

ВЛИЯНИЕ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОТОРНОГО МАСЛА НА ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И РЕСУРСНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПОРШНЕВЫХ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ю. Шабанов, к.т.н., доц., А.Б. Зайцев, к.т.н., доц., И.С. Кудинов, асп., А.А. Метелев
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет

Представлено обобщение результатов, полученных в ходе многочисленных длительных ресурсных испытаний моторных масел разных видов, групп качества и вязкости, иллюстрирующих связь их некоторых физико-химических показателей и основных характеристик двигателя. Определены методы постановки задачи подбора смазочного масла под требования конкретного двигателя.

Подбор моторного масла под конструктивные особенности конкретного двигателя — задача непростая и в то же время крайне ответственная. Степень влияния состава моторного масла и его физико-химических показателей на показатели мощности, экономичности, токсичности отработавших газов и ресурсные характеристики двигателя чрезвычайно высока.

Метод подбора моторного масла по вязкости по классификации SAE и по группе качества с использованием норм API или ACEA не может обеспечить полностью оптимального его выбора. Именно поэтому ведущие мировые производители двигателей вводят свои требования к применяемым моторным маслам, существенно превышающие современные действующие нормы, например, группам качества по API SM/CF и ACEA A3/B4. К этим требованиям относятся стабильность физико-химических показателей при длительной работе в двигателе; функции энергосбережения и защиты от износа, предельный уровень высоко- и низкотемпературных отложений; совместимость с катализаторами систем очистки ОГ и т. д.

В настоящей статье авторы попытались обобщить результаты, полученные в ходе многочисленных длительных ресурсных испытаний моторных масел разных производителей, имеющих различную основу (минеральные, полусинтетические и синтетические различных видов), вязкость по SAE, группу качества по классификации API, иллюстрирующих связь их некоторых физико-химических показателей и основных характеристик двигателя.

Очевидно, что важнейшим параметром смазочного масла, определяющим качество работы узлов трения двигателя, является его вязкостно-температурная характеристика (ВТХ). Для описания реального поведения масла в условиях высоких температур параметров, определяемых классификацией SAE (нормируется диапазон изменения кинематической вязкости при 100 °С и вводится ограничение на динамическую вязкость при 150 °С), явно недостаточно [1]. Вязкостно-температурные характеристики моторных масел одной группы по SAE при температурах, характерных для основных узлов трения ДВС приведены на рис. 1.

Их анализ показывает, что при температурах, характерных для работы узлов трения в цилиндропоршневой группе (ЦПГ), кинематическая вязкость может различаться на 15–35 %. При снижении температуры масла эти различия уменьшаются, но и зоне температур, характерных для работы подшипников коленчатого вала, они составляют 4–10 %.

Мощность потерь трения в гидродинамическом режиме смазки пропорциональна величине кинематической вязкости смазочного материала,

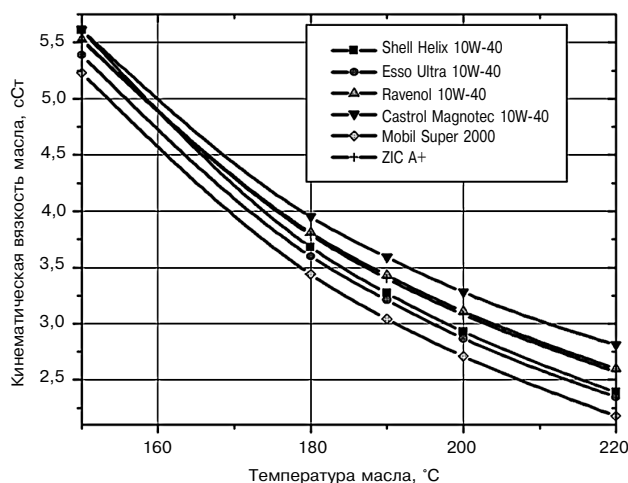


Рис. 1. Вязкостно-температурные характеристики полусинтетических моторных масел группы вязкости SAE 10W-40 при температурах, характерных для работы узлов трения ДВС

поэтому очевидна зависимость энергосберегающих свойств масла от величины его вязкости при высоких температурах.

Для оценки степени этого влияния в ходе сравнительных стендовых испытаний были проведены измерения расхода топлива двигателя в десяти идентичных точках двух нагрузочных характеристик при его работе на различных моторных маслах. Результаты сравнивались с расходом топлива при работе на эталонном минеральном моторном масле. Весовые коэффициенты режимов в нашем случае принимались одинаковыми, поскольку привязка полученных результатов к конкретному циклу эксплуатации автомобильного двигателя затруднительна. Испытания проводились на установившихся режимах работы, тогда как реальный цикл эксплуатации включает в основном неустановившиеся режимы. Однако на достоверность сравнительной оценки степени влияния свойств масла на показатели двигателя это обстоятельство не влияет.

Эффект энергосбережения определялся как

$$\text{ЭфЭнС} = \frac{\sum (g_{ei3} - g_{ei}) / g_{ei3}}{K_T} \cdot 100\%,$$

где g_{ei} — удельный расход топлива, замеренный на i -м режиме при работе на испытуемом масле; g_{ei3} — то же, замеренное на эталонном масле; K_T — количество точек замера.

Физический смысл введенного критерия очевиден — это относительная усредненная величина изменения эффективного расхода топлива при работе двигателя на испытуемом масле относительно эталонного, выраженная в процентах. Положительная величина критерия означает улучшение энергосберегающих свойств моторного масла по отношению к эталонному, отрицательная — ухудшение.

Испытания по определению эффекта энергосбережения были проведены на моторном стенде с двигателем ВАЗ-2108 и представлены на рис. 2. Они показывают, что при работе двигателя на режимах внешней скоростной характеристики, наблюдается четко выраженная зона оптимальных вязкостей, при которых эффект энергосбережения достигает максимума.

Эффект энергосбережения при прочих равных условиях связан с мощностью механических потерь двигателя, зависящих от параметров моторного масла. При высокой вязкости резко возрастают гидродинамические потери в подшипниковых узлах двигателя (поршневых кольцах и подшипниках коленчатого вала), вследствие чего растет и расход топлива. При уменьшении вязкости масла ниже определенного уровня в узлах трения начинают развиваться зоны нарушения гидродинамического режима работы, формируются

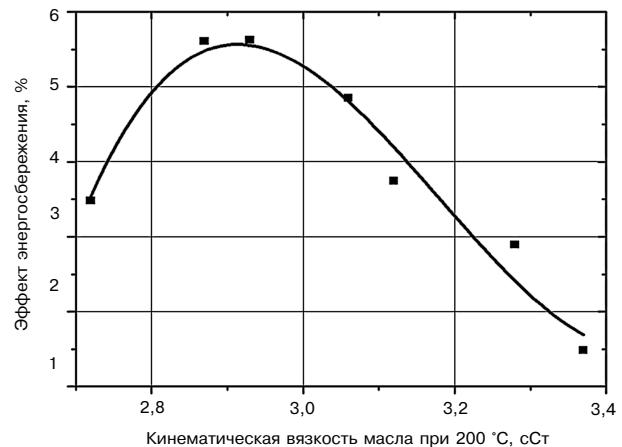


Рис. 2. Зависимость эффекта энергосбережения от кинематической вязкости моторного масла при температурах, характерных для работы узлов трения ДВС

участки граничного трения, значительно превышающего по своей величине гидродинамическое. Расход топлива также начинает расти.

Очевидно, что полученный диапазон оптимальных с точки зрения энергосбережения вязкостей моторного масла сугубо индивидуален для каждого типа двигателя и определяется средней величиной коэффициента нагруженности пар трения в нем. Определенное влияние на зону оптимальных вязкостей оказывают и антифрикционные свойства моторного масла, определяемые составом примененного в нем пакета присадок. Так, по результатам испытаний, для масел, содержащих в пакетах присадки на базе микрокерамик, графита или дисульфида молибдена, наблюдается смещение зоны оптимальности в сторону снижения вязкости масла. Однако это смещение сравнительно невелико, поскольку изменение коэффициентов граничного трения, вносимое этими присадками, не дает существенного уменьшения мощности механических потерь на фоне очень низкого трения в режиме гидродинамики.

Условия работы узлов трения на режимах внешней скоростной характеристики определяются максимальными газовыми и инерционными нагрузками, поэтому там более вероятны нарушения режима гидродинамического трения. Очевидно, что для минимизации механических потерь двигателя на этих режимах требуется более надежное формирование смазочных масляных пленок, обеспечиваемое повышенной вязкостью смазочного материала.

При обработке результатов испытаний было введено понятие эффекта увеличения мощности, вычисляемого по формуле

$$\text{ЭфМощ} = \frac{\sum (M_{ei} - M_{ei3}) / M_{ei3}}{K_T} \cdot 100\%,$$

где M_{ei} — эффективный крутящий момент двигателя, замеренный на i -м режиме при работе на испытуемом масле; $M_{eiэ}$ — то же, замеренное на эталонном масле; K_t — количество точек измерения крутящего момента на режимах внешней скоростной характеристики.

Так же, как и эффект энергосбережения, введенный комплекс характеризует относительное изменение величины крутящего момента двигателя при использовании испытуемого масла по отношению к эталонному, выраженное в процентах.

Измерения крутящего момента производились на шести точках внешней скоростной характеристики при фиксированных частотах вращения коленчатого вала в диапазоне 1500–4000 об/мин. Результаты измерений и вычислений приведены на рис. 3.

Из результатов испытаний видно, что в исследованном диапазоне изменения кинематических вязкостей эффект увеличения мощности монотонно возрастает. Следует отметить, что все испытанные масла принадлежали группе SAE 10W-40.

Для анализа влияния физико-химических параметров моторного масла на ресурсные показатели двигателя был проведен цикл длительных стендовых испытаний на той же выборке полусинтетических моторных масел группы SAE 10W-40. Испытания проводились с использованием методики, разработанной в качестве Стандарта системы добровольной сертификации топлив, моторных масел и технических жидкостей СДС-FLM, являющейся расширенным аналогом методики ААИ.

Определение скоростей износа проводилось как прямым обмером и точным взвешиванием

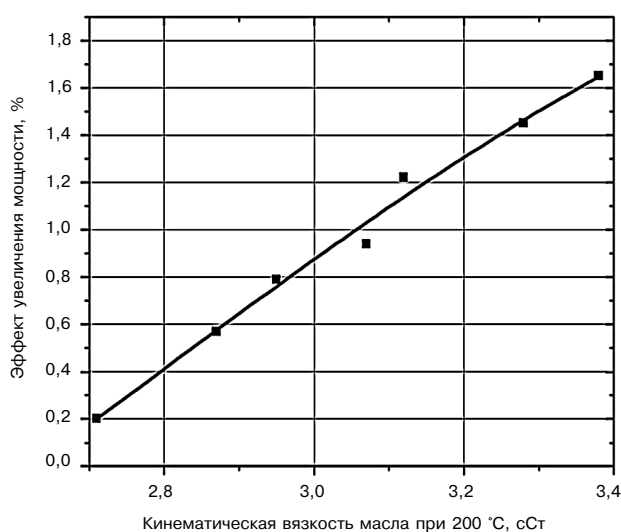


Рис. 3. Зависимость эффекта увеличения мощности от кинематической вязкости моторного масла при температурах, характерных для работы узлов трения ДВС

контрольных деталей, так и на основании анализа содержания продуктов износа в образцах моторного масла, отобранных на различных стадиях испытаний.

В качестве параметра была взята усредненная вязкость моторного масла при характерных рабочих температурах соответствующих узлов трения (200 °С для поршневых колец и 150 °С для подшипников коленчатого вала). Поскольку вязкость моторного масла изменяется в процессе его длительной работы, обычно вначале уменьшаясь, а по мере накопления продуктов окисления, увеличиваясь, для дальнейшего анализа была введена усредненная вязкость. Усреднение проводилось по результатам замеров вязкостно-температурной характеристики четырех образцов масла, отобранных на различных стадиях длительных испытаний. Таким образом, авторами была сделана попытка учесть изменение ВТХ в процессе старения масла. Некоторые результаты этого фрагмента исследования проиллюстрированы рис. 4 и 5.

Следует учесть, что в данном фрагменте стендовых исследований поддерживалась полная идентичность условий изнашивания узлов трения испытуемых ДВС для того, чтобы обеспечить возможность оценки влияния свойств масла на ресурсные показатели двигателя.

Результаты этого фрагмента исследования в целом подтвердили очевидный вывод. Наблюдается существенное снижение скоростей износа сопряжений трения при увеличении его вязкости в рабочем диапазоне температур. Очевидно, это связано с увеличением толщин масляной пленки, разделяющих рабочие поверхности деталей, образующих узел трения и тем самым препятствующих прямому контакту этих поверхностей, приводящих к износу.

Необходимо отметить, что в данном фрагменте исследования были практически исключены участки пускового износа, имеющего существенное значение в определении общих ресурсных показателей двигателя. Но на его интенсивность в основном влияют не столько вязкостные, сколько антизадирные и противоизносные свойства моторного масла, определяемые составом и качеством пакета присадок и базовой основы масла. Для того чтобы компенсировать погрешность, вносимую этим обстоятельством, из анализа были исключены масла, существенно отличающиеся от других по группе трибологических показателей, определенных с использованием четырехшариковой машины трения. Здесь учитывалось то, что эти показатели в большой степени определяются составом пакета антизадирных и противоизносных присадок, влияющих на поверхностные свойства масла.

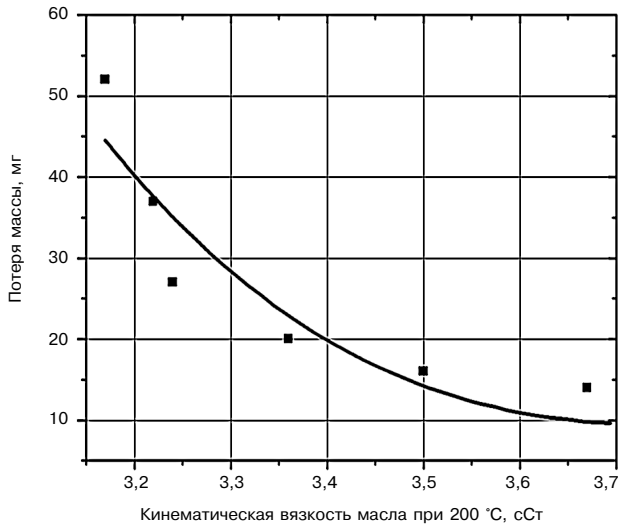


Рис. 4. Суммарный износ (потеря массы) первых поршневых колец двигателя ВАЗ-2108 в зависимости от усредненной высокотемпературной вязкости моторного масла за цикл длительных испытаний

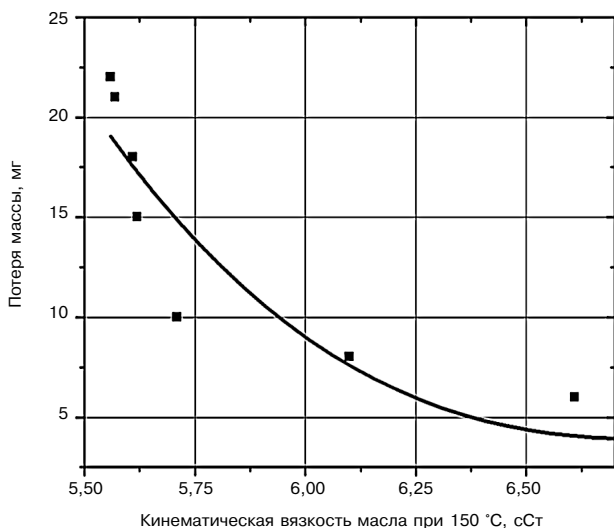


Рис. 5. Суммарный износ (потеря массы) верхних шатунных вкладышей двигателя ВАЗ-2108 в зависимости от усредненной высокотемпературной вязкости моторного масла за цикл длительных испытаний

Еще одним важным показателем двигателя, на который прямо влияют физико-химические свойства моторного масла, является его расход на угар. Это одна из характеристик двигателя, влияющая на срок службы самого масла, совместимость его с устройствами очистки отработавших газов, а также содержанием в отработавших газах нетопливных остаточных углеводородов.

Очевидно, что при прочих равных условиях, косвенной характеристикой расхода масла на угар является толщина смазочного слоя, оставленного на поверхности цилиндра первым поршневым кольцом при движении поршня от ВМТ

к НМТ. Чем она больше, тем большее количество масла будет подвержено воздействию мощных тепловых потоков со стороны горячих газов. Толщина же масляного слоя на стенке цилиндра напрямую связана с высокотемпературной вязкостью моторного масла. Кроме того, как показано в [2], увеличение толщины масляной пленки, оставленной поршневыми кольцами на стенках цилиндра, приводит к резкому росту температуры ее поверхностных слоев, что также повышает расход масла на угар.

Кроме того, величина потерь масла на угар связана и с его летучестью, в нашем случае косвенно характеризуемой величиной температуры вспышки в открытом тигле. Очевидно, что для уменьшения потерь масла на угар следует стремиться к использованию маловязких моторных масел с высоким показателем температуры вспышки.

Для анализа совместного влияния этих физико-химических параметров на величину угара масла был введен некий усредненный комплекс температура вспышки–вязкость, определяемый как:

$$K_{\text{ТВС-В}} = \frac{T_{\text{всп}} / T_{\text{всп.ср}}}{\nu_{200} / \nu_{200\text{ср}}},$$

где $T_{\text{всп}}$ — температура вспышки в открытом тигле испытуемого масла; $T_{\text{всп.ср}}$ — средняя по выборке масел температура вспышки; ν_{200} — кинематическая вязкость испытуемого масла при 200 °C; $\nu_{200\text{ср}}$ — средняя по выборке кинематическая вязкость масла.

Очевидно, что вышеуказанные параметры следует усреднять за весь цикл испытаний, поскольку они изменяются по мере наработки масла в реальном двигателе.

Так, температура вспышки масла при нормальных условиях эксплуатации в двигателе обычно увеличивается, однако в реальной практике может наблюдаться и обратный процесс, обусловленный попаданием в масло определенного количества несгоревшего топлива.

В ходе длительных испытаний моторных масел проводились измерения расхода масла на угар методом «на слив». Определялась относительная потеря масла к начальному объему. В обычных условиях данный метод дает высокую погрешность, обусловленную большим количеством остатков масла, не сливаемых через отверстие в поддоне. Однако в нашем случае на конечной стадии испытаний проводилась полная разборка двигателя, что позволяло обеспечить полный слив отработанного масла. Результаты этого фрагмента испытаний приведены на рис. 6.

Как следует из результатов испытаний, сделанные ранее предположения полностью подтверждаются. С увеличением температуры вспыш-

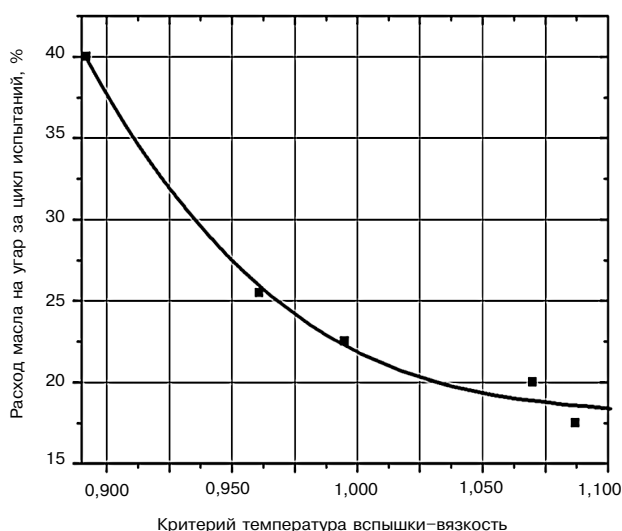


Рис. 6. Зависимость расхода масла на угар от комплекса ФХП моторного масла. Двигатель ВАЗ-2108, выборка полусинтетических масел 10W-40

ки и снижением вязкости моторного масла уменьшается летучесть пленки, оставленной на поверхности цилиндра поршневыми кольцами, и, следовательно, снижается расход масла на угар. Следует отметить, что эта тенденция четко прослеживается в современных моторных маслах, ориентированных на использование в автомобилях класса Евро-4 и выше.

Кроме того, очевидно, что вышеуказанный критерий при условии одинаковой моющей способности моторных масел будет косвенно отражать уровень высокотемпературных отложений в камере сгорания двигателя, и, в частности, на боковых поверхностях поршней. Оценка уровня отложений на поршнях, проведенная с использованием шкалы метода ПЗВ, в сопоставлении с величиной критерия температура вспышки-вязкость, приведена на рис. 7.

Результаты иллюстрируют, что уменьшение летучести масляной пленки способствует уменьшению уровня отложений. Следует отметить, что для моторных масел, принявших участие в тесте, уровень моющих свойств, косвенно определяемый по величине щелочного числа, был близким, но все-таки отличался — от 5,5 до 7,2 мг КОН/г. Разброс реальных показателей относительно усредненных значений, наблюдаемый на рис. 7, может быть объяснен, в частности, определенным отличием моющей способности масел, а также оценочным характером метода ПЗВ.

Таким образом, результатами исследования наглядно подтверждается степень зависимости

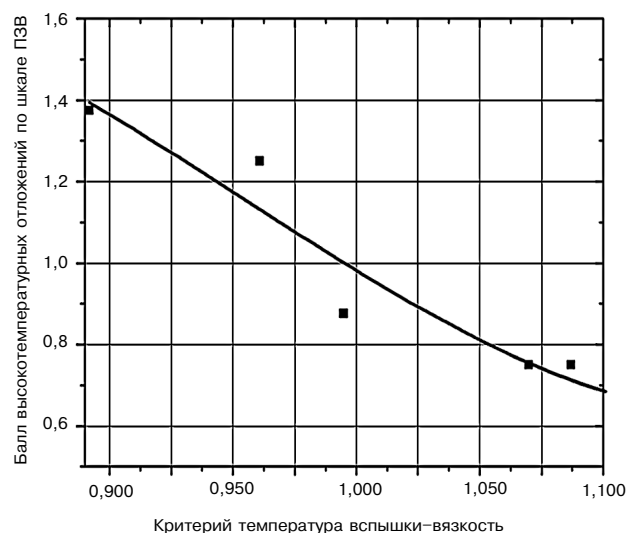


Рис. 7. Зависимость уровня высокотемпературных отложений от комплекса ФХП моторного масла. Двигатель ВАЗ-2108, выборка полусинтетических масел SAE 10W-40

основных показателей двигателя от базовых физико-химических показателей моторного масла. При этом четко видна разнонаправленность требований к их свойствам с учетом различных показателей двигателя. Так, повышение противоизносных свойств требует увеличения вязкости моторного масла, что влечет за собой рост расхода на угар и уровня высокотемпературных отложений. Достижение максимального энергосберегающего эффекта, а также роста мощности двигателя требует четко определенного диапазона оптимальных вязкостей, зависящего от конструктивных особенностей и спектра режимов эксплуатации.

Следовательно, подбор смазочного масла под требования конкретного двигателя представляет собой решение задачи оптимизации многофакторной целевой функции с формулировкой системы ограничений, учитывающей разнонаправленные аспекты влияния свойств моторного масла на эксплуатационные показатели ДВС.

Литература

1. Шабанов А.Ю., Зайцев А.Б., Кудинов И.С. Новый метод определения высокотемпературной кинематической вязкости моторных масел // Двигателестроение. — 2009. — № 2. — С. 53–54.
2. Петриченко Р.М., Петриченко М.Р. и др. Трение и теплообмен в поршневых кольцах ДВС. — Л.: Изд. ЛГУ, 1990. — 187 с.