им охотно пользуются во всех случаях машиностроения. После сказанного легко понять, почему шариковые и роликовые подшипники выгоднее по сравнению с обыкновенным скользящим подшипником.

Для примера приведем коэффициенты трения соответствующих подшипников.

Для шарикового подшипника со стальными закаленными шариками коэффициент трения, как показали опыты, составляет $\mu_2 = 0,0015$, чему соответствует сила трения

$$F_2 = \mu_2 Q = 0,0015 Q,$$

где Q — нагрузка на подшипник.

Для подшипника скользящего типа коэффициент трения $\mu_1 = 0,06$ — — 0,08.

Чему соответствует сила трения:

$$F_1 = \mu_1 Q = 0,06 Q.$$

Откуда сила трения в обыкновенном подшипнике больше силы трения в шариковом подшипнике в

$$\frac{0,06}{0,0015} = 40 \text{ раз.}$$

СУХОЕ ТРЕНИЕ

Сухое трение происходит между двумя движущимися твердыми поверхностями, когда между ними отсутствует какое-либо промежуточное смазочное вещество.

Основные законы сухого трения были установлены в конце XVIII столетия (1781 г.) Кулоном.

Из опытов, производившихся им на вышеописанных приборах, были определены коэффициенты трения для различных материалов и установлены следующие законы:

- 1) сила трения в покое больше, чем в состоянии движения;
- 2) сила трения прямо пропорциональна нагрузке на трущиеся поверхности;
- 3) сила трения не зависит от величины трущихся поверхностей (если последние не слишком малы);
- 4) сила трения не зависит от скорости движения одной поверхности относительно другой;

5) сила трения зависит от состояния трущихся поверхностей, а именно: трение между гладкими и шлифованными поверхностями меньше, чем между шероховатыми поверхностями, и меньше между разнородными металлами, чем между однородными металлами.

Эти законы относятся к трению скольжения и качения.

Введением промежуточного вещества между трущимися поверхностями, твердого (например графит, тальк) или жидкого маслянистого, сухое трение может быть превращено в полусухое, полужидкостное или жидкостное.

К трению качения (шариковые и роликовые подшипники) эти положения не относятся.

ПОЛУСУХОЕ И ПОЛУЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ

Полусухое и полужидкостное трение являются видами трения скольжения.

Полусухое трение происходит в том случае, когда поверхности тел смочены каким-либо смазочным веществом; при этом непосредственное соприкосновение частиц твердых тел происходит между собой на большей части поверхности трения и лишь местами поверхности твердых тел разделены тончайшим слоем смазочного вещества.

Полужидкостное трение происходит при смазанных поверхностях твердых тел в том случае, когда на большей части поверхности трения твердые тела разделены хотя бы тончайшим слоем смазки и лишь местами этот слой смазки вытеснен и твердые тела прикасаются непосредственно.

Полусухое трение приближенно подчиняется законам Кулона. Полужидкостное трение частично подчиняется закону Кулона, частично же законам жидкостного трения.

Строгой разницы между полусухим и полужидкостным трением не существует; оба вида трения надо рассматривать как промежуточные между жидкостным и сухим.

Полусухое трение допустимо лишь в моменты трогания с места, т. е. в моменты, когда относительная скорость трущихся поверхностей еще близка к нулю и смазка не успела расположиться по всей поверхности.

Когда поверхности находятся некоторое время в покое, то масляный слой более или менее выжимается, и тогда возникнет некоторое соприкосновение металлических поверхностей между собой. В результате этого усилие, потребное для приведения в движение машины, значительно больше, чем для получения того же эффекта во время движения; в действительности коэффициент трения покоя значительно больше, чем в состоянии движения, и весьма приближается к значению при сухом трении.

Если скорость трущихся поверхностей очень мала, то величина кинетического коэффициента трения может быть даже больше, чем статического значения, так как в этом случае к сухому трению прибавляется еще сопротивление, создаваемое присутствием смазки, ибо скорость столь мала, что смазка не может создать сколько-нибудь существенного разделения трущихся поверхностей. Когда скорость увеличивается и смазка начинает занимать сплошной слой, сухое трение быстро уменьшается и кинетический коэффициент тоже уменьшается, до тех пор пока не образуется постоянный слой смазки.

Высокой величиной статического коэффициента трения объясняется большое усилие, требующееся при запуске двигателя для проворачивания коленчатого вала. Это является одним из оснований для употребления шариковых и роликовых подшипников.

Коэффициент трения покоя зависит главным образом от:

- 1) состояния и твердости поверхностей—он ниже для твердых и гладких поверхностей, чем для мягких и шероховатых;
- 2) давления между поверхностями—чем больше давление, тем сильнее выдавливание смазки;
- 3) продолжительности пребывания поверхностей в состоянии покоя—чем больше была остановка, тем больше вероятия выжимания смазки
- 4) природы смазки.

Твердые смазки, подобные графиту, не выжимаются от давления.

Полужидкие смазки не могут вытесняться совершенно давлением поверхностей на время остановки, это представляет их большое преимущество по сравнению с маслами, что может иметь иногда важное значение.

Минеральные масла вытесняются почти совершенно, но опыт показывает, что растительные и животные масла или компаундированные с последними минеральные масла оставляют тонкую пленку между поверхностями и что поэтому статический коэффициент трения у таких масел значительно ниже, чем у чистых минеральных масел.

В результате не только уменьшается пусковое усилие, но и понижается изнашивание, зависящее от истирания металла в первые моменты после пуска в ход.

Полужидкостное трение встречается в условиях малой скорости движения и больших давлений; в некоторых случаях при невозможности придания детали иной конструкции с полужидкостным трением приходится мириться.

В стабильном состоянии нормально во всех трущихся частях двигателя должно иметь место жидкостное трение.

ЖИДКОСТНОЕ ТРЕНИЕ

Жидкостное трение происходит тогда, когда между трущимися поверхностями имеется смазочный слой, разделяющий поверхности настолько, что между ними нет абсолютно никакого соприкосновения и масляная пленка при любых условиях рабочих скоростей, давлений и температур не выжимается.

Законы, которым подчиняется жидкостное трение, совершенно иные, чем законы сухого трения. Они отличаются от перечисленных выше законов тем, что в них *будут участвовать скорости перемещения поверхностей и величины площадей трущихся поверхностей*. В результате испытаний были найдены следующие законы трения смазанных поверхностей:

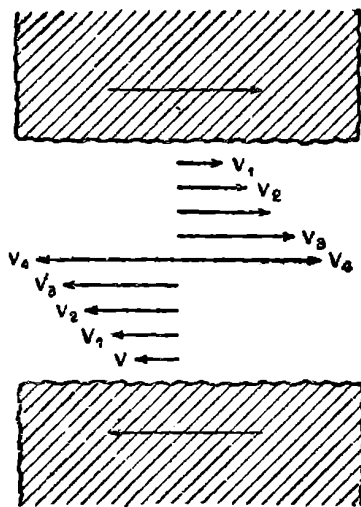
- 1) сила трения прямо пропорциональна площади слоя смазочного материала;
- 2) сила трения пропорциональна линейной скорости относительного движения двух смазываемых поверхностей;
- 3) сила трения обратно пропорциональна толщине смазочного слоя;

4) сила трения практически не зависит от давления, производимого на слой смазочного вещества, если только слой будет постоянной площади, толщины и вязкости;

5) сила трения прямо пропорциональна вязкости масла, применяемого для смазки;

6) потеря смазочного материала, вытекающего из пространства между движущимися частями, прямо пропорциональна давлению на единицу площади и обратно пропорциональна вязкости (особенно при больших зазорах в подшипниках); при смазанных поверхностях трение зависит исключительно от трения частиц масла. Коэффициент трения при этом получается значительно меньше, чем в случае сухого или полусухого трения.

При жидкостном трении наблюдается следующее явление: слои масла, находящиеся в непосредственном соприкосновении с поверхностями, на-



Черт. 3. Относительные скорости слоев при смазке.

ходятся в покое, а отстоящие от них последующие слои двигаются тем быстрее, чем ближе они к середине масляного слоя. Наибольшей относительной скоростью обладают два слоя, расположенные по обе стороны от средней линии и двигающиеся в противоположные стороны (черт. 3).

Состояние жидкостного трения надо признать идеальным. Нормально приходится сталкиваться с полужидкостным трением, когда поверхности трения разделены тончайшим слоем смазки, но местами этот слой жидкости вытеснен и поверхности все же соприкасаются непосредственно.

Характер жидкостного трения существенно отличен от сухого трения. Если при сухом трении износ весьма значительный, то при жидкостном трении он почти совершенно отсутствует. Если при сухом трении

затрата энергии на преодоление трения весьма значительна, то при жидкостном трении она составляет 10% сухого трения. При сухом трении температура трущихся тел повышается иногда настолько, что тела твердые начинают плавиться; при жидкостном трении нагревание трущихся поверхностей весьма незначительно.

Проф. Петров (1883 г.) первый нашел формулу для жидкостного трения применительно к трущимся поверхностям в машинах.

Основная формула проф. Петрова выражается в следующем виде:

$$\mu = \frac{ZV}{\left(h + \frac{z}{\lambda_1} + \frac{z}{\lambda_2}\right) p_m},$$

где μ — коэффициент трения,

Z — абсолютная вязкость смазочной жидкости или коэффициент внутреннего трения этой жидкости,

V — относительная скорость трущихся поверхностей,

h — толщина масляного слоя между трущимися поверхностями твердых тел,

λ_1 и λ_2 — коэффициенты внешнего трения, т. е. трения между жидкостью и поверхностями твердых тел,
 μ — среднее удельное давление, т. е. нагрузка, приходящаяся на одну квадратную единицу трущейся поверхности.

Проф. Петров нашел возможным для практических целей упростить формулу, исключив члены $\frac{z}{\lambda_1}$ и $\frac{z}{\lambda_2}$, исходя из того, что λ_1 и λ_2 сравнительно с Z настолько велики, что этими дробями можно пренебречь.

Таким образом упрощенная формула приобретает вид:

$$\mu = \frac{Z \cdot V}{h p_m},$$

где Z , V , h и p_m имеют те же значения.

Исходя из предположения, что между двумя движущимися относительно друг друга поверхностями находится слой жидкости такой толщины, что поверхности не соприкасаются, мы не можем себе представить этого движения, не допустив, что происходит:

- 1) скольжение отдельных слоев жидкости друг по другу и
- 2) скольжение слоев жидкости, непосредственно прикасающихся к поверхностям твердых тел, по этим поверхностям.

Подобное скольжение нельзя себе представить иначе, как нарушение существующей взаимной связи между отдельными частицами жидкости и частицами поверхности тела.

Многочисленные опыты показали, что взаимная связь между отдельными частицами жидкости во много раз слабее, чем связь между частицами жидкости и поверхностью твердого тела. Последняя связь, иначе называемая *силой прилипания*, или *липкостью*, у смазочных масел настолько велика, что предположение о скольжении частиц масла по поверхности совершенно исключается. Таким образом остается лишь скольжение частиц жидкости друг по другу.

Скольжение это однако совершается не беспрепятственно, так как оно связано с нарушением внутреннего сцепления между жидкими частицами; при таком скольжении возникает внутреннее трение.

Законы внутреннего трения жидкости были впервые изучены Ньютоном (1643 — 1727 г.).

Величина внутреннего трения жидкости характеризуется ее густотой или, что то же самое, ее вязкостью.

Для количественной оценки вязкости существуют два понятия: абсолютная вязкость и вязкость относительная.

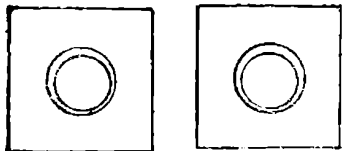
Под абсолютной вязкостью понимают силу (в *кг*), потребную для передвижения слоя жидкости площадью в 1 м^2 относительно другого такого же слоя, отстоящего от первого на расстоянии 1 м , со скоростью в 1 м/сек .

Абсолютная вязкость практически может оцениваться, как время истечения жидкости через капилляр в специальном приборе.

Под относительной вязкостью понимают отношение времени истечения определенного объема данного масла (при заданной температуре) ко времени истечения того же объема воды при 20° . Определение относительной вязкости производится на стандартном приборе (вискозиметре) Энглера, описание которого будет дано ниже.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ СКОЛЬЖЕНИЯ НА КОЭФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

В отношении скорости необходимо сделать следующее пояснение. Если мы возьмем вал, вращающийся в подшипнике, то в спокойном состоянии взаимное положение вала и подшипника будет таковым, как указано на черт. 4, т. е. вал под влиянием своего веса будет лежать на нижней части внутренней поверхности подшипника. Но как только вал придет в движение, то он займет положение, указанное на черт. 5, причем во время своего вращения он будет захватывать с собой масло, заполняющее зазор, и вгонять его в место соприкосновения с вкладышем подшипника. Таким образом между валом и подшипником создается слой смазки, который сможет более или менее нацело отделять друг от друга трущиеся поверхности. Чем больше будет скорость вращения вала, тем сильнее масло будет загоняться в зазор между валом и подшипником и тем толще будет слой смазки. На толщину слоя смазки в зазоре оказывает влияние вязкость масла. Чем она выше, тем слой масла в зазоре толще, но вместе с тем придется затрачивать больше энергии на преодоление сцепления частиц масла. При большой скорости нет надобности в применении густых масел, а наоборот для уменьшения сопротивления трению требуется применять масла с малой вязкостью.



Черт. 4 — 5. Положение шейки вала в подшипнике.

Согласно формулы жидкостного трения

$$\mu = \frac{Z \cdot V}{h \cdot p_m}$$

из четырех величин, входящих в выражение коэффициента трения, первая величина Z — абсолютная вязкость — зависит исключительно от свойств смазочного материала, изменяясь только с температурой подшипника;

вторая величина V — относительная скорость трущихся поверхностей в м/сек — зависит от кинематических условий работы данного механизма и большей частью является наперед заданной и постоянной величиной;

третья величина p_m — удельное давление в кг/м² — зависит тоже от конструктивных условий и большей частью является наперед заданной постоянной величиной;

четвертая величина h — толщина масляного слоя — есть функция многих переменных; она находится в зависимости не только от трех величин (Z , V и p_m), но еще и от самой конструкции трущихся деталей и от их относительного расположения.

Имея в виду лишь общий вид формулы трения, рассмотрим сначала, какое влияние на коэффициент трения при постоянной вязкости оказывает изменение скорости и удельного давления. Это позволит понять самый процесс скользящего трения и отметить в нем некоторые характерные моменты.

В первую очередь выясним влияние изменения скорости и скольжения на коэффициент трения.

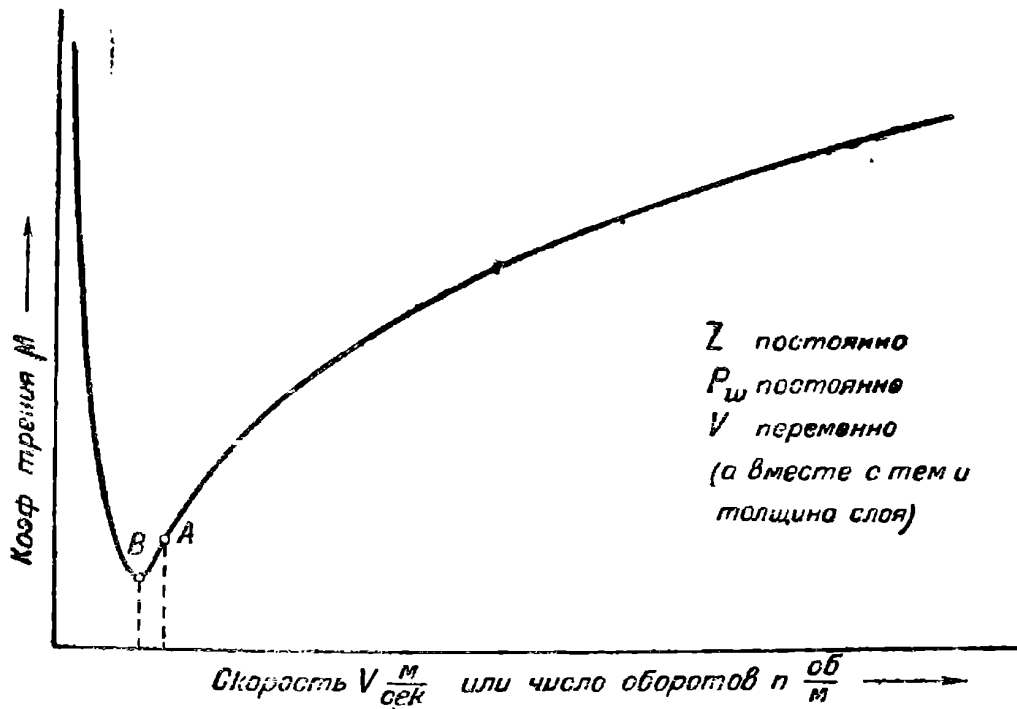
Многочисленные опыты по этому вопросу проделаны проф. Р. Стрибек над вращающимся в подшипнике валом.

Черт. 6 показывает изменение коэффициента трения с изменением числа оборотов вала или соответственно скорости скольжения.

Рассматривая кривую, видим что, несмотря на то, что переменной величиной является одна лишь скорость, коэффициент трения изменяется не по закону прямой, а по какой-то кривой. Это ясно указывает о влиянии на характер кривой четвертой величины, а именно толщины масляного слоя h .

Толщина слоя, как показал опыт, с уменьшением скорости также уменьшается, но вместе с уменьшением скорости меняется взаимное расположение вала и подшипника, что также влияет на величину коэффициента трения.

Из черт. 6 видно, что коэффициент трения с уменьшением скорости постепенно уменьшается и при определенной скорости (в точке A) ка-



Черт. 6. Влияние скорости на коэффициент трения.

рактер кривой меняется. Изменение кривизны в точке A указывает на то, что масляная пленка местами разрывается, благодаря чему трущиеся поверхности начинают приходить в соприкосновение (полужидкостное трение). Тем не менее это непосредственное соприкосновение поверхностей еще настолько незначительно, что коэффициент трения все же продолжает падать.

Наконец наступает момент, когда влияние сухого трения начинает преобладать, а вместе с тем трение увеличивается.

Начиная с точки B , слой жидкости быстро теряет свою цельность, благодаря чему начинается металлическое соприкосновение, и трение приобретает характер полусухого трения.

С уменьшением скорости кривая коэффициента трения поднимается вверх, пока при $V=0$ она не пересечет ординату на определенной высоте, соответствующей коэффициенту полусухого трения покоя.

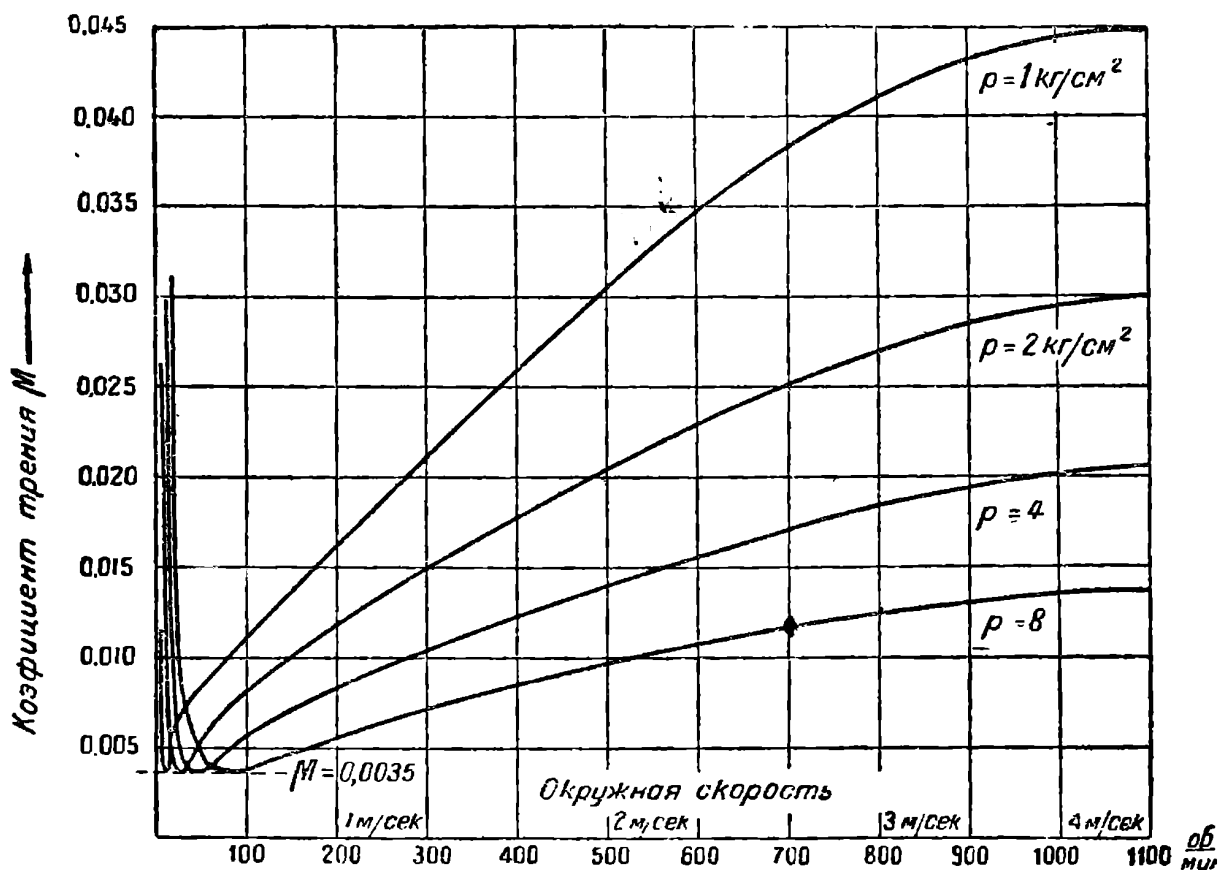
Таким образом ясно виден более или менее плавный переход от состояния жидкостного трения к состоянию полусухого трения.

В последнем состоянии роль вязкости жидкости отходит на второй план и первенствующее значение приобретает *липкость* по отношению к поверхностям трения, т. е. свойство, обуславливающее прочность масляной пленки.

В состоянии же жидкостного трения (вправо от точки А) первенствующее значение имеет вязкость, хотя липкость также весьма существенна, так как с ее увеличением коэффициент жидкостного трения уменьшается.

ВЛИЯНИЕ УДЕЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ НА КОЭФИЦИЕНТ ТРЕНИЯ

Чем выше давление, испытываемое трущимися поверхностями, тем сильнее слой масла будет с них выжиматься, тем скорее может быть



Черт. 7. Влияние давления на коэффициент трения.

нарушена целостность этого слоя, и тем скорее наступит полужидкостное трение. Для избежания этого необходимо при большом давлении применять масло с большей вязкостью; для небольшого давления берется масло с меньшей вязкостью.

На черт. 7 представлены кривые изменения коэффициента трения в зависимости от числа оборотов вала в минуту для различных удельных давлений.

Как видно, характер кривых, соответствующих различному удельному давлению, один и тот же, за исключением лишь того, что переход от