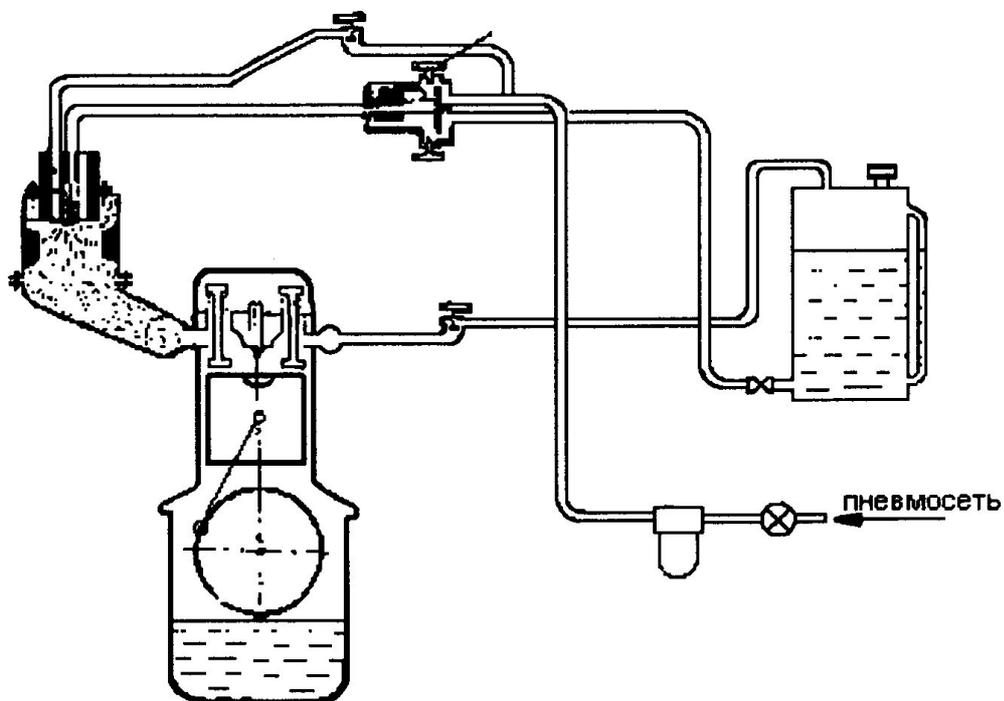


ХОХЛОВ А.Л., ВАРНАКОВ В.В.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПОСЛЕ РЕМОНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИСАДОК**



Ульяновск - 2012

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия
им. П.А. Столыпина»

ХОХЛОВ А.Л., ВАРНАКОВ В.В.

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПОСЛЕ РЕМОНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПРИСАДОК**

Ульяновск - 2012

УДК 631 - 6

X - 86

ББК 40.7

Хохлов А.Л., Варнаков В.В.

Повышение качества обкатки двигателей после ремонта с использованием присадок

Ульяновск, УГСХА, 2012 г. – 155 с.

Монография

Рецензенты: доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Тракторы, автомобили и теплоэнергетика» ФГБОУ ВПО «Пензенская государственная сельскохозяйственная академия» УХАНОВ А.П.

доктор технических наук, профессор, академик Российской Академии Транспорта, заведующий кафедрой «Автомобили и автомобильное хозяйство» ГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет» ДЕНИСОВ А.С.

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математики и физики» ФГБОУ ВПО «Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия имени П.А. Столыпина» ИСАЕВ Ю.М.

В монографии рассмотрен способ повышения качества приработки деталей двигателей после капитального ремонта с использованием присадок.

На основе теоретических исследований описаны явления и процессы фрикционного взаимодействия пар трения с учетом формирования пленок переноса и их влияния на коэффициент трения и процесс изнашивания. Обосновано основное назначение приработочных масел с присадками, заключающееся в создании между трущимися поверхностями пленки переноса, способной уменьшить фрикционное взаимодействие твердых тел и характеризующейся малым сопротивлением сдвигу.

Предложено устройство для подачи, приработочной присадки к воздуху, в камеру сгорания двигателя, позволяющее обеспечить качественное распыливание воздушно-присадочной смеси, повысить качество ускорения приработки деталей цилиндропоршневой группы и моторесурс двигателя.

Проведены стендовые исследования двигателей УМЗ-417 с применением присадки комплексного действия ВАРКС, позволяющей более чем в два раза снизить шероховатость вкладышей, сократить время обкатки двигателей, повысить эффективную мощность двигателя.

Табл. 12. Ил. 51. Библиограф. 123.

Предназначена для инженерно-технических работников научных организаций, а также аспирантов и студентов инженерных специальностей.

Печатается по решению Научно-технического совета Ульяновской ГСХА, протокол № 3 от 05.06.2012 г.

ISBN 978-5-902532-92-7

© Хохлов А.Л., Варнаков В.В. 2012

© Ульяновская государственная сельскохозяйственная академия им. П.А. Столыпина, 2012

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы необходимость в ремонте и техническом обслуживании сельскохозяйственной техники резко возросла. Машинно-тракторный парк стареет, нагрузка на него даже при сокращении возделываемых площадей постоянно возрастает. Причем финансовые возможности для обновления парка и поддержания машин в работоспособном состоянии в АПК ограничены.

Анализ эксплуатации машин показывает, что 34...45 % отказов приходится на двигатели [1,2]. Причем большая часть ДВС, используемых в сельскохозяйственном производстве Российской Федерации, эксплуатируется после капитального ремонта. Практика эксплуатации ДВС показывает, что ресурс двигателей после капитального ремонта не достигает 30...47 % ресурса новых. Поэтому за срок службы машин их двигатели подвергаются капитальному ремонту до шести раз [3]. На техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонты двигателей расходуется денежных средств, в 5...6 раз, а труда в 10...15 раз больше, чем на их изготовление [4]. Поэтому повышение качества ремонта двигателей является актуальной проблемой.

На надежность двигателей после ремонта влияют следующие факторы: конструктивные, технологические и эксплуатационные.

Исходя из возможностей сельскохозяйственных ремонтных предприятий, основным направлением повышения качества и ускорения приработки деталей двигателя - является комплексное применение прирабочных присадок. При этом научно обоснованные режимы обкатки позволят обеспечить: снижение затрат, связанных с обкаткой двигателя; повышение качества приработки трущихся соединений. Всё это влияет [5] на долговечность двигателя и его эксплуатацию с повышенным ресурсом.

Анализ литературных источников и научных исследований показал, что карбюраторные двигатели с удельной литровой мощностью 26...27 кВт/л (УМЗ-417, УМЗ-421) не достаточно изучены. Поэтому для исследований были выбраны двигатели производства Ульяновского моторного завода АО «Волжские моторы» бензиновые, четырёхцилиндровые, рядные, с водяным охлаждением, которые устанавливаются на автомобилях УАЗ-3151, УАЗ-3160, УАЗ-3165, УАЗ-3303, УАЗ-2262, ГАЗ-3302 и их модификациях. Эти автомобили широко эксплуатируются, как в условиях АПК Ульяновской области, так и за её пределами, в том числе и в республиках бывшего СНГ, и в дальнем зарубежье.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ ПРИСАДОК

1.1 Приработка поверхностей трения деталей, как резерв повышения надёжности и ресурса двигателей после ремонта

По ГОСТу, приработка - процесс формирования оптимальной микрогеометрии и физико – механических свойств поверхностных слоёв материала в начальный период трения.

Необходимость приработки новых двигателей и после ремонта была установлена ещё в 1902 году [6].

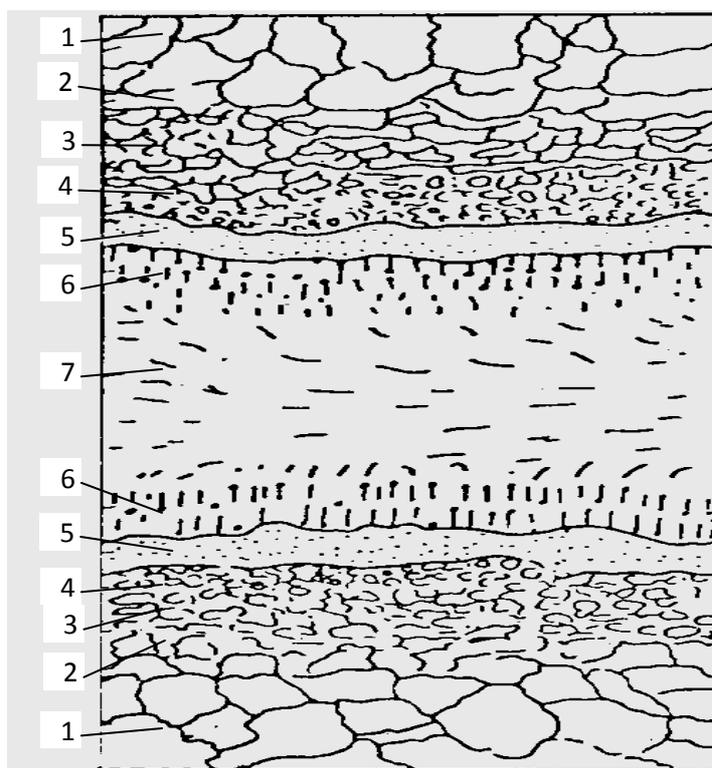
В настоящее время на машиностроительных и ремонтных предприятиях обязательно проводят обкатку двигателей, а также всей машины в начальный период её эксплуатации. Однако, некоторые специалисты считают, что главный взгляд на приработку деталей как на обязательное явление, нельзя считать правильным [7]. Такое мнение у некоторых специалистов возникло под влиянием успехов, достигнутых в машиностроении в области получения поверхностей с шероховатостью, близкой к оптимальной.

Однако даже при условии получения с помощью финишных операций оптимального качества поверхностных слоёв трущихся деталей, приработка сопряжений необходима, так как она устраняет [8, 9, 10]:

- погрешности механической обработки деталей (овальность, конусность и др.);
- неточности взаимного расположения поверхностей деталей образующиеся при сборке и искажения их геометрической формы при затяжке болтовых соединений;
- неравномерное изменение формы деталей, вызванное повышением температуры на начальном этапе работы соединений;

- неравномерность взаимного прилегания и значительная разница в шероховатости и физико-механических свойствах поверхностных слоёв деталей. Таким образом, приработка пар трения является обязательным технологическим процессом, имеющим большое значение для получения износостойких поверхностей и, как следствие, продления межремонтного ресурса двигателей.

Приработка - сложный процесс, протекающий под влиянием большого числа различных факторов [13] (рис. 1.1).



1 - основной материал; 2 - зона упругих деформаций; 3 - зона пластических деформаций; 4 - текстурированный слой; 5 - слой окислов и поверхностных соединений; 6 - граничный слой; 7 - гидродинамическая зона; 1-6 – в твердом теле; 7 – в жидкости.

Рисунок 1.1 – Физико-химические явления в трибосопряжении

Весь процесс приработки, который длится 30...60 часов, можно разбить на три периода [11]:

1-й характеризуется повышенными начальными износами. В этот период происходит оптимизация качества поверхности трущихся пар, т.е. микрогеометрическая приработка, сопровождающаяся сглаживанием и

срезанием неровностей на поверхностях деталей, значительным износом деталей и увеличением сборочных зазоров;

2-й характеризуется снижением величины износа, уменьшением механических потерь на трение [12], упрочнением поверхностей, геометрическим выравниванием деталей относительно друг друга. Этот период можно назвать периодом начальной макрогеометрической приработки;

3-й характеризуется стабилизацией всех основных показателей двигателя:

износа деталей, расхода топлива, механических потерь, давления масла, прорыва газов в картер, температуры и т.д..

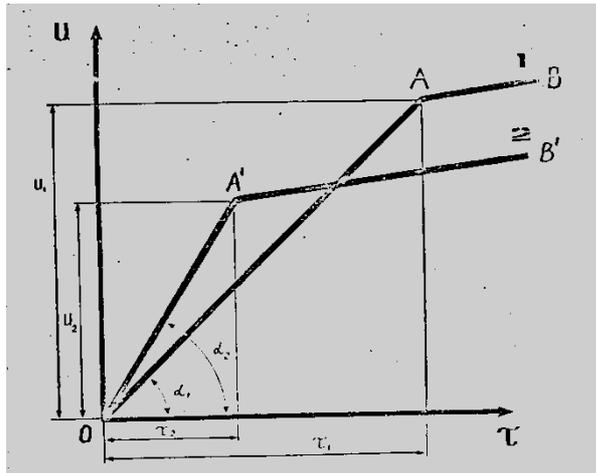
Такие факторы, как: шероховатость, форма поверхностей, площадь фактического контакта, напряжённое состояние, условия смазки и другие, непрерывно изменяются [14].

Неблагоприятное сочетание влияющих факторов может затруднить приработку. К такому результату приводят: высокие нагрузки; слишком большие или очень малые скорости скольжения; повышенная температура; недостаток смазки и другие. Поэтому двигатель в период обкатки необходимо нагружать постепенно, стараться обеспечить эффективное охлаждение и смазывание поверхностей трения.

Продолжительность стендовой обкатки сравнительно невелика (1,5...3,0 ч) по отношению ко времени, необходимому для полной приработки (30...60 ч) [15]. Поэтому приработку необходимо ускорить.

Основную идею ускоренной приработки деталей двигателей [16, 17, 18] можно увидеть на примере кривых износа деталей – рисунок 1.2.

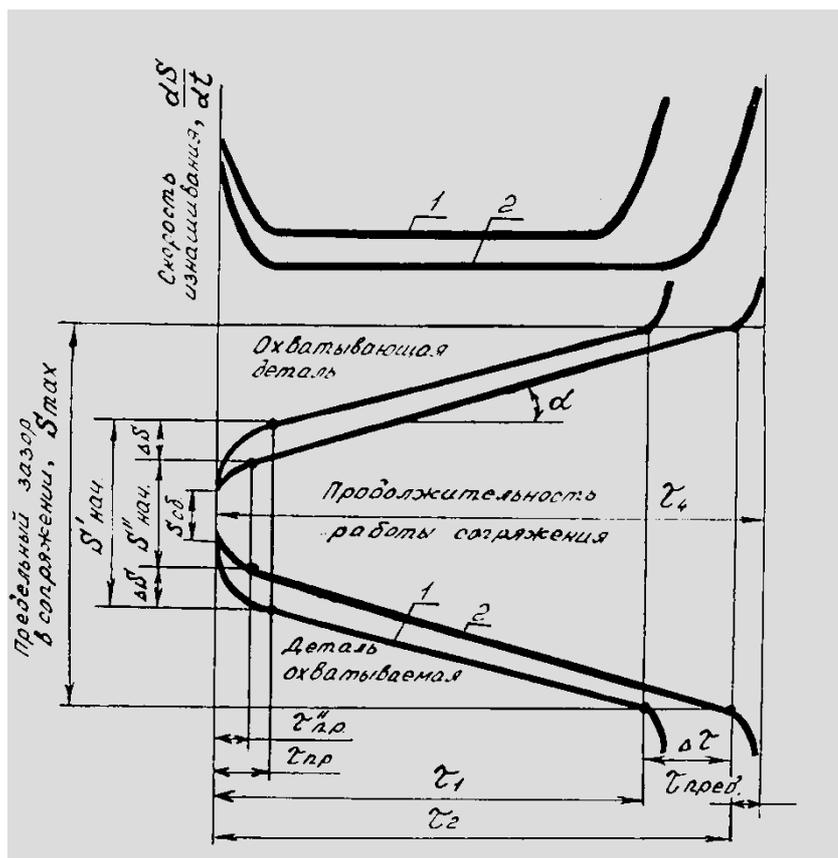
В начальный период обкатки интенсивность изнашивания должна быть максимальная (отрезок OA') с последующим максимальным снижением скорости изнашивания (отрезок A'B'). Достижение такого процесса обеспечит ускоренную приработку с наименьшими износами.



1 - типовая обкатка; 2 – ускоренная обкатка

Рисунок 1.2 – Изменение износа деталей от времени

В процессе приработки деталей увеличивается зазор в соединениях [19], что показано на рисунке 1.3.



1- приработанные на базовом масле; 2 – приработанные на базовом масле плюс присадки, интенсифицирующие процесс приработки.

Рисунок 1.3 – Износ трибосопряжений, имеющих в эксплуатации различную скорость изнашивания

Чем больше зазор, тем меньше ресурс этих соединений в эксплуатации и, соответственно, долговечность двигателя в период работы.

Межремонтный ресурс сопряжения τ_p в этом случае определяется уравнением (1.1) [20].

$$\tau_p = S_{\max} - S_{\text{нач}} / \text{tg } \beta, \quad (1.1)$$

где S_{\max} – максимально допустимый зазор в соединении, мкм; $S_{\text{нач}}$ – зазор после приработки, мкм; $\text{tg } \beta = dS/dt$ – скорость изнашивания деталей.

Одним из факторов, влияющий на качество приработки и в целом на ресурс соединения, является величина начального зазора $S_{\text{нач}}$, которая зависит [21] от множества факторов отраженных в формуле (1.2):

$$S_{\text{нач}} = f(Pn\eta T\tau CK\epsilon mdS_{\text{сб}}), \quad (1.2)$$

где P – нагрузка на трущиеся детали, Н; n – частота вращения (скорость перемещения), мин^{-1} ; η – вязкость смазки, $\text{м}^2/\text{с}$; T – температура деталей, К; τ – время приработки, ч; C – геометрические параметры деталей соединения, мм; K – качество смазки; ϵ – энергетические потери; m – износостойкость деталей сопряжения; d – способность рабочих слоёв подвергаться поверхностно-пластическому деформированию; $S_{\text{сб}}$ – сборочный зазор, мм.

Износ деталей в процессе приработки может достигать значительных величин.

Исследованиями [22, 23] получено, что в результате, проведённого ремонта двигателей возрастает скорость изнашивания деталей, по сравнению с новыми. Так, М.А. Кагарманов [25] отмечает, что у нового и отремонтированного двигателей увеличение зазора составило соответственно 5,6 и 10 процентов от предельного зазора в шатунном подшипнике.

Г.А. Кацилграс установила [26], что за первые 15 минут обкатки отремонтированного двигателя на стенде, износ деталей в 1,7...2,2 раза выше чем у нового.

К.Т. Кошкин отмечает [27], что простая разборка и сборка двигателя, без замены деталей, приводит к снижению ресурса деталей на 30 и более процентов.

В НПО «Ремдеталь» провели исследования [28, 29] по приработке основных соединений двигателей. Интенсивность изнашивания восстановленных соединений в период приработки превышает в 1,3...1,9 раза, чем у новых.

М.А. Халфин показал [30], что установка в узел новой детали в соединении с бывшей в эксплуатации увеличивает время приработки и снижает ресурс детали от 10 до 60 процентов.

Исследованиями Н.П. Воинова, И.Б. Гурвича, В.И. Казарцева, Р.Б. Кемпбела, Г.П. Шаронова и др. [31...35] установлено, что снижение износа деталей при приработке, снижает интенсивность изнашивания их в процессе эксплуатации, а, следовательно, увеличивает межремонтный ресурс.

На основании проведённого анализа следует, что в период стендовой обкатки необходимо снижение приработочного износа. Это можно осуществить путём правильного выбора режимов обкатки двигателей, использованием новых технологий, применением приработочных присадок.

1.2 Основные направления повышения качества и ускорения приработки сопрягаемых деталей двигателей после ремонта

Научное и практическое значение в совершенствовании процессов приработки деталей двигателя имеют работы С.Г. Арабяна, Н.П. Воинова, И.С. Вороницына, В.А. Владимирова, Л.М. Гаенко, А.С. Гуревича, В.В. Долбина, В.Г. Заренбина, И.Н. Карасика, М.А. Карпенко, П.М. Кривенко, Р.В. Кугеля, Н.Н. Маслова, Е.М. Мухина, С.С. Некрасова, М.Х. Нигаматова, П.И. Носихина, П.А. Ребиндера, Н.З. Савченко, В.В. Стрельцова, Н.В. Храмова, В.И. Цыпцына, Г.П. Шаронова и др. [36...58].



Рисунок 1.4 - Классификация мероприятий по ускорению приработки деталей двигателя

Согласно [55, 59], все мероприятия по ускорению приработки деталей двигателя (рисунок 1.4) можно разделить:

- 1) конструктивные, осуществляемые при изготовлении деталей;
- 2) технологические, осуществляемые при ремонте и восстановлении деталей;
- 3) эксплуатационные, осуществляемые при обкатке двигателей.

Ускорение и повышение качества приработки деталей двигателей, добиться конструктивными мероприятиями, в условиях ремонтного производства очень сложно и не всегда экономически целесообразно [60, 61]. Технологические мероприятия требуют материальных затрат, привлечения квалифицированных специалистов и дорогостоящего оборудования [62, 63].

1.3 Эксплуатационные мероприятия для ускорения приработки деталей при обкатке двигателей

Одним из наиболее перспективных направлений оптимизации процесса приработки являются эксплуатационные мероприятия [59], которые обеспечивают высокую интенсивность изнашивания, формирование оптимальной микрогеометрии поверхности деталей во время холодной обкатки с последующим максимальным снижением интенсивности изнашивания при горячей обкатке.

По своему физико-химическому действию прирабочные присадки можно разделить на ряд групп:

- инактивные вещества (ИВ);
- поверхностно-активные вещества (ПАВ);
- химически-активные вещества (ХАВ);
- композиции, способствующие избирательному переносу (КСИП).

По механизму действия прирабочные присадки делятся на следующие типы.

Присадки с использованием ПАВ (ДФИ – 1; ОГМ – 1, 2, 3 и другие) способствуют интенсификации процесса приработки трущихся поверхностей деталей за счет эффекта адсорбционного понижения прочности материалов. В качестве ПАВ наиболее часто применяют олеиновую, стеариновую и рицинолевуую кислоты, эфиры органических кислот, глицерин и другие. Необходимо отметить, что действие ПАВ ухудшается при высоких температурах, что может вызвать снижение противозадирных свойств [64, 65, 66, 67].

Инактивные присадки (Градис; АЛП – 1,2; Моликот – А; Ресурс; Ремол – 1; Деста – М; Гарант и др.). Общий недостаток приработки деталей на маслах с инактивными присадками: характер поверхности под слоем присадки остается прежним, и при использовании в дальнейшем чистого масла микронеровности вскрываются и сошлифовываются. Кроме того, эти присадки нерастворимы в моторных маслах и выпадают в осадок при хранении и фильтрации.

Трибополимеризующие присадки (ЭФ – 357; ЭФ – 262 и др.) применяют при холодной обкатке двигателей. Механизм действия этих присадок [68] основан на усилении адгезионного взаимодействия прирабатываемых поверхностей трения. Особенность этих составов – высокая прирабочная эффективность при сравнительно низкой температуре масла.

При горячей обкатке адгезионный эффект полимерных пленок исчезает, тогда как, только горячая обкатка под нагрузкой способствует формированию оптимальных физико-механических свойств поверхностей трения.

Химически – активные присадки (ОМ-2; ОКМ [69,70]; ДК-8 [71]) интенсифицируют химические процессы на трущихся поверхностях деталей, что приводит к образованию слоев из продуктов химического взаимодействия с металлом, которые разделяют контактирующие поверхности, тем самым, препятствуя схватыванию и задирам.

Рассмотренные химически активные присадки при всей их эффективности имеют следующие недостатки: токсичность; химическую активность присадок при увеличении нагрузки и температуры, что приводит к повышенному коррозионно-механическому изнашиванию деталей; трудность приготовления в условиях ремонтного производства.

Пластически деформирующие присадки (ОМД-8 [72]; VP-357 фирмы «Optimal» Германия; EP Supplement фирмы CRC Бельгия [73]) содержат цинковые, сурьмяные, свинцовые соли нафтяных и диалкилдитиофосфорных кислот, соединения бора, сульфида олова, алкилсвинец и комплексные соединения молибдена.

Пластически деформирующие присадки могут проявлять приработочные свойства только при обкатке под нагрузкой, что не согласуется с концепцией ускорения приработки в период холодной обкатки.

К присадкам реализующим эффект избирательного переноса – относится композиция КТЦМС, которая предназначена для улучшения антифрикционных, противоизносных и противозадирных свойств масел. При её использовании сокращается износ и время обкатки двигателя в 2 раза, увеличивается площадь приработки и на порядок уменьшается шероховатость поверхности. Недостаток композиции – трудность приготовления в заводских условиях. Присадка характеризуется общетоксичным действием [74].

По способу доставки приработочные присадки делятся на три группы: присадки к воздуху; топливу и маслу.

Применение приработочных масел, содержащих инертные вещества основано на том, что они, являясь мелкодисперсными, способствуют заполнению микронеровностей, хорошо прирабатывают трущиеся поверхности и не вступают в побочные реакции.

В институте неорганической химии академии наук Республики Беларусь разработана присадка, изготовленная обжигом (при 973...1073 К) каолина, добавляемого в масло в количестве 4...5 г. на 1 л [12]. Присадка

активно адсорбирует смолянистые и кислые продукты масла, заполняет неровности трущихся поверхностей, препятствуя появлению задиров и уменьшает износ. Однако при этом размеры частиц присадки увеличиваются, и она выпадает в осадок.

Присадка «Градис-4» содержит коллоидный графит [75], но из-за своей нестабильности, присадка не получила распространения.

В Самарском ГТУ под руководством Д.Г. Громаковского в Научно-техническом центре «Надежность технологических, энергетических и транспортных машин», разработана присадка «Стойкость» [76]. Активным элементом в ней является фторированный графит $(CF_x)_n$. При использовании присадки «Стойкость» уменьшается интенсивность износа на 25...30 %, нагрузка заедания увеличивается в 2 раза.

Присадка, содержащая дисульфид молибдена (MoS_2) , по данным [77,78,79], образует на трущихся поверхностях тонкие прочные плёнки, которые уменьшают износы при больших нагрузках. Такие же результаты получены [80], при исследовании обкатки двигателей ЗИЛ. Износ поршневых колец уменьшается на 30...50 %. Фирма «Дау Корнинг» рекомендует применять дисульфид молибдена после 20 ч работы, так как он замедляет приработку поршневых колец и цилиндров. Дисульфид молибдена не стабилен в моторном масле, особенно при попадании в него воды.

В.И. Цыпцын с учениками применил для качественной приработки сверхтонкие порошки меди и цинка (0,1...0,25 %) по массе, совместно с поверхностно-активной олеиновой кислотой (присадка ПМЦ-2) [81]. В результате действия на поверхностях трения образуются плёнки меди, заполняющие микронеровности и препятствующие задирам и схватываниям.

В.В.Сафонов [82] на основе ультрадисперсных порошков разработал приработочную присадку УДПЛ с активным веществом латуни. В результате стендовых испытаний было установлено: момент механических потерь снижается на 15...20 %, износ основных деталей ЦПГ и КШМ дизелей на 10...60 % меньше, чем на базовом масле М-10-Г₂.

Присадки, «Деста-М» и «Гарант», содержащие ультрадисперсные алмазные порошки [81] способствуют ускорению приработки деталей и упрочняют поверхности в 1,5...2,0 раза.

Общим недостатком инактивных веществ является то, что они, заполняя впадины микровыступов, не изменяют характер поверхности [12, 83].

Поверхностно-активные вещества образуют на поверхностях трения прочные адгезионные пленки. Ускорение приработки деталей основано на адсорбционном понижении прочности металла при реализации эффекта Ребиндера [83, 84]. К таким веществам относят: олеиновую кислоту; глицерин; эфиры органических кислот и др. К присадкам этого типа относят: «Экомин»; «Фриктол»; «Молиприз»; МОД и др.. Эти присадки с различным содержанием входят в состав прирабочных масел в качестве активных компонентов [80]. Такие присадки образуют на поверхностях трения прочную пленку, которая снижает трение, препятствует повышенным износам при работе с большими нагрузками.

Химически-активные вещества приводят к образованию на поверхностях трения, так называемых «вторичных» слоёв, которые имеют меньшую твердость и лучше прирабатываются.

НАТИ совместно с Ленинградским опытным нефтемаслозаводом им. Шаумяна (ЛОНМЗ) разработаны прирабочные масла: ОМ-2 с присадкой «Дипроксид» (соединения серы) и ОКМ (обкаточно-консервационное масло) с присадкой ЛЗ-301 (серофосфорное соединение). При использовании этих масел на Владимирском тракторном заводе время стендовой обкатки сокращается до 45 мин [3].

В.И. Цыпцын исследовал присадку–дигентилфосфинат иттрия (ДФИ-1) [83]. Присадка, добавляемая к маслу в количестве 0,9...1,1% по массе, обеспечивает ускорение приработки и повышение износостойкости трущихся деталей до 2 раз.

В Тюменском СХИ разработана присадка ДК-8 (бензил-этилксантогенат). При её использовании время обкатки сокращается до 3 раз, а износ поршневых колец и гильз цилиндров снижается до 2 раз [85].

К недостаткам химически-активных присадок относятся: повышенная кор-розионная активность при значительных температурах и нагрузках; токсичность; сложное промышленное производство.

Широкое распространение получили металлоплакирующие присадки, реализующие явление избирательного переноса (ИП) металла при трении, открытое Гаркуновым Д.Н. и Крагельским И.В.. Явление ИП основано на том, что при определенных условиях наблюдается образование пленок переноса (антифрикционных пленок) металлов из состава присадок, обеспечивающих низкое трение и снижение износа деталей [6,86,87].

Во Владимирском политехническом институте Гребенюк М.Н., Терегеря В.В. разработали присадку «Гретерин-3». По данным авторов присадка 1,0 % к маслу снижает износ деталей в 2...3 раза, однако не ускоряет приработку трущихся деталей. Состав присадки: хлорная медь-3,7 %; неонол-11 %; бутиловый спирт-3,7 %, олеиновая кислота -74 %; глицерин-7,6 %.

В Московском технологическом институте совместно с Куйбышевским филиалом ВНИИНП разработана присадка МКФ-18, она позволяет улучшить противоизносные свойства поверхностей трения [88].

В МГАУ разработана присадка ОГМ-3 [89], состоящая из олеиновой кислоты и хлорокиси меди, которая вводится в количестве 2 % к массе масла.

В работе [90] сравнивали моторное масло М-8-В с присадкой ОГМ-3 и приработочное масло ОМД-8, разработанное в Электрогорском филиале ВНИИНП, содержащее органическое соединение молибдена. По результатам исследований обкатка на масле ОМД-8 приводит к образованию пленки дисульфида молибдена, что снижает момент трения и препятствует формированию оптимальной шероховатости поверхностей. Напротив, применение металлоплакирующей присадки ОГМ-3 позволяет проводить ускоренную обкатку двигателей, получить качественную приработку деталей с наименьшим износом. Время обкатки сокращается в 4 раза по сравнению с типовой [90].

В Ульяновском филиале Военной Академии тыла и транспорта и Ульяновской ГСХА учеными Варнаковым В.В., Карпенко М.А., Артемовым

В.В. была разработана приработочная присадка к моторному маслу «ВАРКС», содержащая ПАВ и ХАВ [91,92]. В состав присадки входят: олеиновая кислота, тетраборат этилендиаммония и октадецилсульфанат натрия. Лабораторные испытания показали, что при использовании присадки момент силы трения снижается на 76,5 %. Время обкатки сокращается в 3,8 раза, по сравнению с чистым маслом М-8-В.

В Ленинградском КТЦ разработана присадка КТЦМС-1. По данным авторов [88] применение присадки позволяет сократить время обкатки двигателей в 2 раза, при этом на порядок уменьшается шероховатость поверхностей трения, снижается износ.

При обкатке двигателя в зону работы деталей ЦПГ, особенно в месте остановки верхнего компрессионного кольца, поступление смазки ограничено. Отсюда для ускорения приработки этих деталей используют присадки к топливу и воздуху.

Из известных наиболее распространены присадки к дизельному топливу типа АЛП [1]. При сгорании они образуют окись алюминия, обеспечивающую ускорение приработки.

Храмцов Н.В. вводил присадку ДК-8 в бензин (3,0 % по массе) при обкатке двигателей ЗМЗ-53. Сравнивая с АЛП-2, присадка ДК-8 показала большую эффективность. Износ деталей ЦПГ уменьшился на 10...26 % [93, 94].

Цыпцын В.И. применил присадку РКС (растворенная и коллоидная сера) к топливу, что обеспечивало улучшение приработки деталей за счет образования сульфидов железа [81].

Недостатком присадок к топливу является то, что они не охватывают период холодной обкатки, когда требуется максимально ускорить формирование микрогеометрии поверхностей трения деталей. При сгорании эти присадки образуют нагар на деталях топливной аппаратуры дизелей и свеч карбюраторных двигателей. Поэтому присадки к топливу практически не используют.

Наибольший интерес представляют присадки к воздуху, так как они используются при холодной и горячей приработке двигателей [95].

В качестве присадки к воздуху применяли четыреххлористое олово. Этим составом пропитывали воздушный фильтр. Недостаток - высокая токсичность [1].

П.И. Носихин в работе [94] использовал присадку АЛП-ПМС в период горячей обкатки двигателей. В сочетании с маслом ОМД-8 обкатка сократилась при этом в 3 раза, а ресурс двигателей ЯМЗ-238НБ увеличился на 19 %.

В.В. Стрельцов [19] впервые применил металлоблокирующие присадки к воздуху для карбюраторных двигателей ЗМЗ-53 и ЗИЛ-130. Присадка используется только в период холодной обкатки.

Обзор литературных источников позволяет наметить перспективные пути решения проблемы ускорения приработки деталей отремонтированных двигателей в период стендовой обкатки. Наиболее экономичным и эффективным является комплексное применение присадок к маслу и воздуху.

Выводы

1 Срок службы двигателя и его межремонтный ресурс зависит от качества приработки его деталей в период послеремонтной обкатки. Для достижения полной приработки деталей двигателя требуется 30...60 часов работы. Ускорение приработки путем правильного выбора режимов обкатки двигателей, использованием новых технологий, применением приработочных присадок позволяет сократить время обкатки двигателя до 30 минут.

2 В условиях сельскохозяйственных предприятий наиболее экономичными и эффективными являются эксплуатационные мероприятия по ускорению приработки деталей двигателя, заключающиеся в применении комплексных присадок к маслу и воздуху. Это позволяет снизить приработочные износы и тем самым увеличить ресурс двигателя в целом.

3 Анализ применяемых присадок для приработки деталей двигателей после ремонта выявил наиболее перспективное использование комплексных присадок, содержащих поверхностно-активные и химически активные вещества.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСКОРЕННОЙ ПРИРАБОТКИ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБКАТКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ (поверхностно-активных и химически-активных веществ)

2.1 Взаимосвязь процессов трения, поверхностных явлений и пленок переноса

Расширение объема знаний в области физики, химии и механики ведет к пониманию сложности структуры поверхностного слоя, состоящего из дефектного слоя материала твердого тела, образовавшегося при его обработке, пленок окислов, хемосорбированных и адсорбированных слоев.

Ф. Боуден и Д. Тейбор, [64] и другие авторы использовали понятие молекулярных сил при описании контактного взаимодействия. Крагельским И.В., в общее уравнение силы трения, наряду с механической компонентой, была введена молекулярная составляющая [96, 97]. Совместное рассмотрение молекулярных сил и деформируемости граничного слоя привело Крагельского И.В. к формулировке понятия «третьего тела» в контакте. В последние годы число работ, в которых граничный слой смазочной среды с прилегающими пленками на твердых контактирующих поверхностях рассматривается как один из основных факторов взаимодействия, резко возросло [13, 98, 99].

Исследования, связанные с ИП интересны тем, что в них использовался, как правило, комплексный подход к пониманию фрикционного взаимодействия с позиций физико-химической механики, основы которой заложены работами Ребиндера П.А. [100, 101].

Появление высокоэффективных физических методов (растровая электронная микроскопия, ОЖЕ-спектроскопия) исследования структуры и состава поверхностных слоев твердых тел позволило получить принципиальные результаты, которые можно использовать при описании

изнашивания как динамического комплекса процессов разрушения исходных структур, формирования новых структур и их разрушения. Это дало толчок к созданию теории фрикционного взаимодействия на основе описания процессов массопереноса при трении.

Одна из таких теорий предложена Д.И. Ригни [102, 103]. Он предложил модель трения и выражение для коэффициента трения [102]:

$$\mu(h) = [1 - f(h)] \frac{(n \cdot A)^e}{P} \left\{ \tau_{\max}^e \left[F\left(\frac{\tau_s^e}{\tau_{\max}^e}\right) - \exp(-\alpha^e \cdot h) \cdot F\left(\frac{\tau_l}{\tau_{\max}^e}\right) \right] + \tau_{\max} \cdot \exp(-\alpha^e \cdot h) \cdot F\left(\frac{\tau_l}{\tau_{\max}}\right) \right\} + f(h) \frac{n \cdot A}{P} \cdot \tau_{\max} \cdot F\left(\frac{\tau_s}{\tau_{\max}}\right), \quad (2.1)$$

где h - толщина перенесенной пленки; τ_s - сопротивление сдвигу на поверхности свободной от пленки; τ_s^e - сопротивление сдвигу на поверхности пленки; τ_l - сопротивление сдвигу между пленкой и поверхностью детали; τ_{\max}^e - сопротивление сдвигу в пленке переноса; A - площадь единичного контакта; n - число контактов; P - нормальная нагрузка; $f(h)$ - доля неровностей свободных от пленки; α - коэффициент, характеризующий снижение пластичности в пленке переноса; e - показатель, характеризующий свойства пленки переноса.

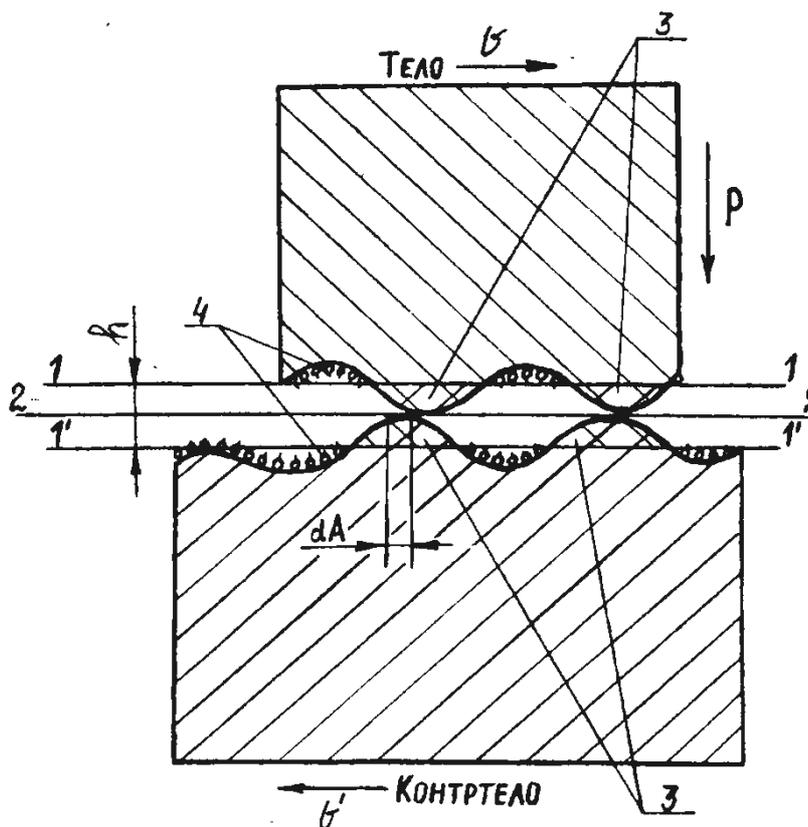
Приведенное уравнение учитывает трение в перенесенной пленке, в основном материале под пленкой и в материале свободном от пленки. Функция $f(T)$ -нормирована так, что ее значение очень мало при $T = 1$ мкм; при $T = 0 \rightarrow f(T) = 1$; при $T = \infty \rightarrow f(T) = 0$.

Функция $F = \tau / \tau_{\max}$ монотонно возрастает до единицы при $\tau / \tau_{\max} \rightarrow 1$, а ее вид зависит от формы кривой «напряжение-деформации». Экспоненциальный затухающий член введен по той причине, что в поверхностном слое наблюдаются большие градиенты сдвига и смещения.

Уравнение (2.1) описывает фрикционное взаимодействие в том случае, когда мягкая пленка переноса прочно закреплена на основном материале, а поверхность скольжения совпадает с границей раздела пленки и контртела. Однако при сдвиге могут наблюдаться такие случаи, когда плоскость скольжения будет находиться внутри пленки или на границе раздела пленки и основного материала. В последнем случае создаются условия для отслаивания перенесенного материала.

В связи с этим, более общим случаем фрикционного взаимодействия [19] является образование перенесенной пленки на обеих поверхностях трения деталей (см. рисунок 2.1).

Поверхности тел покрыты слоем перенесенного вещества (равной толщины), а скольжение реализуется либо на границе раздела 2-2 с коэффициентом трения μ_1 , либо на границе раздела 1-1 (1'-1') с коэффициентом μ_2 . Если $\mu_1 \geq \mu_2$ пленка на поверхности тела может отслаиваться частицами.



1-1, (1'-1')-границы раздела перенесенной пленки и поверхностного слоя металла тел; 2-2-граница раздела на уровне «пленка-пленка» перенесенные на взаимодействующие тела; 3-пленки перенесенные на поверхности тел трения; 4-адсорбированный и хемосорбированный слой смазки; v , v' - скорости движения; P -нагрузка; dA -площадь единичного контакта; h -толщина перенесенных пленок.

Рисунок 2.1 – Схема фрикционного взаимодействия поверхностей, покрытых пленками переноса

Структура пленки переноса характеризуется существенной неоднородностью, большим числом пор, являющихся микрорезервуарами для смазочного материала. Мелкодисперсные частицы металла с активной

поверхностью служат также центрами образования полимероподобных продуктов. Присутствие в зоне контакта поверхностно-активных веществ с металлами приводит к реализации особого механизма фрикционного взаимодействия, характеризующегося коллоидной системой частиц в смазочном материале и структурными превращениями на поверхности раздела [19]. Это приводит к быстрой адаптации пары трения и переходу ее в установившийся режим работы.

Изменение режима трения или свойств поверхностного слоя значительно влияют на величину износа и силу трения.

При трении, как и при ударе, шероховатости граничных поверхностей, взаимодействуя, испытывают как упругие, так и сильные локальные пластические деформации с нарушением структуры и появлением дислокаций. В результате увеличивается свободная поверхностная энергия, и контактная зона претерпевает состояние сильного активирования. Это состояние сопровождается излучением электронов, преобразованием веществ, активацией химических реакций.

Известно, что изменение времени жизни межатомной связи под нагрузкой (долговечность тела) от напряжения (σ) и температуры (T) описывается уравнением С.Н. Журкова [104], лежащим в основе кинетической природы разрушения твердых тел (см. уравнение 2.2):

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}, \quad (2.2)$$

где τ – время до разрушения, с; τ_0 – период тепловых колебаний атомов, с; U_0 – величина энергетического барьера, Дж; σ – напряжение, мПа; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; γ – коэффициент, характеризующий прочностные свойства твердого тела; T – абсолютная температура, К.

Это общее уравнение для долговечности справедливо для большого числа самых разнообразных материалов в широком интервале напряжений и температур. В среднем для всех материалов, независимо от их химического состава, типов связи и структуры, $\tau_0 \approx 10^{-13}$ с. Начальный энергетический

барьер U_0 (энергия деструкции связи) разный для разных материалов и по величине близок к значению энергии от активации распада межатомных связей в твердых телах. Коэффициент γ сильно зависит структурных изменений: режима термообработки, содержания примесей, степени ориентации (для полимеров) и пластификации, кристаллографической ориентации и плотности дислокаций.

Такая же функциональная зависимость (см. уравнение 2.2) кинетических параметров от температуры наблюдается и для множества других явлений (диффузии, испарения, протекания химических реакций и так далее), порождаемых хаотичностью теплового движения атомов и отсюда неравномерностью распределения тепловой энергии между ними.

По-видимому, правомерным будет применение подобной зависимости и для процесса динамического взаимодействия тел, в частности для процесса граничного трения металлов. Тогда, если это процесс протекания трибохимических реакций, то U_0 – тот избыток энергии по сравнению со средней энергией молекул при данной температуре, которой должны обладать молекулы, вступающие в химическую реакцию.

Для коэффициента трения f , аналогичное по виду уравнение имеет вид:

$$f=f \cdot \exp \frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T} , \quad (2.3)$$

Эксперименты, проведенные в физико-техническом институте Белорусской академии наук совместно с Бердянским опытным маслозаводом [106] показали, что данное уравнение правильно описывает изменение коэффициента трения в интервале нагрузок от 20 до 240 мПа.

Под модифицированием поверхностей трения понимают химическое насыщение трущихся поверхностей в процессе самого трения. К химическому модифицированию можно отнести и процесс избирательного переноса.

Химическая модификация поверхностей трения зависит от наличия в

смазочном материале химически-активных веществ, взаимодействующих с металлическими поверхностями, снижающих предрасположенность поверхностей к образованию металлических связей, препятствующих схватыванию и повышенному изнашиванию при тяжелых режимах трения. В качестве критерия ($\Pi_{гр.х.}$), учитывающего химическую модификацию, можно принять соотношение:

$$\Pi_{гр.х.} = \frac{R \cdot T}{U}, \quad (2.4)$$

где U – энергия активации распада межатомных связей химически модифицированных слоев, Дж; T – абсолютная температура, К; $R=8,31$, Дж/моль·К - универсальная газовая постоянная.

Износостойкость поверхностей будет зависеть от соотношения скорости истирания модифицированных слоев и их образования в процессе трения, от физико-химических свойств этих слоев, их размеров (толщины и глубины).

Все это показывает, что путем целенаправленного изменения внешних условий, состава и природы смазки можно изменять свойства поверхностей трения в нужном направлении.

2.2 Теоретические подходы применения различных приработочных присадок при обкатке двигателей

Рассмотрим с точки зрения химмотологии процесс изнашивания деталей при обкатке. Можно выделить пять видов фрикционного взаимодействия.

1) Упругое деформирование. Напряжения в пятне контакта в этом случае не превышают предела текучести материала, а изнашивание происходит в результате фрикционной усталости.

2) Пластическое отеснение материала. Напряжения достигают предела текучести, но материал обтекает внедрившиеся микровыступы. Изнашивание – результат малоциклового фрикционной усталости.

3) Микрорезание. Напряжения достигают предела прочности, изнашивание происходит за счет отрыва микростружек.

4) Адгезионное нарушение фрикционной связи. За счет прилипания разрушается защитная адгезионная пленка на поверхности металла.

5) Когезионный отрыв. Прочность фрикционной связи превышает прочность основного металла, происходит схватывание и глубинное вырывание металла.

Так как микровыступы шероховатой поверхности неодинаковы по высоте и форме, то в процессе приработки имеют место все пять видов фрикционного взаимодействия.

На процессы микрорезания и пластического отеснения материала можно воздействовать путем внедрения пластифицирующих присадок в обкаточные масла. Процесс адгезионного нарушения фрикционной связи может быть изменен путем введения адгезионных присадок. Процесс когезионного отрыва может быть оптимизирован за счет противозадирных свойств масел.

Таким образом, применение наиболее рационального набора присадок будет существенно влиять на износ деталей двигателя.

В процессе жизненного цикла износ трущихся деталей можно рассматривать как сумму двух случайных функций.

$$U(t) = f_1(t) + f_2(t), \quad (2.5)$$

где $f_1(t)$ – функция, отражающая приработочный износ; $f_2(t)$ – функция, отражающая износ при эксплуатации.

Интенсивность изнашивания деталей машин в процессе приработки характеризуется комплексным состоянием поверхностей трения. В соответствии со сложившимся представлением о приработке контактирующих поверхностей деталей, один из ее результатов – образование равновесной шероховатости, которая не зависит от исходной и определяется только условиями трения. При достижении равновесной

шероховатости коэффициент трения и интенсивность изнашивания становятся минимальными. Только после образования равновесного состояния поверхностного слоя можно говорить о завершении процесса приработки. Отсюда, повышение качества процесса приработки деталей состоит в сокращении времени достижения равновесного состояния контактирующих поверхностей, характеризующегося наилучшими трибологическими параметрами с точки зрения дальнейшей эксплуатации двигателя.

С точки зрения энергетических превращений наступление равновесного состояния происходит пропорционально приращению энергии активации $d(A_a)$ в единицу времени [55], которое определяют по зависимости (2.6):

$$10adA_a = \frac{dS}{dt} = a \left(\frac{dA_T}{dt} - \frac{dA_0}{dt} \right), \quad (2.6)$$

где a – постоянный коэффициент, с/Н; S – площадь контакта, м²; dA_T – энергия трения, Дж; dA_0 – отводимая энергия, Дж.

При постоянстве площади контакта ($dS/dt = 0$) процесс переходит в равновесное состояние. В процессе приработки отводимая энергия изменяется по сложному закону и при некотором критическом значении $S = S_{кр}$ достигает предельного значения и остается неизменной или начинает уменьшаться.

Скорость увеличения площади контакта dS/dt больше при наличии в масле специальных прирабочных присадок. Это объясняется более низким сопротивлением сдвигу пленок переноса, а также тем, что антифрикционные покрытия в большинстве случаев более пластичны по сравнению с основным слоем металла. Разделение поверхностей легкоплавкими эвтектиками улучшает их прирабатываемость, препятствует металлическому схватыванию на участках контакта в начальный момент и повышает несущую способность трущихся пар. В процессе работы сопротивляемость поверхностей износу и задиру определяется свойствами материалов соединяемых деталей и

используемых обкаточных масел.

Процессы контакта, трения и изнашивания, как правило, связаны с непосредственными физическими взаимодействиями поверхностей, совершающих относительные движения. На все эти процессы оказывает влияние масло, выполняющее следующие функции: разделяет трущиеся поверхности и уменьшает площадь непосредственного контакта металлических поверхностей; изменяет пластичные свойства взаимодействующих поверхностей; охлаждает поверхности трения и смывает с них или вымывает из зазоров частицы металлов и их оксидов, оказывающие абразивное воздействие на поверхности трения.

При наличии пленки переноса, трущиеся поверхности перемещаются одна относительно другой с малым сопротивлением сдвигу и без каких-либо повреждений. В зависимости от толщины пленки ($10^{-3} \dots 10^{-2}$ мкм), распределения в ней поверхностей профилей и степени геометрического прилегания поверхностей возникают различные режимы смазывания.

Приработка деталей двигателя происходит в режиме граничной смазки. Этот режим характеризуется следующими особенностями:

- поверхности расположены на близком расстоянии и между поверхностями существует контакт;
- гидродинамические явления и влияние объемных реологических свойств масла малы и несущественны;
- трибологическое поведение системы определяется поверхностными взаимодействиями между тонкими пленками переноса и твердыми поверхностями.

Основное назначение обкаточных масел состоит в создании между движущимися поверхностями пленки, способной уменьшить число прямых взаимодействий твердых тел и характеризующейся малым сопротивлением сдвигу. Граничная смазка должна обладать высокой адгезией к поверхности трения, уменьшать изнашивание и обладать малой прочностью на срез, обеспечивающей низкое трение.

Взаимодействие твердого тела с маслом, приводящее к появлению защитной граничной пленки, могут быть представлены тремя механизмами: физической и химической адсорбцией, химической реакцией.

Физическая адсорбция характеризуется тем, что молекулы смазки удерживаются на поверхности металла силами Ван-дер-Ваальса. Полярные молекулы смазки, например, стеариновой кислоты, присоединяются к металлу главным образом в вертикальной ориентации, образуя прочную пленку. Эта пленка противостоит проникновению неровностей и тем самым препятствует контакту металла с металлом. Многие молекулы сближаются предельно плотно и упрочняют пленку поперечными когезионными силами. Кроме того, зона малой прочности на срез создается между наружными поверхностями двух монослоев, адсорбированных прилегающими металлическими поверхностями.

Система граничной смазки с физической адсорбцией пленки чувствительна к температуре, поскольку нагрев вызывает десорбцию, нарушение ориентации и плавление пленки. Поэтому граничная смазка с преобладанием механизма физической адсорбции применима при низких температурах и в условиях малого тепловыделения при трении, то есть при малых нагрузках и скоростях скольжения трущихся тел.

В системе граничной смазки может возникать химическая адсорбция (хемосорбция), когда молекулы смазки удерживаются на поверхности химическими связями. Примером служит взаимодействие стеариновой кислоты с окисью железа в присутствии воды с образованием на поверхности пленки «металлического мыла» из стеарата железа. «Металлическое мыло» имеет более высокие прочностные свойства на срез и температуру плавления (393 К), что повышает устойчивость пленки.

Химически адсорбированные пленки обладают эффективной смазывающей способностью, вплоть до температуры плавления, независимо от того, образованы они на поверхности реагирующей или нет. Они обеспечивают смазывание при умеренных температурах, нагрузках,

скоростях скольжения, но оказываются непригодными в тяжелых рабочих условиях из-за нарушения ориентации, размягчения или плавления пленки.

В системе с граничной смазкой между твердыми поверхностями и молекулами смазки могут протекать химические реакции, когда существует обмен валентными электронами, и образуются новые химические вещества (пленки солей металлов, обладающие малой прочностью на срез, но высокой температурой плавления). Эти пленки, более устойчивы, чем любая физически или химически адсорбированная пленка. Граничные смазки, возникающие в результате химической реакции, пригодны для высоких нагрузок, температур и скоростей скольжения, но они не должны быть слишком активными. В противном случае развивается коррозионно-механическое изнашивание.

На рисунке 2.2 представлена зависимость коэффициента трения от температуры при работе на различных маслах [55].

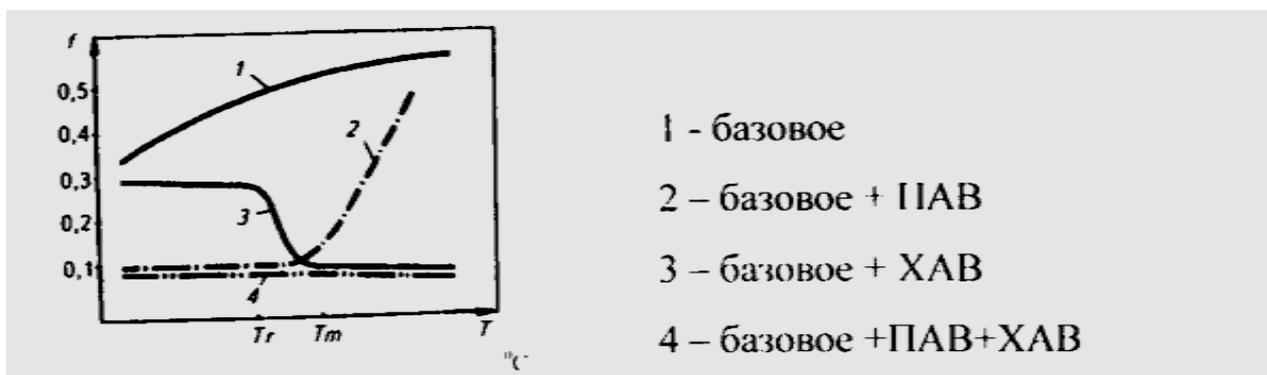


Рисунок 2.2 – Зависимость коэффициента трения от температуры

Кривая (1) относится к системе смазывания с неполярным базовым маслом. Она показывает, что относительно высокий первоначальный коэффициент трения еще больше возрастает с ростом температуры, поскольку слабые адсорбционные связи разрываются.

Кривая (2) относится к маслу с ПАВ, которая, взаимодействуя с поверхностью металла, образует «металлическое мыло», легко сдвигающееся на площади реального контакта. Вплоть до температуры

плавления «металлического мыла» (T_m) трение мало и относительно постоянно, но выше этой температуры оно резко возрастает.

Кривая (3) характерна для масла с ХАВ, которое очень медленно реагирует при низких температурах. По достижении температуры (T_r) происходит химическая реакция, и коэффициент трения уменьшается, поскольку возрастает интенсивность образования пленки.

Кривая (4) представляет собой гипотетическую зависимость при эффективной комбинации кривых (2) и (3), что характерно для КСИП. Надежное смазывание обеспечивается жирной кислотой до температуры (T_r). Выше этой температуры большую часть смазывающего действия оказывает химически активная присадка.

Работоспособность масла определяется стабильностью пленки на неровностях металла, которая, в свою очередь, зависит от взаимодействия металла, масла и окружающей среды, а также от тепловыделения на поверхностях раздела при трении. Повреждение поверхности трения детали возникает в случае, если контактное давление превысит величину несущей способности пленки смазки. Разрушение поверхностных пленок может происходить поэтапно. Вначале разрушаются или термически разлагаются наружные слои (физически или химически адсорбированные), а затем внутренние (оксидные и упрочненные). Таким образом, механизмы нарушения работоспособности таких пленок масла на трущихся поверхностях деталей определяются физической и химической природой защитных поверхностных слоев, а также условиями контакта неровностей.

2.3 Теоретическое обоснование и формирование пленок переноса

В режиме граничной смазки, который реализуется в процессе обкатки, толщина пленки масла составляет несколько мономолекулярных слоев и нагрузка почти полностью воспринимается трущимися поверхностями. Очевидно, что при режиме граничной смазки химмотологические процессы взаимодействия на поверхностях раздела «твердое тело – жидкость – твердое

тело » во многом определяют характер изнашивания трущихся деталей. А они в свою очередь определяются набором приработочных присадок.

Химмотологический анализ составов приработочных присадок различного типа и процессов, протекающих на поверхности деталей двигателя, при обкатке показал, что для повышения качества и ускорения приработки нужна комплексная присадка, которая включала бы в себя ПАВ и ХАВ.

Для уменьшения износа и сил трения при контактном взаимодействии при трении должны наблюдаться следующие явления [18]:

- размягчение поверхностного слоя в результате избирательного растворения компонентов сплава;
- удержание частиц износа в зазоре электрическими силами из-за наличия двойного, образующегося в результате трибодеструкции электрического слоя;
- протекание восстановительных процессов, определяющих безокислительное трение;
- повышение способности поверхностного слоя к адсорбционному пластифицированию.

Всем этим качествам отвечает присадка «Варкс», разработанная М.А. Карпенко [45], В.В. Артемовым [91].

Состав приработочной присадки в процентах по массе:

- олеиновая кислота $C_{17}H_{33}COOH$ – 2,4%;
- тетраборат этилендиаммония $[C_2H_4(NH_3)_2]H_4B_4O_9$ – 0,1%;
- октадецилсульфанат натрия $C_{18}H_{37}SO_3Na$ – 0,5%;
- минеральное масло – до 100 %.

Вследствие существенных различий условий протекания процесса приработки на разных стадиях обкатки (холодной, горячей без нагрузки, горячей под нагрузкой) рассмотрим механизм действия данной присадки поэтапно [105].

В период холодной обкатки приработочный эффект достигается за счет ПАВ, в качестве которой выступает олеиновая кислота и вода растворенная в масле.

Молекулы присадки адсорбируются на поверхности металла с образованием «металлических мыл», реализуя эффект П.А. Ребиндера, заключающегося в том, что при наличии в масле полярно-активных молекул они создают граничные адсорбционные пленки на поверхности.

Так как, металлические детали состоят из огромного количества мельчайших кристалликов, имеющих разнообразные дефекты, что облегчает проникновение в глубь металлов активных ингредиентов, выделяющихся из молекул присадок при их взаимодействии с металлом. Поэтому, на поверхности металла уже при температуре 293 К–323 К происходят существенные химические превращения, которые протекают быстро и на большой глубине.

При взаимодействии октадецилсульфата натрия с металлами, предположительно, образуются кристаллические пленки с достаточно толстым промежуточным слоем, имеющим большое количество слоев молекул сульфидов металла, в которых содержание серы снижается по мере удаления от поверхности в глубь пленки. При этом кристаллическая решетка металла постепенно переходит в кристаллическую структуру сульфидной части пленки, благодаря чему создается более полное кристаллохимическое соответствие смежных слоев пленки. В промежуточном слое пленки, особенно в той части, которая ближе к наружной поверхности, находятся продукты термоокислительного распада присадки, имеющие атомы серы и небольшие углеводородные радикалы.

В граничном слое кристаллической решетки атомы серы могут быть общими для молекул присадок и сульфидов металлов (когерентная связь), благодаря чему увеличивается прочность связи присадки с сульфитами металлов, а, следовательно, и с металлом.

В дальнейшем, при проведении горячей обкатки со значительным повышением температуры в зоне трения происходит дезориентация адсорбированных молекул. Поэтому, на данном этапе, повышается роль тетробората этилендиаммония, который уже при температуре 513 К – 523 К,

по формуле (2.7) разлагается на оксид бора, этилендиамин и воду:



Оксид бора хемосорбируется на поверхности металла за счет свободной атомной орбитали бора и валентных электронов металла. При этом происходит заполнение оксидом бора микротрещин. Бор, как известно, повышает жаропрочность и износостойкость. Этилендиамин оказывает стабилизирующее воздействие на масляную композицию и взаимодействуя с водой дает щелочную, среду по уровню которой, видимо можно судить о срабатываемости присадки.

2.4 Способ холодной обкатки двигателей с применением присадки ВАРКС к воздушно-присадочной смеси, как направление формирования пленок переноса

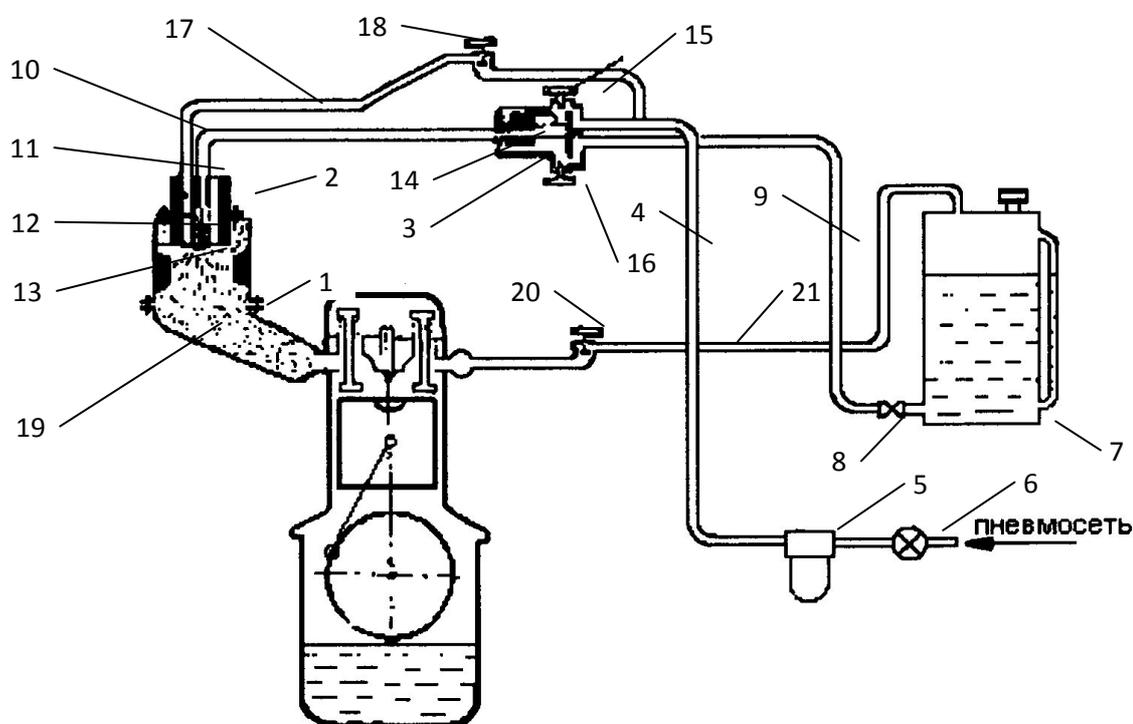
При обкатке двигателя в зону работы деталей ЦПГ, особенно в месте остановки верхнего компрессионного кольца, поступление смазки ограничено. Отсюда для ускорения приработки этих деталей используют присадки к топливу и воздуху.

Добавление присадок к топливу приводит к ухудшению работы топливной аппаратуры, а, именно, повышенный износ игл распылителей форсунок, износ и заедание плунжерных пар топливных насосов, засорение отверстий жиклеров.

Таким образом, применение устройства для подачи приработочной присадки в камеру сгорания ДВС ускорит процесс приработки цилиндропоршневой группы двигателя, исключая при этом отрицательное влияние приработочных присадок на другие узлы и детали двигателя за счет подачи их тщательно распыленными в объеме впускного воздуха в цилиндры двигателя.

Устройство для подачи приработочной присадки в камеру сгорания, разработано в Московском институте инженеров сельскохозяйственного

производства им. В.П. Горячкина [107]. В данном устройстве в качестве распылителя используется конус с гладкой поверхностью, установленный соосно перед центральным каналом. Однако, как показывает практика, гладкая поверхность конусов не позволяет добиться качественного распыла воздушно-присадочной смеси. В результате, происходит неравномерное распределение вещества присадки по объему камеры сгорания. Одни участки поверхностей пар трения получают избыточное количество присадок, в то время как другие участки остаются непокрытыми или покрытыми недостаточным количеством присадок. Недостатком этого приспособления является его узкая специализация.



1- коллектор; 2- распылитель; 3 - инжектор; 4 - воздуховод; 5- влагоотделитель; 6 - воздушный кран; 7 - ёмкость; 8 – вентиль; 9 – трубопровод; 10 - кольцевой канал; 11- центральный канал; 12 – спираль; 13 - насадка; 14 - камера смешения; 15, 16 - первый и второй вентиль; 17 - обводной трубопровод; 18 - третий вентиль; 19 – воздушно-присадочная смесь; 20 – четвертый вентиль; 21 – трубопровод.

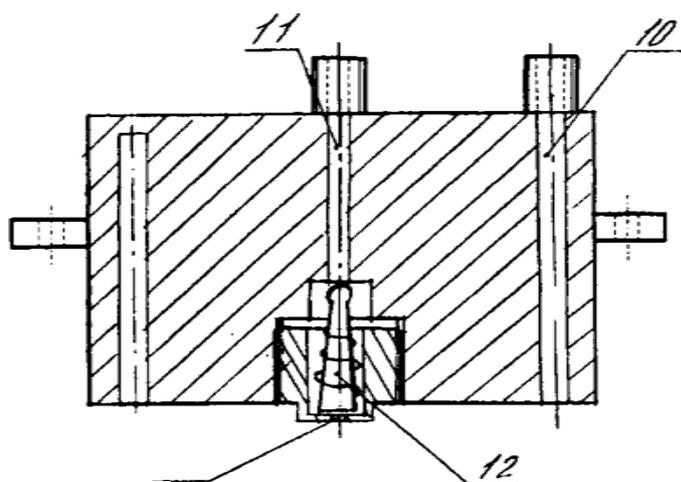
Рисунок 2.3 - Схема устройства для подачи приработочной присадки в камеру сгорания двигателя

Поэтому предлагается универсальное устройство (рис. 2.3) для подачи приработочной присадки в камеру сгорания двигателя, для повышения

качества и ускорения приработки деталей цилиндропоршневой группы двигателя [108].

Устройство работает следующим образом. Сжатый воздух из пневмосети через воздушный кран 6, влагоотделитель 5, воздухопровод 4 поступает в инжектор 3 и через обводной трубопровод 17 в кольцевой канал распылителя. Проходя через инжектор 3, сжатый воздух создает в нем разрежение, под действием которого прирабочная присадка из емкости 7 поступает через вентиль 8, трубопровод 9 в инжектор и далее в камеру смешивания 14 инжектора 3, где происходит образование воздушно-присадочной смеси, которая через центральный канал 11 поступает во впускной коллектор 1 двигателя. Расход прирабочной присадки регулируются первым вентилем 15, регулирующим величину разрежения в инжекторе, и вторым вентилем 16, ограничивающим ее поступление в инжектор. Угол конуса распыла воздушно-присадочной смеси во впускном коллекторе регулируется третьим вентилем 18, регулирующим расход сжатого воздуха.

Конус с фасонной поверхностью 12, позволяет обеспечить тщательное и полное, а значит качественное распыливание воздушно-присадочной смеси (рис. 2.4).



10- кольцевой канал, 11- центральный канал; 12- насадка; 22 - выпускное отверстие.

Рисунок 2.4 - Распылитель с расположенным внутри конусом с фасонной поверхностью

Данный эффект достигается при прохождении воздушного потока, выходящего из центрального канала 11, через спиральную ленту на поверхности конуса 12 и выходного оверстия 22.

В результате создается особое вихревое движение потока воздуха, которое дополнительно распыляет воздушно-присадочную смесь, выходящую из кольцевого канала 10. При этом во всасывающем коллекторе создается своеобразный кольцевой поток воздушно-присадочной смеси, пронизывающий весь впускной воздух, проходящий через коллектор в камеры сгорания двигателя. Таким образом, приработочная присадка, тщательно распыленная во всем объеме впускного воздуха, попадает в цилиндры обкатываемого двигателя.

Это устройство позволяет добиться более качественной приработки пар трения цилиндропоршневой группы и тем самым увеличить моторесурс двигателя. На данное устройство подана заявка на патент № 2004127848.

2.5 Оптимизация режимов ускоренной обкатки двигателей

В соответствии с разработанной методикой [55] продолжительность обкатки определяют, исходя из необходимого приработочного износа и суммарной средней скорости изнашивания гильз цилиндров и поршневых колец в этот период по формуле (2.8):

$$t = \frac{1}{|q|} \cdot \frac{\sum [I_0]}{(\bar{v}_{ог} + \bar{v}_{ок})}, \quad (2.8)$$

где $\sum [I_0]$ - суммарный необходимый приработочный износ гильз цилиндров и поршневых колец, м; q - показатель характеризующий темп изменения скорости изнашивания и зависящий от исходной шероховатости поверхностей трения; $\bar{v}_{ог}$ и $\bar{v}_{ок}$ - средние скорости изнашивания за период обкатки гильз цилиндров и поршневых колец, м/ч.

Суммарный приработочный износ, необходимый для макроприработки гильз цилиндров и поршневых колец находят, используя изменение профилограмм за время приработки:

$$\sum [I_0] = (R_{\max}^z + R_{\max \text{ до обкатки}}^k) - (R_{\max}^z + R_{\max}^k), \quad (2.9)$$

где R_{\max}^z ; R_{\max}^k - максимальная шероховатость гильз цилиндров и поршневых колец, м.

Время полной приработки деталей:

$$t = \frac{0,784}{\lg K_1} \cdot \lg \left[\left(\frac{R_a^z}{R_a^k} \right)^{2,55} \cdot \frac{v_z^z}{v_z^k} \cdot \frac{A_a^k}{A_a^z} \left(\frac{HB_{\kappa}}{HB_z} \right)^{1,417} \right], \quad (2.10)$$

где v_z^z, v_z^k - эксплуатационные скорости изнашивания гильз цилиндров и поршневых колец, м/ч; A_a^z, A_a^k - площади трения гильз цилиндров и поршневых колец, м²; HB_z, HB_{κ} - твердость по Бринеллю материала гильз цилиндров и поршневых колец, Па.

При этом:

$$A_a^k = \pi \cdot m \cdot b \cdot D, \quad A_a^z = \pi \cdot D \cdot S, \quad (2.11)$$

где m - число компрессионных колец в цилиндре; b - высота кольца, м; D - диаметр гильзы, м; S - ход поршня, м.

Выражение (2.10) связывает скорости линейного изнашивания неравномерных поверхностей с их шероховатостью, механическими свойствами материалов и размерами номинальных площадей контакта. Из этого выражения видно, что при одинаковой шероховатости равных по твердости поверхностей скорости линейного изнашивания обратно пропорциональны номинальным площадям трения, то есть линейный износ цилиндра во много раз меньше, чем поршневых колец. Именно поэтому шероховатость цилиндра во время приработки изменяется медленнее по сравнению с шероховатостью колец и при установившемся изнашивании равновесная шероховатость цилиндра всегда остается более грубой.

Среднюю скорость изнашивания гильз цилиндров и поршневых колец в период приработки определяем по среднеарифметическому значению скорости изнашивания за время стендовой ($v_{п}$) и эксплуатационной обкатки ($v_{(40)}$):

$$v_{ос} = \frac{v_{пз} + v_{(40)z}}{2}, \quad v_{ок} = \frac{v_{пк} + v_{(40)к}}{2}. \quad (2.12)$$

После определения продолжительности обкатки находим число ступеней повышения нагрузки:

$$Z = \frac{-q \cdot t_0}{\lg(10^{13} \cdot R_a^z \cdot R_a^k + 5,82)} \quad (2.13)$$

Продолжительность обкатки под нагрузкой на каждой ступени определяем:

$$t_{oi} = 60K_2 \cdot q^{-1} \cdot \left[1 - 0,3 \cdot \left(\frac{Z + 1 - 2i}{Z - 1} \right) \right], \quad (2.14)$$

где K_2 – коэффициент, зависящий от времени обкатки с использованием различных масел.

Частоту вращения на каждой ступени обкатки (полученные значения округляем до сотен оборотов) определяем:

$$n_i = 0,35n_n \cdot \left(1 + \frac{i + 1}{Z} \right), \quad (2.15)$$

где n_n – номинальная частота вращения коленчатого вала двигателя, мин^{-1} .

Суммарный приработочный износ поршневых колец и гильз цилиндров за время обкатки t_0 определяем по формуле:

$$\sum I_0 = 0,434q^{-1} \cdot СПВ_2 (10^{qt_0} - 1) + (v_{эз} + v_{эк}) \cdot t_0 \quad (2.16)$$

Здесь сумму эксплуатационных скоростей изнашивания ($v_{эз} + v_{эк}$) можно заменить на выражение $K_3 \cdot (\bar{v}_{оз} + \bar{v}_{ок})$. Тогда формула (2.16) примет вид:

$$\sum I_0 = 0,434q^{-1} \cdot СПВ_2 (10^{qt_0} - 1) + K_3 (\bar{v}_{эз} + \bar{v}_{эк}), \quad (2.17)$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от размеров, механических свойств поверхностей трения, их микрорельефа; Π – нагрузочный фактор, зависящий от среднециклового давления в цилиндре, частоты вращения коленчатого вала, исходной шероховатости и фрикционной выносливости материала детали; ($B_2 = K_{Ra} \cdot K_{пр}$) – коэффициент, учитывающий изменение средней скорости изнашивания деталей после обкатки по сравнению с эксплуатацией; K_{Ra} – коэффициент зависящий от исходных микро и макро геометрии рабочих поверхностей; $K_{пр}$ – коэффициент зависящий от концентрации присадки.

Выводы

1 На основе теоретических исследований описаны явления и процессы фрикционного взаимодействия пар трения с учетом формирования пленок переноса, их влияния на коэффициент трения, процесс изнашивания.

2 С точки зрения химмотологии процесс изнашивания деталей двигателя при обкатке характеризуется следующими видами фрикционного взаимодействия: упругое деформирование, пластическое отеснение материала, микрорезание, адгезионное разрушение и когезионный отрыв. Рассмотрено влияние различных типов присадок на коэффициент трения. Обосновано основное назначение приработочных масел с присадками, заключающееся в создании между трущимися поверхностями пленки переноса, способной уменьшить фрикционное взаимодействие твердых тел и характеризующейся малым сопротивлением сдвигу.

3 Химмотологический анализ составов приработочных присадок различного типа и процессов протекающих на поверхности деталей двигателя при обкатке показал, что для повышения качества и ускорения приработки нужна комплексная присадка, которая включала бы в себя поверхностно-активные и химически активные вещества.

4 Предложено устройство для подачи, приработочной присадки к воздуху, в камеру сгорания двигателя. Отличительной особенностью данного устройства является то, что выпускной коллектор двигателя через обводной канал и кран соединен с емкостью, в которой находится присадка. Применение спирали с фасонной поверхностью, позволяет обеспечить тщательное и полное, а значит более качественное распыливание воздушно-присадочной смеси по сравнению с гладкой поверхностью конуса, для повышения качества и ускорения приработки деталей цилиндропоршневой группы двигателя, чтобы тем самым увеличить моторесурс двигателя.

3 МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И СТРУКТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА

Экспериментальные исследования, направленные на решение проблемы оптимизации процессов приработки отремонтированных двигателей УМЗ проходили в несколько этапов.

На первом этапе изучали: условия работы и надежность двигателей; факторы, влияющие на качество приработки; анализировали современные методы повышения качества приработки; определяли целесообразность применения комплексных мероприятий, направленных на формирование оптимальных поверхностей трения деталей двигателей в процессе приработки. В результате были определены задачи исследования и намечены пути их решения (рис. 3.1).

На втором этапе, после обобщения полученной информации, был теоретически обоснован подход к выбору средств, снижающих интенсивность изнашивания и повышающих долговечность трущихся деталей двигателей.

Для выполнения поставленной проблемы определили комплекс экспериментальных исследований в который входили:

- лабораторные испытания, моделирующие условия работы трущихся соединений;
- исследования физико-механических характеристик рабочих поверхностей образцов и образовавшихся пленок переноса;
- изучение физико-химических процессов происходящих в зонах трения основных соединений и пленок переноса на их поверхностях;
- стендовые испытания отремонтированных двигателей;
- исследования экспериментальных двигателей в условиях реальной эксплуатации.

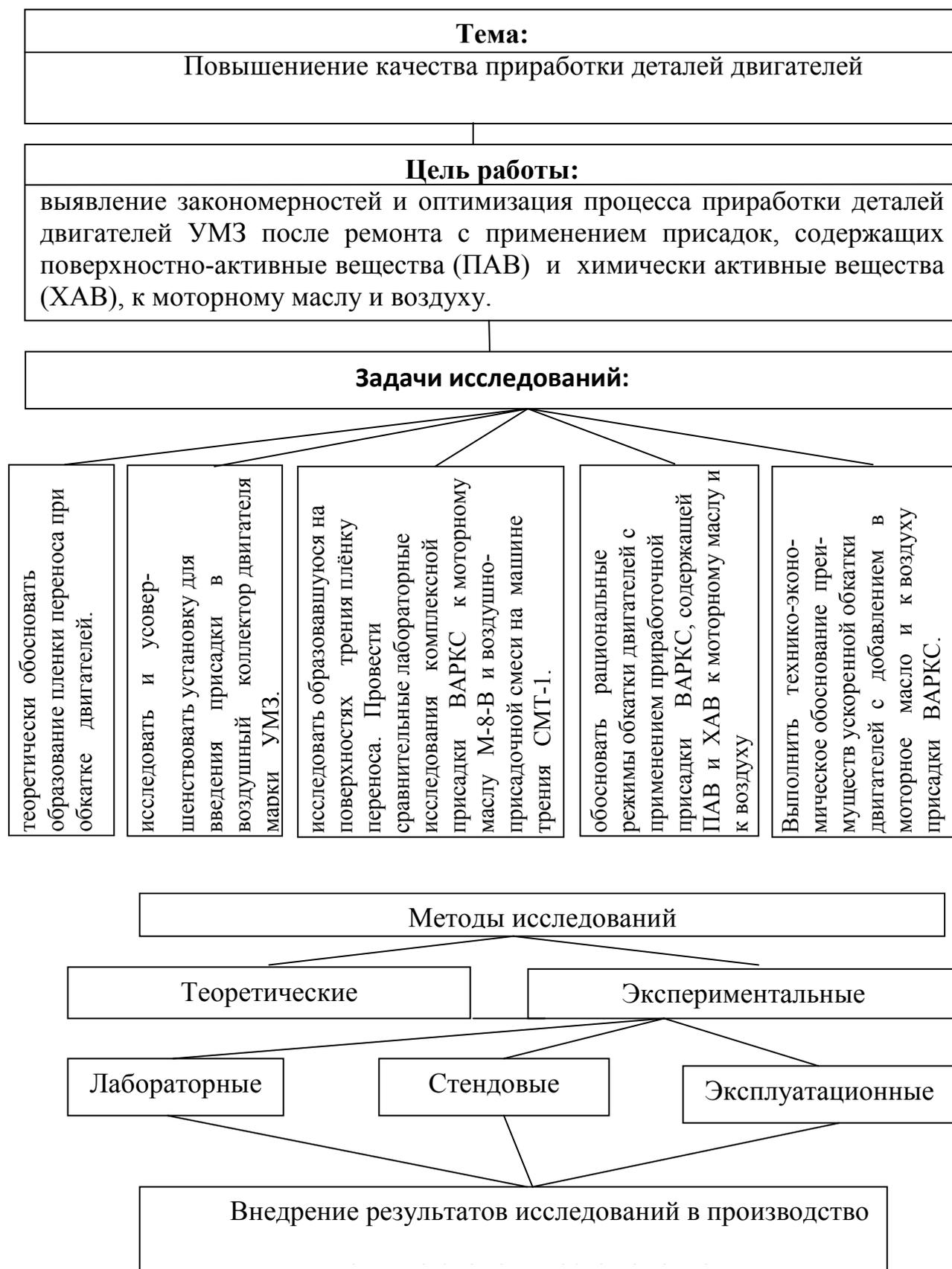


Рисунок 3.1 - Структурная схема диссертационной работы

3.1 Программа и общая методика исследований

Программа экспериментальных исследований включает в себя следующие этапы:

1) Проведение испытаний на машине трения 2070 СМТ-1 по схеме «ролик-колодка». Образцы изготавливаются из легированного чугуна одной плавки, выполненной на АО «Ульяновский Автозавод» со следующим химическим составом (приложение - А). Рабочая поверхность образцов обрабатывается до $R_a=0,32$ мкм. Твердость составляет НВ=240. Проводим сравнительные испытания образцов приработанных на масле М-8В с добавлением присадки ВАРКС в количестве 3 % по массе (принятой как оптимальной) [45, 91], со следующим химическим составом:

- 1 Олеиновая кислота ($C_{17}H_{33}COOH$) – 2,4 %
- 2 Тетраборат этилендиаммония [$C_2H_4(NH_3)_2$] $H_4B_4O_9$ – 0,1 %
- 3 Октадецилсульфанат натрия $C_{18}H_{37}SO_3Na$ – 0,5 %
- 4 Минеральное масло – до 100 %.

Контролируем следующие параметры: температуры поверхности образцов и масла; момент силы трения; шероховатость рабочих поверхностей; износ образцов.

2) Проведение испытаний на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543. Исследуем влияние нагрузки и скоростного режима на детали двигателей УМЗ-417 при приработке на масле М-8В с добавлением присадки к маслу и воздуху. Присадку к воздуху подаем в воздушный коллектор двигателя, посредством специального устройства (рис. 2.3). Контролируем параметры оптимизации приработки: износ деталей ЦПГ; шероховатость приработочных поверхностей; время, за которое происходит оптимальная приработка.

3) На заключительном этапе проводим проверку разработанных рекомендаций по ускоренной обкатке двигателей УМЗ в условиях Ульяновского авторемонтного завода № 2 и Федерального государственного унитарного предприятия учхоза Ульяновской ГСХА.

3.2 Методика выбора и обоснования объекта исследований

При выборе и обосновании объекта исследований, учитываем следующие основные факторы:

- малочисленные и разрозненные исследования по интенсификации процесса приработки карбюраторных двигателей с удельной литровой мощностью 26...27 кВт/л;
- наличие в области завода по производству двигателей марки УМЗ;
- значительное использование двигателей марки УМЗ, как в сельскохозяйственном производстве, так и в промышленной отрасли;
- наличие в Ульяновской области ремонтных предприятий (АРЗ № 1, АРЗ № 2, АО «Виразж») со значительными программами ремонта;
- на ремонтных предприятиях имеются специализированные посты для послеремонтной обкатки автомобильных двигателей и квалифицированные исполнители;
- незначительная удаленность хозяйств и других потребителей двигателей после ремонта от ремонтных предприятий;
- наличие необходимых форм отчетной документации по ремонту, используемых в хозяйствах и на ремонтных предприятиях.

3.3 Методика определения количества объектов исследований

Необходимое число объектов наблюдений зависит от следующих факторов: законов распределения параметров; предполагаемой величины рассеивания результатов испытаний, характеризуемой коэффициентом вариации (V), точности оценок, характеризуемой доверительной вероятностью оценки (β), средней относительной погрешностью эксперимента.

Порядок определения объема выборки наблюдаемых объектов следующий:

- 1) задается средняя ориентировочная величина изучаемого показателя (X);
- 2) устанавливается среднее квадратичное отклонение (σ);
- 3) проводится оценка коэффициента вариации $v=\sigma/x$;
- 4) устанавливается закон распределения изучаемых показателей;
- 5) определяется необходимая относительная погрешность эксперимента $\delta=\Delta X/X$.

Определяются границы возможных значений параметра (X) из условий

$$X_n (1-\delta) \leq X \leq X_n (1+\delta) , \quad (3.1)$$

где X_n – среднее выборки, состоящей из изделий; X – среднее генеральной совокупности;

б) Выбор величины доверительной вероятности (β), характеризующей достоверность относительной точности эксперимента.

При проведении испытаний, как правило, характеристики распределений параметров (m_x ; δ_x) неизвестны, и коэффициент вариации выбирается исходя из априорных сведений.

При нормальном законе распределения число (N) объектов исследований определяется по формуле:

$$\sigma / V = t_{\beta} , \quad (N - 1) / \sqrt{N} . \quad (3.2)$$

При законе Вейбулла

$$(\sigma + 1)^B = 2N / \chi^2_{1-\beta} , \quad 2N , \quad (3.3)$$

где B – параметр распределения Вейбулла.

3.4 Методика планирования проведения экспериментов

Для проведения исследований требуется выполнить математическое планирование эксперимента, заключающееся в установлении оптимального плана их проведения. При научном планировании достигается резкое сокращение числа испытаний, за счет использования известных или

предполагаемых зависимостей, возможности планировать эксперимент с учетом уже полученных результатов и, главное, за счет целенаправленного одновременного варьирования изучаемых факторов [109, 110, 112].

Определение влияния режимов обкатки, с применением присадки в моторное масло, на ускорение приработки деталей двигателя проводится при многофакторном планировании эксперимента, которое в основном сводится к выбору числа факторов и определению значения каждого фактора в опыте [111].

При выборе факторов учитываются следующие требования:

- 1) управляемость – возможность установления и поддержания фактора на выбранных уровнях;
- 2) независимость – возможность устанавливать фактор на выбранном уровне вне зависимости от уровней других факторов;
- 3) совместимость – все комбинации факторов осуществимы и безотказны.

Основными факторами, влияющими на качество приработки, являются [111]: нагрузка (Н), частота вращения образца (мин^{-1}), температура (К).

Для осуществления эксперимента предварительно нужно определить граничные условия вышеуказанных влияющих факторов, локализирующие область его проведения.

Минимальное значение нагрузки ограничено необходимым прилеганием контактирующих поверхностей исследуемых образцов. Максимальная величина ограничена величиной допускаемых пластических деформаций их поверхностей.

Верхний и нижний пределы частоты вращения образцов ограничены теплообразованием в их поверхностном слое. При малой частоте вращения образца будет наблюдаться недогрев поверхностного слоя материала в зоне контакта, а при высокой, происходит десорбция смазки и размягчение металла. Значения частоты вращения примем исходя из литературных данных [55].

Шероховатость исходной поверхности принимаем исходя из режимов чистовой обработки. Шероховатость поверхности после механической обработки изучалась согласно ГОСТ 2789-79 с помощью прибора МИС-11, УИМ-21.

Проведение многофакторного эксперимента с математической обработкой результатов включает в себя: выбор параметра оптимизации, выбор факторов, определение математической модели процесса, составление матрицы эксперимента, определение уравнений регрессии, обработку результатов эксперимента, проверку адекватности модели, оценку значимости коэффициентов, обсуждение результатов эксперимента [112].

В качестве параметра оптимизации выбираем момент трения M_T , Н·м – (Z) как основной показатель приработки.

На основании существующей информации путем до опытного ранжирования из большого числа факторов выделены два наиболее существенных, оказывающих влияние на приработку: частота вращения вала n , мин⁻¹ – (X_1); нагрузка P , Н – (X_2).

Для решения поставленной задачи назначены интервалы и уровни варьирования факторов. Уровни одного фактора, сочетаясь с уровнями другого, образуют тем самым вариант испытаний. Взаимодействие факторов определяли как новый фактор, который уточняет отклик.

Уравнение регрессии для 2-х факторного эксперимента с учетом взаимодействия факторов имеет вид:

$$Z = b_0 + b_1 \cdot X_1 + b_2 \cdot X_2 + b_{1,1} \cdot X_1^2 + b_{1,2} \cdot X_1 \cdot X_2 + b_{2,2} \cdot X_2^2 . \quad (3.4)$$

Речь, таким образом, идет об определении оптимальных значений шести параметров (b_0 ; b_1 ; b_2 ; $b_{1,1}$; $b_{1,2}$; $b_{2,2}$), из условия минимума расхождения значений Z (X_{1j} , X_{2j}) с экспериментальными данными ($Z_{i,j}$). В качестве критерия выбираем сумму квадратов отклонений.

$$S = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^7 [Z_{(X_{1i}, X_{2i})} - Z_{i,j}]^2 . \quad (3.5)$$

Функционал S зависит от параметров $b_0; b_1; b_2; b_{1,1}; b_{1,2}; b_{2,2}$

$$S = S(b_0; b_1; b_2; b_{1,1}; b_{1,2}; b_{2,2}), \quad (3.6)$$

причем квадратичным образом. Необходимым условием минимума функционала (S) является равенство нулю его частных производных по указанным параметрам [112]. Вычисляя частные производные: $dS/db; dS/db_1; dS/db_2; dS/db_{1,1}; dS/db_{1,2}; dS/db_{2,2}$ и приравнивая их к нулю, получаем систему шести линейных уравнений, которая имеет вид:

$$F^T \cdot F \cdot X = F^T \cdot Y, \quad (3.7)$$

где X – вектор-столбец определяемых параметров ($X_1 = b_0; X_2 = b_1; X_3 = b_2; X_4 = b_{1,1}; X_5 = b_{1,2}; X_6 = b_{2,2}$); Y – вектор – столбец экспериментальных значений ($Z_{i,j}$), расположенных в следующем порядке: $Z_{1,1}; Z_{1,2} \dots Z_{1,7} \dots Z_{3,1}; Z_{3,2} \dots Z_{3,7}$ (порядок столбца (Y) равен $3 \cdot 7$); F – матрица эксперимента шестого порядка ($3 \cdot 7$).

Таблица 3.1 – Матрица эксперимента

№ опыта	1	X_1	X_2	X_1^2	$X_1 X_2$	X_2^2
1	1	n_1	P_1	n_1^2	$n_1 \cdot P_1$	P_1^2
2	1	n_1	P_2	n_1^2	$n_1 \cdot P_2$	P_2^2
3	1	n_1	P_3	n_1^2	$n_1 \cdot P_3$	P_3^2
4	1	n_1	P_4	n_1^2	$n_1 \cdot P_4$	P_4^2
5	1	n_1	P_5	n_1^2	$n_1 \cdot P_5$	P_5^2
6	1	n_1	P_6	n_1^2	$n_1 \cdot P_6$	P_6^2
7	1	n_1	P_7	n_1^2	$n_1 \cdot P_7$	P_7^2
8	1	n_2	P_1	n_2^2	$n_2 \cdot P_1$	P_1^2
9	1	n_2	P_2	n_2^2	$n_2 \cdot P_2$	P_2^2
10	1	n_2	P_3	n_2^2	$n_2 \cdot P_3$	P_3^2
11	1	n_2	P_4	n_2^2	$n_2 \cdot P_4$	P_4^2
12	1	n_2	P_5	n_2^2	$n_2 \cdot P_5$	P_5^2
13	1	n_2	P_6	n_2^2	$n_2 \cdot P_6$	P_6^2
14	1	n_2	P_7	n_2^2	$n_2 \cdot P_7$	P_7^2
15	1	n_3	P_1	n_3^2	$n_3 \cdot P_1$	P_1^2
16	1	n_3	P_2	n_3^2	$n_3 \cdot P_2$	P_2^2
17	1	n_3	P_3	n_3^2	$n_3 \cdot P_3$	P_3^2
18	1	n_3	P_4	n_3^2	$n_3 \cdot P_4$	P_4^2
19	1	n_3	P_5	n_3^2	$n_3 \cdot P_5$	P_5^2
20	1	n_3	P_6	n_3^2	$n_3 \cdot P_6$	P_6^2
21	1	n_3	P_7	n_3^2	$n_3 \cdot P_7$	P_7^2

Матрица системы (3.7) шестого порядка $A = F^T \cdot F$ симметрична и положительно определена $(AX, X) = (F^T \cdot FX, X) = (FX, FX) > 0$ ($X \neq 0$)

поскольку $\text{rang}(F) = 6$. Поэтому для решения системы может быть применен метод квадратичного корня.

Изложим кратко суть этого метода. Если матрица системы

$$A\theta = b, \quad (3.8)$$

симметрична и положительно определена, то существует единственная треугольная матрица.

$$S = \begin{pmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,k} \\ 0 & S_{2,1} & \dots & S_{2,k} \\ 0 & 0 & \dots & S_{3,k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & S_{k,k} \end{pmatrix}, \quad (3.9)$$

такая, что $A = S^T \cdot S$. Подставляя это выражение в (3.8) получим систему:

$$S^T \cdot S\theta = b, \quad (3.10)$$

решение которой может быть произведено в два этапа.

Сначала решаем систему:

$$S^T \cdot t = b, \quad (3.11)$$

затем систему:

$$S\theta = t. \quad (3.12)$$

Поскольку матрицы систем (3.11) – (S^T) и (3.12) – (S) – треугольные, то решение их выписываются в явном виде с помощью рекуррентных формул:

$$\left. \begin{aligned} t_1 &= b_1 / S_{1,1} \\ t_2 &= (b_2 - S_{1,2} \cdot t_1) / S_{2,2} \\ \dots & \dots \dots \\ t_k &= (b_k - \sum_{i=1}^{k-1} S_{i,k} \cdot t_i) / S_{k,k} \end{aligned} \right\}, \quad (3.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \theta_k &= t_k / S_{k,k} \\ \theta_{k-1} &= (t_{k-1} - S_{k-1,k} \cdot t_k) / S_{k-1,k-1} \\ \dots & \dots \dots \\ \theta_1 &= (t_1 - \sum_{i=2}^k S_{1,i} \cdot t_i) / S_{1,1} \end{aligned} \right\}. \quad (3.14)$$

В свою очередь коэффициенты матрицы (S) могут быть найдены по рекуррентным формулам:

$$\left. \begin{aligned} S_{1,1} &= \sqrt{b_{1,1}} ; & S_{1,j} &= b_{1,j} / S_{1,1} ; & j &= 2,3, \dots K \\ S_{i,i} &= \sqrt{b_{i,i} - \sum_{r=1}^{i-1} S_{r,i}^2} ; & S_{i,j} &= (b_{i,j} - \sum_{r=1}^{i-1} S_{r,i} \cdot S_{r,j}) / S_{i,i} \end{aligned} \right\} . \quad (3.15)$$

Таким образом, формулы (3.13) ... (3.15) дают полное решение системы (3.8).

Определение параметров производили по следующему алгоритму:

- 1) задаем исходные экспериментальные данные;
- 2) составляем матрицу эксперимента;
- 3) вычисляем матрицу системы $A = F^T \cdot F$ и столбец свободных членов $b = F^T \cdot Y$ по формулам:

$$\left. \begin{aligned} A_{i,j} &= \sum_{r=1}^{m-n} F_{r,i} \cdot F_{r,j} \\ b_i &= \sum_{r=1}^{m-n} F_{r,i} \cdot Y_r \end{aligned} \right\} ; \quad (3.16)$$

- 4) вычисляем матрицу (S) по формулам (3.15);
- 5) вычисляем столбец (t) по формулам (3.13);
- 6) вычисляем столбец параметров (θ) по формулам (3.14);
- 7) восстанавливаем исходные параметры.

Описанный алгоритм реализован на языке BASIC и полученная программа, просчитана на IBM совместимой ЭВМ. Интерпретатор MS-DOS Qbasic (Приложение - Б). Программа производит формирование матрицы системы, подсчет теоретических значений (Z), суммы квадратов отклонений и печать результатов.

Проверку адекватности модели согласно [112] производим по критерию Фишера по формулам:

$$S_{ag}^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\bar{Z}_i - Z_i)^2}{f} , \quad (3.17)$$

где f – число степеней свободы

$$f = N - K, \quad (3.18)$$

где N – число опытов; K – число коэффициентов.

$$F = S_{ад}^2 / S^2(\bar{z}), \quad (3.19)$$

где F – критерий Фишера; $S^2(\bar{z})$ - дисперсия воспроизводимости.

$$S^2(\bar{z}) = \frac{\sum_{i=1}^N (z_{i,j} - \bar{z}_i)^2}{N}. \quad (3.20)$$

Условием адекватности модели является $F_{экс} < F_{табл}$.

Проверку значимости коэффициентов регрессии производим по критерию Стьюдента по формулам:

$$S^2(b_i) = S^2(\bar{z}) / N, \quad (3.21)$$

где $S^2(b_i)$ – дисперсия коэффициента регрессии;

$$\Delta b_j = \pm t \cdot S(b_j), \quad (3.22)$$

где Δb_j – доверительный интервал; t – табличное значение критерия Стьюдента; $S(b_j)$ – квадратичная ошибка коэффициента регрессии.

Коэффициент значим при условии $b_j > |\Delta b_j|$.

3.5 Методика экспериментальных исследований

Для получения достоверных результатов исследований используем комплексный подход оценки качества приработки деталей двигателя, включающий в себя: лабораторные ; стендовые и эксплуатационные испытания.

3.5.1 Выбор характеристик оценки качества приработки деталей двигателей

Долговечность двигателя зависит от состояния основных пар трения: «гильза-кольцо», «коленчатый вал - вкладыш». Приработка деталей этих соединений происходит в режиме граничной смазки.

В литературе [113] разработана структурно-функциональная схема взаимосвязи процессов, происходящих в период приработки деталей двигателя. При этом оценку приработки производят по трибологическим характеристикам, которые в свою очередь, обеспечивают технические параметры всего двигателя.

К основным трибологическим характеристикам относят:

1) **Величина момента механических потерь на трение в период его стабилизации.** При стабилизации момента силы трения устанавливается постоянная температура трущихся деталей и смазочного состава. Чем меньше эти показатели, тем качественнее осуществляется приработка [15].

2) **Износ деталей.** В период приработки происходит относительно быстрая потеря массы, изменение размеров детали. Поэтому допускается определять износ деталей при приработке микрометром или их взвешиванием. Окончание приработки характеризуется стабильной скоростью изнашивания и постоянными условиями трения.

3) **Шероховатость рабочих поверхностей деталей.** В процессе приработки шероховатость уменьшается на 1...3 класса и в дальнейшем стабилизируется. Метод профилографирования, используемый для измерения шероховатости, должен сочетаться с визуальным осмотром, которым можно определить наличие надиров, заусенцев, рисок, забоин и т.д..

4) **Температура поверхности трения и смазочных материалов.** В процессе

приработки температура поверхностей трущихся деталей – повышается. По окончании приработки температура стабилизируется и остаётся постоянной при неизменных режимах испытаний. Стабилизация температуры показывает, что в поверхностных слоях трущихся деталей завершены физико-химические изменения и произошло образование пленки переноса, которая уменьшает коэффициент трения. Поэтому температура в зоне трения является одним из основных показателей процесса приработки.

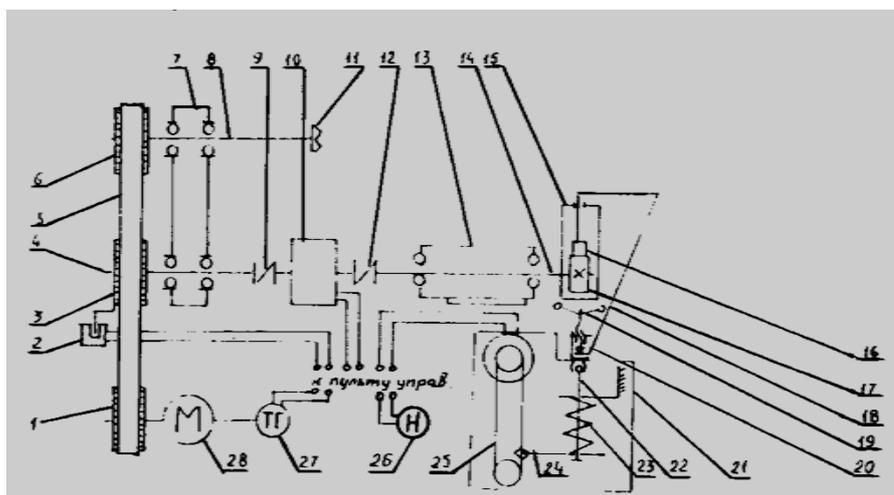
3.5.2 Методика проведения лабораторных испытаний

Лабораторные исследования проводили на машине трения 2070 СМТ-1 (рис. 3.2, 3.3) по стандартной методике [55].



Рисунок 3.2 - Общий вид машины трения 2070 СМТ-1

Трибологические исследования проводили по схеме «ролик-колодка». При испытании колодка удерживалась при помощи шарика, что позволяло ей самоустанавливаться относительно ролика (рис. 3.4, 3.5). Такое крепление обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов при повторных опытах.



1, 6 – шкив сменный; 2 – датчик числа циклов; 3 – шкив; 4 – вал; 5 – ремень зубчатый; 7 – корпус; 8 – вал; 9, 12 – муфта; 10 – датчик момента; 11 – муфта кулачковая; 13 – шпиндель сменный; 14 – вал бабки; 15 – камера испытательная; 16 – колодка; 17 – ролик; 18 – кронштейн; 19 – ось-винт; 20 – пята; 21 – механизм нагружения; 22 – тяга; 23 – пружина; 24 – планка; 25 – нить; 26 – датчик нагрузки; 27 – датчик скорости; 28 – электродвигатель.

Рисунок 3.3 - Схема машины трения 2070 СМТ-1 для трибологических испытаний



Рисунок 3.4 – Общий вид колодки и ролика

Наружный диаметр ролика $d_p=50$ мм, $b=12$ мм. Колодки изготавливали из кольца с наружным диаметром $d_k=70$ мм, внутренний диаметр шлифовали под размер ролика. Длина рабочей поверхности колодки по окружности $19,5 \pm 1$ мм. Каждую пару образцов испытывали один раз, повторность опытов трехкратная.

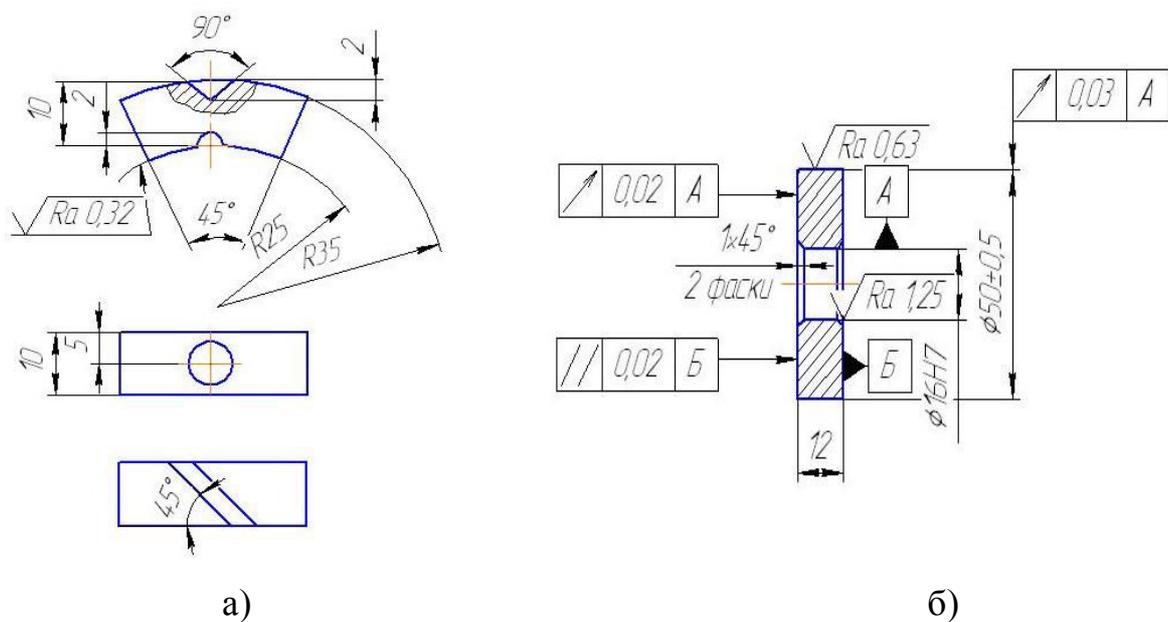


Рисунок 3.5 - Чертежи колодки (а) и ролик (б)

Для воспроизводства работы пары трения «гильза-поршневое кольцо» колодки и ролики изготавливали из легированного чугуна одной плавки (химический состав смотри приложение - А), произведенной в АО «Ульяновский Автозавод». Чугунные образцы имели твердость НВ= 240 ед. по Бринеллю, что соответствует твердости зеркала гильз цилиндров. Шероховатость рабочей поверхности Ra ролика и колодки соответственно была 0,63 и 0,32 мкм, это соответствует техническим требованиям на капитальный ремонт двигателей УМЗ.

Приработочные масла с присадкой ВАРКС в количестве 250 см³ заливали в испытательную камеру (рис. 3.6), которые вращающимся роликом доставлялись в зону трения.

Частота вращения ролика за весь период испытаний была равна $n=500$ мин⁻¹.

Нагрузка на образцы, которая обеспечивается нагрузочным устройством (рис. 3.3), соответствовала действующей в реальных парах трения.

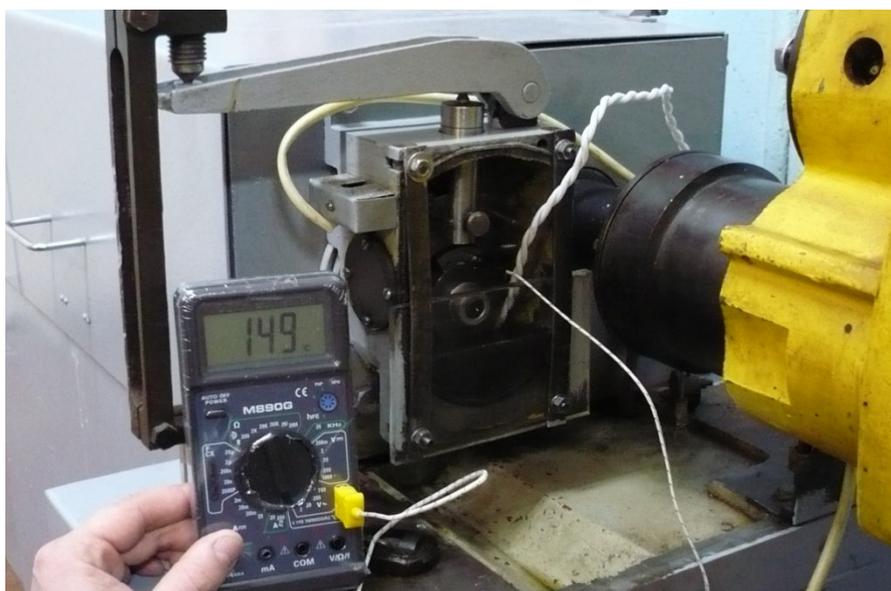


Рисунок 3.6 - Испытательная камера машины трения 2070 СМТ-1

Перед экспериментами проводили тарировку машины трения СМТ-1 по нагрузке и моменту трения в статическом режиме, согласно инструкции по эксплуатации [114].

Тарировочные графики представлены на рисунках 3.7 и 3.8

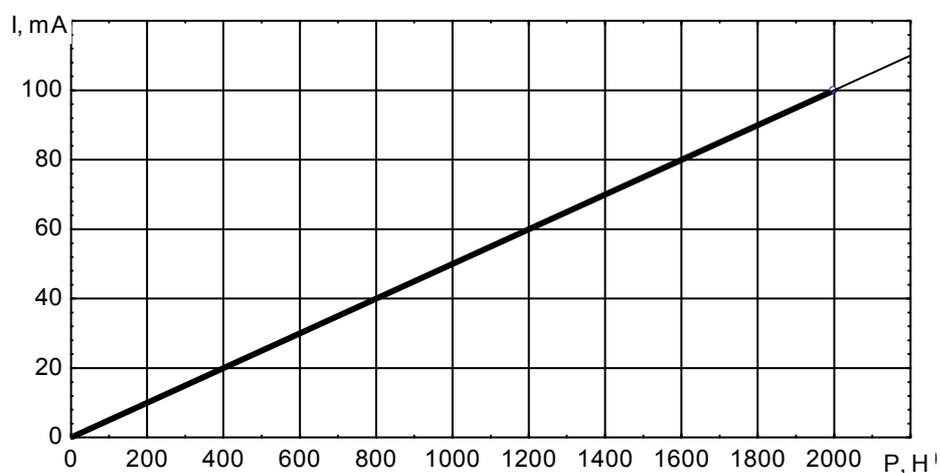


Рисунок 3.7 - Тарировочный график механизма нагружения машины трения СМТ-1

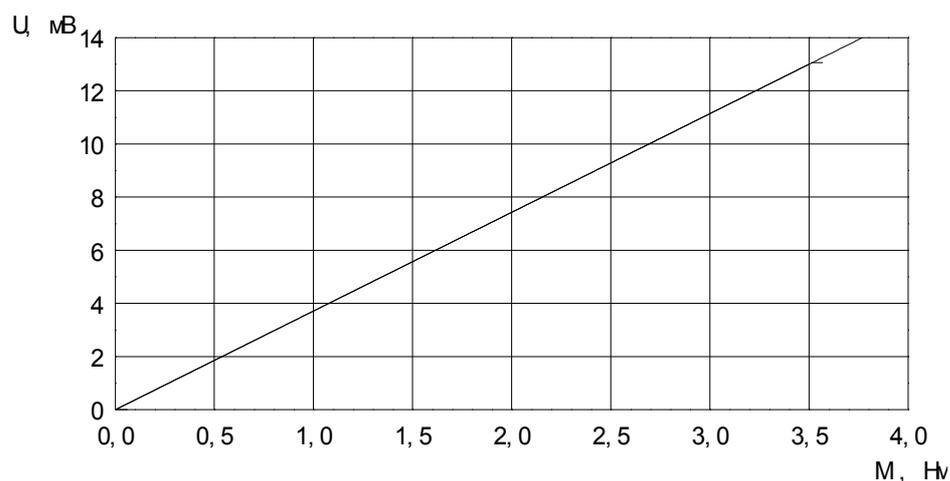


Рисунок 3.8 - Тарировочный график индуктивного датчика момента силы трения

3.5.2.1 Методика определения момента силы трения и периода его стабилизации

Трибологические испытания приработочных составов по схеме «ролик-колодка» проводили на следующих режимах:

- частота вращения ролика – 500 мин^{-1} ;
- нагрузка в зоне трения – 600 Н;
- время испытания – 15 мин.

Момент силы трения определяли на установке СМТ-1 с помощью индуктивного датчика, сигналы которого регистрировали, предварительно протарированным, потенциометром КСП-4 с точностью 0,1 мВ. Показания момента силы трения и температур поверхности трения, и приработочного масла контролировали через каждую минуту, и заносили в сводную таблицу. (Приложение - В).

Для сравнительного испытания брали:

- чистое базовое масло М-8В нагретое до 333 К;
- масло М-8В с присадкой ВАРКС в количестве 3 % по массе нагретое до 333 К;
- масло М-8В с присадкой ВАРКС (3 %) с температурой 293 К;

- масло М-8В с присадкой ВАРКС (3 %) с температурой 293 К в течение 5 мин и 333 К в течение 10 мин;

- бензин А-76 с присадкой ВАРКС (3 %) с температурой 293 К.

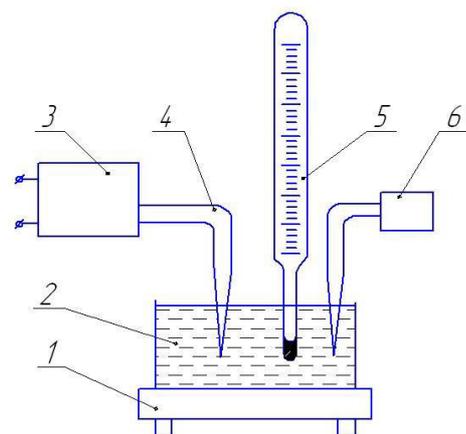
В течение приработки образцов происходило изменение момента силы трения. За время приработки образцов, принимаем среднее значение времени стабилизации момента силы трения, по трем опытам.

3.5.2.2 Методика определения температуры поверхностей трения и смазочного материала

Температуру масла в испытательной камере контролировали с помощью термопары «хромель-копель» с предельной погрешностью 0,87%. Термопару подключали к потенциометру КСП-4. Перед проведением испытаний проводили тарировку термопары (рис. 3.9).



а)



б)

а) общий вид; б) схема тарировки: 1--нагреватель; 2 – емкость с маслом; 3 – потенциометр КСП-4; 4 – термопара; 5 – термометр; 6 – мультиметр М 890С.

Рисунок 3.9 - Схема тарировки термопары «хромель-копель»

Для этого ёмкость с приработочным составом устанавливали на нагреватель 1, в него опускали две термопары, одну подсоединяли к потенциометру КСП-4, вторую к цифровому мультиметру М 890С. Температуру разогреваемого состава фиксировали термометром с пределами

измерения от 273 до 573 К и одновременно делали отметки на шкале потенциометра через каждые 10 К (рис. 3.10).

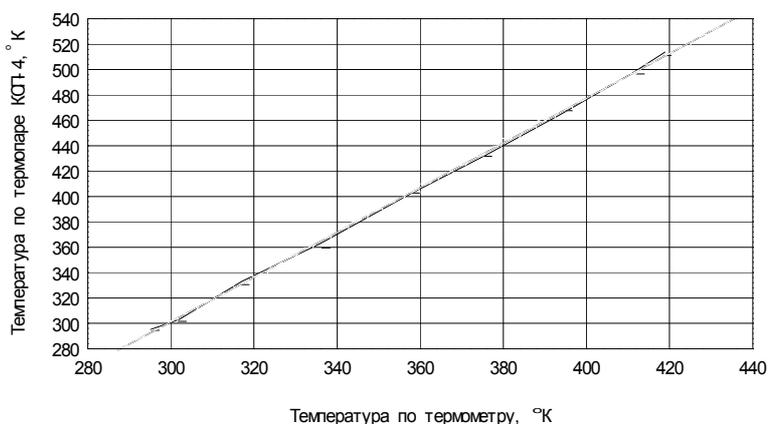


Рисунок 3.10 – Тарировочный график термопары потенциометра КСП-4

Температуру колодки, то есть в зоне трения трибосопряжения контролировалась с помощью встроенной, предварительно тарированной термопары (рис. 3.11) и цифрового мультиметра М 890С с погрешностью 0,75 %.

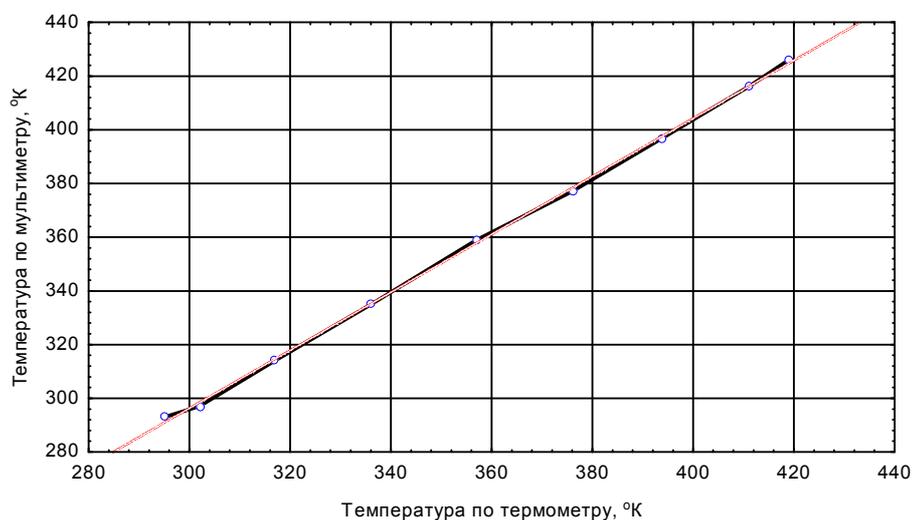


Рисунок 3.11 – Тарировочный график термопары мультиметра М 890С

Для этого в колодке высверливаем отверстие диаметром 2 мм на расстоянии 1 мм от рабочей поверхности, для крепления термопары. Температуру колодок и масла в испытательной камере контролировали при

следующих режимах $n = 500 \text{ мин}^{-1}$, $P = 780 \text{ Н}$, $t = 60 \text{ мин}$. Полученные данные приведены в Приложении Г.

3.5.2.3 Методика определения износа образцов

Перед испытанием образцов на износ проводим взвешивание колодок на весах WA-31 производства Польша «Zaktady Mechaniki Precyzyjnej» (см. рисунок 3.12) с точностью измерения $0,1 \times 10^{-3} \text{ г}$.



Рисунок 3.12 – Общий вид весов WA-31

После проведения испытаний колодки промываем в бензине, высушиваем в сушильном шкафу в течение 30 минут при 353 К и снова взвешиваем. После этого определяем средний износ по трём опытам.

3.5.2.4 Методика определения времени сопротивления схватыванию

Испытания проводим при частоте вращения ролика $n=500 \text{ мин}^{-1}$, а образцы нагружаем до $P=1274 \text{ Н}$ и контролируем изменение температуры. Начало схватывания определяем по резкому увеличению момента силы трения и повышению температуры в зоне трения. При достижении температуры прирабочного состава равной 373 К испытания прекращаем, и это время принимаем за время сопротивления схватыванию. Данные приведены в Приложении Д.

3.5.2.5 Методика определения шероховатости образцов

Для описания микрогеометрии поверхности в трибологических исследованиях, как правило, используют параметры шероховатости: R_{\max} – наибольшая высота профиля, R_z – средняя высота максимальных отклонений профиля от средней линии по 10-ти точкам (5 выступов и 5 впадин), R_a – среднее отклонение профиля от средней линии, и др. Профилографирование проводили на 5 участках каждого образца, как показано на рисунке 3.13.

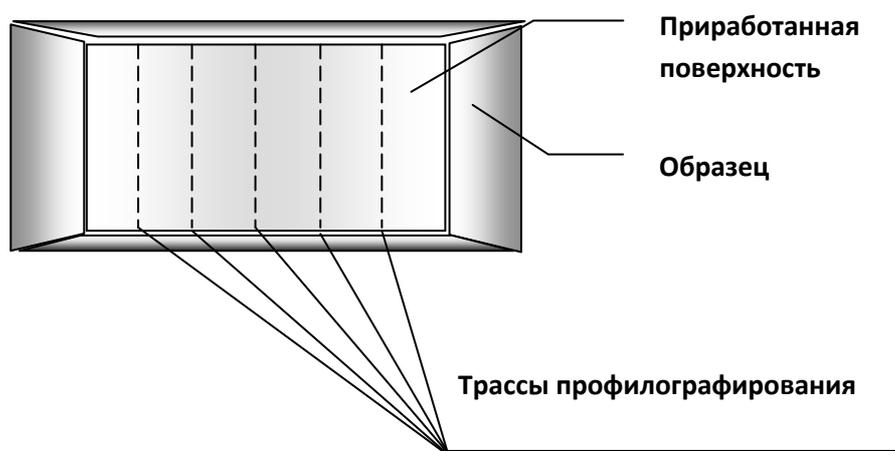


Рисунок 3.13 - Схема профилографирования образцов

Оценку шероховатости выполняли стандартным методом профилографирования (ГОСТ- 2789-73) при помощи профилограф-профилометра завода «Калибр» модель ВИ-201. Запись профилограмм проводили с увеличением по вертикали 4000 раз, по горизонтали 20 раз. Примеры полученных профилограмм приведены в Приложении Е.

3.5.2.6 Методика определения микротвердости образцов

Микротвердость $H\mu$, характеризующую величину наклепа поверхностных слоев при трении, оценивали стандартным методом Виккерса на приборе ПМТ - 3. Исследование изменения твердости по глубине приработанного слоя проводили на косом шлифе. Испытания проводили при нагрузке на индентор 100г, глубина изучаемого слоя составляла 160 - 200 мкм с шагом в 10 мкм.

Дополнительно была измерена микротвердость поверхностей трения, с нагрузкой на индентор 200 г (Приложение Е).

3.5.2.7 Методика оценки пластичности поверхностей трения

Оценку энергии активации разрушения поверхностного слоя выполняли методом микросклерометрии по методике, изложенной в Патенте РФ №2166745 [115]. В данной методике на поверхности испытуемого материала алмазным индентором оттесняют микроборозды (рис. 3.14), затем оценивают сопротивление пластической деформации и вытесненный объем материала и рассчитывают энергию активации разрушения как удельную энергию, кДж/моль, расходуемую на пластическое оттеснение 1 моля материала поверхностного слоя по формуле (3.23):

$$U_0 = \frac{14,286 \cdot V_M \cdot (P - 1) \cdot N \cdot f}{D_5^2 - D_1^2}, \quad (3.23)$$

где V_M - молярный объем, мм³/моль; P - число проходов, $P=5$; f - коэффициент трения; N - нагрузка на индентор, Н, D_5 и D_1 - ширина царапины при, соответственно, 5-ти и 1-о кратных проходах индентора.

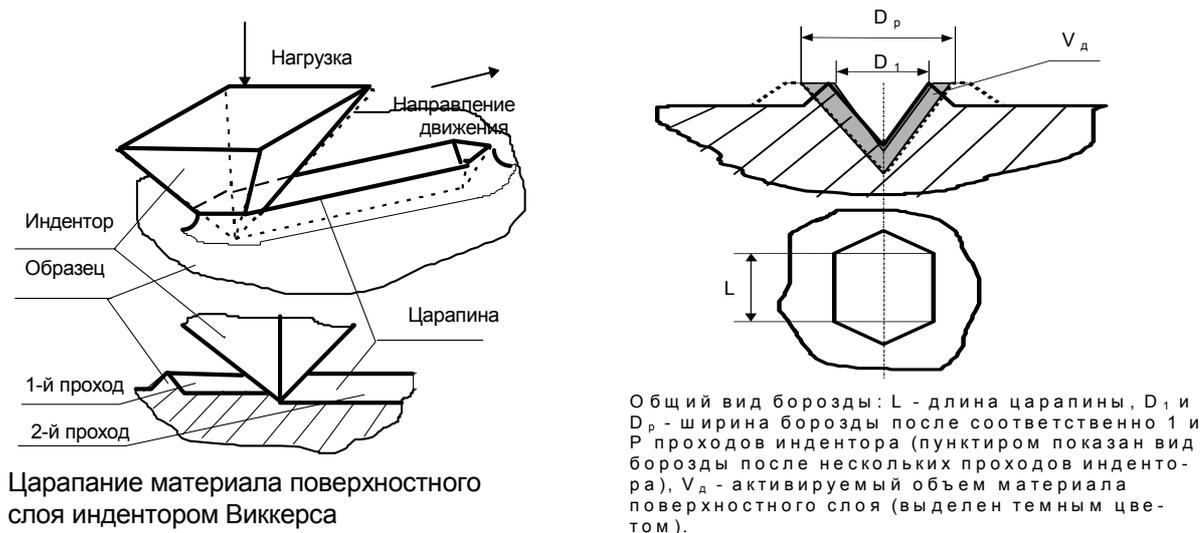


Рисунок 3.14 - Способ нанесения и геометрические параметры царапин

В кинетической теории прочности энергия активации пластической деформации имеет смысл потенциального барьера, который необходимо преодолеть, чтобы активировать физический механизм пластического оттеснения материала, основанный на генерировании и скольжении дислокаций.

Для изучения кинетики изменения энергии активации пластической деформации материалов был использован программно-аппаратный комплекс, включающий блок обработки информации и склерометрическую установку (рис. 3.15).

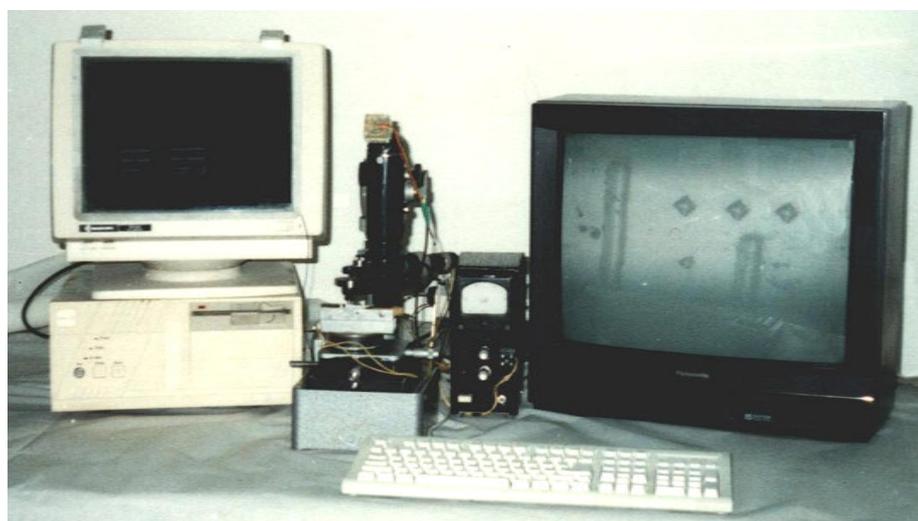


Рисунок 3.15 - Программно-аппаратный комплекс

Склерометрический способ оценки энергии активации пластической деформации характеризуется высокой чувствительностью и позволяет учитывать физико-химическую и структурную модификацию материалов под влиянием комбинированного действия среды, статических и динамических нагрузок, радиации, температур и др. факторов.

Удобство приведенной методики состоит в том, что она инвариантна к предыстории эксплуатации элемента и виду разрушающего воздействия.

Энергия активации является параметром многих кинетических моделей, например, для оценки долговечности, скорости деформации и

скорости изнашивания материалов и, как в нашем случае для оценки влияния смазочных материалов на прочность поверхностных слоев.

Для выяснения энергии активации исходного состояния материала измеряли ее значение на глубине 3 мм от поверхности у всех образцов при температуре ~ 293 К. Затем наносились соответствующие смазочные материалы на образцы №№ 11 и 13 масло М-8-В + присадка, а на образец № 12 масло М-8-В и снова производился замер значений энергии активации. Далее образцы нагревались со скоростью 0,5 К/мин и при достижении температуры последовательно 303, 313, 323...353 К выдерживались в течении 20 минут. В точках постоянной температуры измерялись значения энергии активации. Результаты наносились на график (приложение Е).

3.5.2.8 Методика определения элементного состава поверхности трения методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС)

Методами РЕМ и ВИМС исследовались образцы в виде колодок рисунок 3.5 а.

Из каждого образца было выпилено по два прямоугольных параллелепипеда (образец и эталон) с размерами примерно 10х3х3 мм.

При исследованиях методом РЭМ колодка в исходном состоянии загружалась в вакуумную камеру электронного микроскопа (РЭМ-101) рисунок 3.16.

Поверхность трения осматривалась при различных увеличениях и, в дальнейшем, характерные участки этой поверхности фотографировались. Методом ВИМС исследовался элементный состав одной из граней образца, которая являлась фрагментом поверхности трения, и элементный состав одной из граней эталона не являющейся поверхностью трения (Приложение Ж).



Рисунок 3.16 – Растровый электронный микроскоп РЭМ-101

Исследование элементного (изотопного) состава поверхности образца и эталона проводились на вторично-ионном масс-спектрометре – ионном зонде МС7202М (рис. 3.17). В качестве первичных ионов использовались ионы Ar^+ с энергией 10 кэВ. Ток пучка первичных ионов составлял 0,1 мкА, выбранный диаметр пучка – примерно 20 мкм. Качественный анализ состава поверхностных слоёв образцов и эталона проводился в нескольких областях размером 1,0x1,0 мм, на их поверхности ионный зонд разворачивался в растр. Записывались участки масс-спектра положительных ионов, содержащие масс-пики с отношением массы к заряду от 1 до 75 (регистрировались элементы и кластеры от ^1H до $^{58}\text{F}^{16}\text{O}^1\text{H}$). В дальнейшем на полученных масс-спектрах масс-пики различных элементов и их кластеров идентифицировались.



Рисунок 3.17 – Вторично-ионный масс спектрометр MS7202M

В отдельных областях на поверхности образцов производилась последовательная запись спектров, а также элементных (изотопных) изображений в течение определенного времени, что позволяло оценить изменение содержания различных элементов по толщине поверхностных слоев (до нескольких мкм). Для получения полуколичественной информации о содержании интересующих элементов в поверхностных слоях образца было проведено профилирование этих слоев по глубине. Ионный зонд разворачивался в растр размером 1x1 мм и в течение определенного времени записывались масс-спектры от одной из областей на поверхности образца. Полученные результаты сравнивались со спектрами, записанными аналогичной процедурой от нескольких областей на поверхности эталона (Приложение Ж).

3.5.3 Методика стендовых испытаний

Стендовые испытания проводили на капитально отремонтированных двигателях УМЗ-417 с одинаковыми ремонтными размерами на Ульяновском авторемонтном заводе № 2 (Приложение И).

Двигатели испытывались на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543 (рис. 3.18) с электрической балансировочной машиной АКБ-82 мощностью 55 кВт и синхронной частотой вращения 1400 мин^{-1} , предназначенном для обкатки двигателей данного типоразмера.



1 – стенд тормозной КИ-5543; 2 - система отвода отработавших газов; 3 – двигатель УМЗ-417

Рисунок 3.18 – Схема обкаточно-тормозного стенда КИ-5543

Стенд оборудован автономной системой подвода и поддержания заданного температурного режима охлаждающей жидкости и смазочного масла, что позволяло для каждого двигателя за весь период обкатки выдерживать одинаковый температурный режим воды и масла. Температуру воды в водяной рубашке поддерживали в пределах $353 \pm 5 \text{ К}$, а температуру масла в картере $363 \pm 5 \text{ К}$. После испытания масло сливали и повторно в экспериментах не использовали. Всего было обкатано 30 двигателей УМЗ-417.

Режимы обкатки двигателей приведены в таблицах приложений (К, Л, М).

Двигатели испытывали на следующих приработочных маслах:

- чистое масло М-8В (десять двигателей по типовой технологии);
- масло М-8В плюс 2 % присадки ОГМ (десять двигателей по ускоренной технологии);
- масло М-8В плюс 3 % присадки ВАРКС (десять двигателей по ускоренной технологии).

Качество приработки ЦПГ оцениваем по стабильности момента механических потерь на трение; величине износа гильз цилиндров двигателей, поршневых колец, вкладышей и шеек (коренных, шатунных) коленчатого вала; по расходу топлива; эффективной мощности двигателя в конце обкатки; визуальным осмотром.

Величину момента механических потерь на трение (момента силы трения) определяем в процессе холодной и горячей обкатки двигателей при постоянной частоте вращения коленчатого вала, согласно, режима обкатки двигателей по показаниям весового механизма стенда КИ-5543 через каждые 2 минуты. По мере приработки деталей величина момента механических потерь на трение стабилизируется и остается постоянной.

Для определения величины износа деталей ЦПГ и КШМ испытываемых двигателей проводим до, и после обкатки микрометраж гильз цилиндров и шеек коленчатого вала в соответствии с ГОСТ 14846-81. Износ поршневых колец определяем по увеличению зазора в замке и потере их массы за время обкатки двигателей. Износ вкладышей определяем по потере их массы, а качество их приработки по площади приработанной поверхности.

Микрометраж гильз цилиндров проводим индикаторным нутромером с точностью измерения 0,001 мм в плоскостях и сечениях, указанных на рисунке 3.19, а микрометраж шеек коленчатого вала проводим микрометром.

Для определения износа поршневых колец и вкладышей коленчатого вала используем весы WA-31 производства Польша «Zaktady Mechaniki Precyzyjnej» (рис. 3.12) с точностью измерения $0,1 \times 10^{-3}$ г.

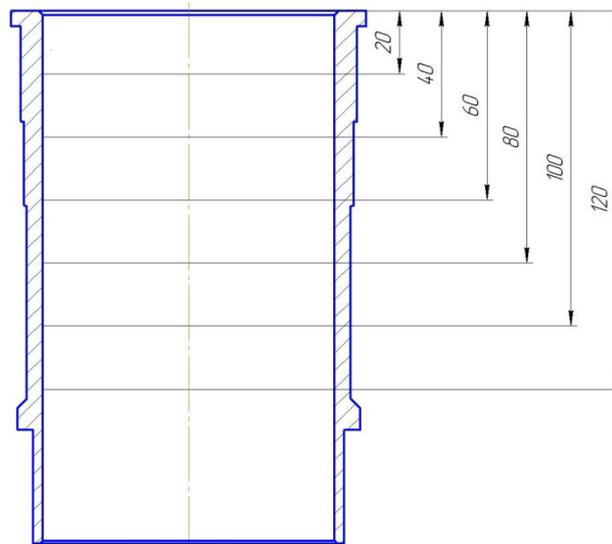


Рисунок 3.19 – Схема микрометража гильзы цилиндра

В процессе обкатки двигателя под нагрузкой при контроле расхода топлива можно определить его экономичность.

Динамика изменения расхода топлива может служить критерием оценки качества обкатки при сравнительных испытаниях. После проведения (по времени) стендовой обкатки двигателей производим замер расхода топлива. Для этого на работающем двигателе полностью открываем дроссельные заслонки, и с помощью тормозного механизма обкаточного стенда поддерживаем частоту вращения коленчатого вала двигателя 2000 мин^{-1} . После установления данной частоты вращения с помощью трехходового крана перекрываем подачу топлива из топливоподающей системы и в течение 1 минуты производим подачу топлива из емкости с бензином установленной на весах типа ВЦГ-10. При этом фиксируем показания силоизмерительного механизма обкаточно-тормозного стенда.

Расход топлива определяем по потере массы емкости с бензином до, и после проведения измерения. Далее определяем [116] часовой расход топлива G_T , кг/ч по выражению (3.24):

$$G_T = 3,6 \cdot \frac{g}{t}, \quad (3.24)$$

где g – масса топлива, израсходованная за время испытания, кг; t – время испытания, ч.

Эффективная мощность – это комплексный показатель оценки качества приработки деталей двигателя и проведения обкатки. Эффективная мощность N_e , кВт, подсчитывается по формуле (3.25):

$$N_e = \frac{P \cdot l \cdot n}{9554}, \quad (3.25)$$

где P – показатель весов тормоза, Н; n – частота вращения коленчатого вала двигателя, мин⁻¹; l – длина плеча весового механизма, м ($l=0,716$).

По часовому расходу топлива - G_T и эффективной мощности - N_e определяем удельный расход - g_e , г/кВт·ч:

$$G_e = \frac{G_T \cdot 10^3}{N_e}. \quad (3.26)$$

3.5.4 Методика эксплуатационных испытаний

Для оценки надежности и межремонтного ресурса двигателя УМЗ-417 после обкатки [45], на эксплуатационные испытания были направлены 30 двигателей, из них: 10 двигателей обкатанных по типовой технологии на чистом масле М-8В, 10 двигателей обкатанных по ускоренной технологии на масле М-8В + 2 % ОГМ, 10 двигателей обкатанных по ускоренной технологии на масле М-8В + 3 % ВАРКС.

Вместе с паспортом на каждый двигатель выдан специальный журнал эксплуатационных испытаний для регистрации наработки в километрах пробега и отказов двигателя в период эксплуатации.

Согласно ГОСТ 17510-79 выбран план наблюдений NUR. При этом наблюдении предельное состояние будет зарегистрировано только у части машин. При использовании плана NUR возможны случаи преждевременного снятия с наблюдений некоторых неисправных машин, наработка которых не достигла заданного значения. Информация принимает многократно усеченный характер, т.к. появляются выпадающие точки.

Влияние приработочной присадки на долговечность (ресурс) двигателей оцениваем по текущему пробегу. Обработку этих результатов проводим аналитическим методом двух координатных точек для многократно усеченной информации и методом графических координатных точек без учета вышедших из строя двигателей. Параметры закона нормального распределения (ЗНР) рассчитываем [24] по выражениям:

$$\bar{T} = \frac{116,3 \cdot (X_2 - B)}{Y_2} + B, \quad (3.24)$$

$$\sigma = 0,4 \cdot (\bar{T} - B), \quad (3.25)$$

где \bar{T} - среднее значение пробега, км; X_2, Y_2 – соответственно абсцисса и ордината точки при $\sum_{i=0}^n P_2 = 0,9$; B – величина расчетного отрезка, мм.

Для закона распределения Вейбула (ЗРВ) параметры определяются [24] из выражений:

$$a = \text{antlg} \frac{A}{100}; \quad d = \frac{200}{B}, \quad (3.26)$$

Величина отрезков для ЗНР и ЗРВ определяем [24] по уравнениям:

$$B = \frac{X_1 Y_2 - X_2 Y_1}{Y_2 - Y_1}; \quad B = \frac{100 \cdot (X_2 - B)}{Y_2}; \quad A = B + B, \quad (3.27)$$

где X_1 и Y_1 – соответственно абсцисса и ордината точки $\sum_{i=1}^n P_2 = 0,2$.

Значения абсцисс (X_1) и (X_2) определяем в размерность T , км, а для ЗРВ в миллиметрах из выражения:

$$X_i = 100 \cdot \lg T_{\text{км}}. \quad (3.28)$$

Для аналитического определения величины A ; B ; B – строим интегральные прямые для ЗНР и ЗРВ.

Накопленную вероятность для многократно усеченной информации определяем по уравнению:

$$\sum_1^i P_i = \frac{N_0}{N+1}, \quad (3.29)$$

где № - порядковый номер i -й точки исходной информации; N – количество объектов наблюдений.

Координаты опытных точек $(\sum_{i=1}^i P_i \text{ и } T_i)$ для ЗНР и ЗРВ определяем в миллиметрах по уравнению:

$$\text{для ЗНР} \quad Y_i = 50 \cdot [H_k \cdot 0,01 - H_k \cdot (F_i)] , \quad (3.30)$$

где H_k – квантиль ЗНР.

Значение пробега (X_i) определяем с учетом масштаба.

$$\text{для ЗРВ} \quad Y_i = 50 \cdot [2,37 + \lg \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^i p_i}] . \quad (3.31)$$

Значение пробега (X_i) определяем по выражению (3.28).

Выбор теоретического закона распределения пробега проводим визуальным сравнением совпадения точек с интегральными прямыми.

Информацию о пробеге после снятия с эксплуатационных испытаний после выработки ресурса обрабатываем по методу Стьюдента [117], согласно которому нормированная случайная величина равна:

$$T = \frac{\bar{T} - X_0}{\sigma_{\bar{T}}} , \quad (3.32)$$

где X_0 – средняя генерального коллектива; \bar{T} - среднее выборки пробегов из генерального коллектива; $\sigma_{\bar{T}}$ - стандарт средней, определяемой по формуле:

$$\sigma_{\bar{T}} = \frac{S}{\sqrt{N}} , \quad (3.33)$$

где S – выборочное среднее квадратичное отклонение, определяется по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{N=1}^n (T^N - \bar{T})} , \quad (3.34)$$

где $T_1 \dots T_N$ – значения пробега, наблюдаемой в выборке и обозначает какое-либо из этих значений.

Распределение подчиняется закону:

$$S(T) = C \left(1 + \frac{T^2}{N-1}\right)^{\frac{h}{2}}. \quad (3.35)$$

В связи с изложенным, доверительные интервалы для генерального среднего находят из выражения:

$$\bar{T} - \frac{S}{\sqrt{N}} \cdot t_{\alpha, k} \langle X_0 \rangle \quad \bar{T} + \frac{S}{\sqrt{N}} \cdot t_{\alpha, k}, \quad (3.36)$$

где $t_{\alpha, k}$ – значение квантиля статистики (Т) уровня $P = \frac{1-\alpha}{2}$ для числа степеней свободы $k = N - 1$.

Значение $t_{\alpha, k}$ приведено в [117].

Относительную предельную ошибку (δ) определяем в процентах от среднего значения пробега (\bar{T}) независимо от выбранного закона распределения:

$$\delta = \frac{T^B - \bar{T}}{\bar{T} - T_{CM}}, \quad (3.37)$$

где T^B – верхняя доверительная граница; T_{CM} – величина смещения начала рассеивания.

3.6 Оценка точности результатов испытаний

Обработку данных и оценку точности экспериментов проводим с использованием критерия Смирнова [117]. Критерий действителен для наиболее широко встречающихся случаев, при которых генеральные параметры неизвестны, а известны лишь их оценки, приведенные на основании анализируемой выборки.

Предварительные результаты испытаний выборки располагают в виде вариационного ряда:

$$X_i \leq \dots \leq X_1 \leq \dots \leq X_n, \quad (3.38)$$

Оценку математического ожидания проводим в зависимости от величины объема выработки:

$$\text{при } n < 50 \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^e X_i}{n}, \quad (3.39)$$

$$\text{при } n > 50 \quad \bar{X} = \frac{\sum_{j=1}^e X_j \cdot n_j}{n}, \quad (3.40)$$

где X_i – значение параметра; n – объем выборки; X_j – значение параметра в середине i -го интервала; n_j – частота, заключенная в i -м интервале; e – число интервалов.

Среднее квадратичное отклонение также находится в зависимости от величины выборки.

$$\text{при } n < 50 \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2, \quad (3.41)$$

$$\text{при } n > 50 \quad S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n n_j \cdot (X_j - \bar{X})^2. \quad (3.42)$$

Затем вычисляется статистика:

$$U_1 = \frac{\bar{X} - X_1}{S}, \quad (3.43)$$

если сомнение вызывает первый член вариационного ряда:

$$U_n = \frac{X_n - \bar{X}}{S}, \quad (3.44)$$

если сомнителен максимальный член вариационного ряда, сопоставляется с критическим значением (U_α), взятым из [117] для уровня значимости (U_α) и объема выборки.

Если выполняется $U_1 \leq U_\alpha$ или $U_n \leq U_\alpha$, то нулевая гипотеза не отклоняется, т.е. результаты испытаний первого и последнего образцов не следует считать резко выделяющимися, и они должны учитываться.

В случае $U_1 > U_\alpha$ или $U_n > U_\alpha$ нулевая гипотеза отклоняется, т.е. результаты (X_1) (X_n) случайны и определены ошибками при испытаниях. В этом случае значения параметров (X_1) и (X_n) исключаются из вариационного ряда, а найденные ранее оценки (\bar{X}) и (X_n) исключаются из вариационного

ряда, и найденные ранее оценки (\bar{X}) и (S) подвергаются корректировке с учетом отброшенных результатов.

Критерий (t_α) принимается согласно таблице [117] для уровня значимости (α) и объема выборки (n). При $n > 50$ рекомендуется принимать $t_\alpha = U_\alpha$

Ошибку экспериментов при малых их количествах определяли по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{S \cdot t_\alpha}{\bar{X}}}, \quad (3.45)$$

где t_α – критерий для уровня значимости (α).

3.7 Выводы

При выборе методики проведения исследований в основу была положена методика, предложенная в литературе [55].

1 Составлена программа и общая методика исследований, отражающая особенности приработки сопряжений с добавлением прирабочных присадок.

2 При проведении лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний выбираются стандартные методики, такие как ГОСТ 20502-75, ГОСТ 33-82, ГОСТ 11362-76, РД 10 Россия 0010-92.

3 Обработка экспериментальных данных и оценка точности результатов проведена с использованием критерия Смирнова.

4 При исследовании пленки переноса, определении ее элементного и количественного состава, в связи с малой толщиной пленки (до двух мкм), выбраны методы растровой электронной микроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии, в виду их большой чувствительности и способности зафиксировать элементы малой величины (до 0,5 мкм) присутствующие в небольшой концентрации на исследуемых поверхностях трения.

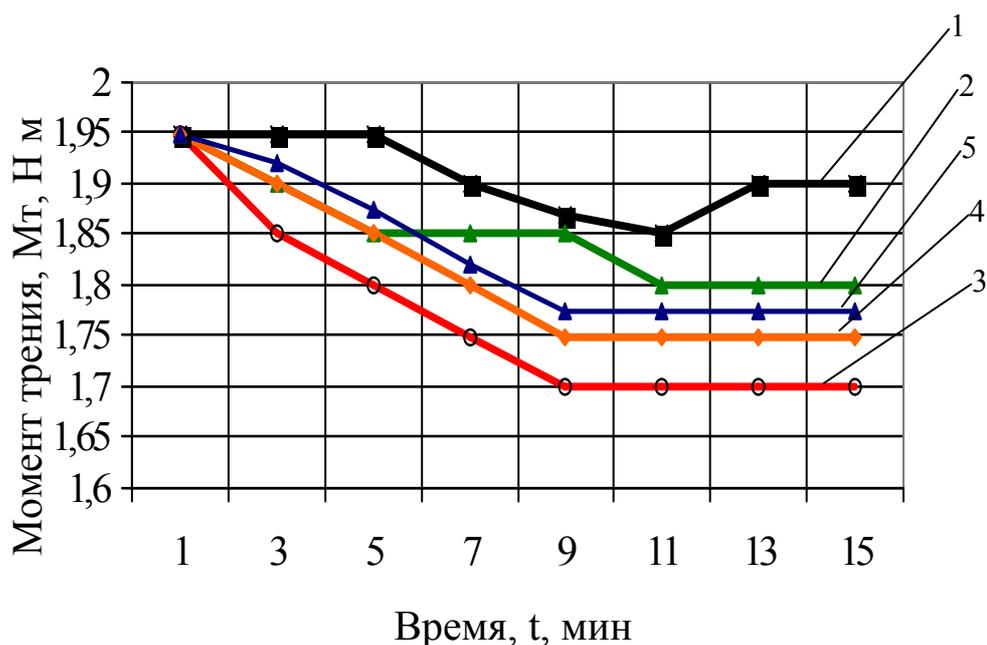
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРАБОТОЧНЫХ ПРИСАДОК

4.1 Лабораторные исследования приработки двигателей после ремонта на основе присадок

Трибологические сравнительные испытания [118] проводили на установке СМТ-1 по схеме «ролик-колодка». Использовалось масло М-8В с присадкой ВАРКС взятой 3 % по массе.

4.1.1 Изменение момента силы трения

Средние значения моментов силы трения представлены в Приложении - В. На рисунке 4.1 приведены зависимости изменения момента силы трения от времени испытания.



- состав 1 – Масло М-8-В (температура - 333 К)
- состав 2 – Масло М-8-В + ВАРКС – 3% (температура - 333 К)
- состав 3 – Масло М-8-В + ВАРКС - 3%, (температура 293 К – 5 мин и 333 К–10 мин)
- состав 4 – Масло М-8-В + ВАРКС -3%, (температура - 293 К)
- состав 5 – Бензин А-76 + ВАРКС-3 % (температура 293 К)

Рисунок 4.1 – Зависимость моментов силы трения от времени испытаний

Для определения эффективности действия приработочных присадок используем, ΔM_T – разницу между силами трения.

$$\Delta M_T = M_{T \text{ нач}} - M_{T \text{ кон}} , \quad (4.1)$$

где $M_{T \text{ нач}}$ – начальное значение момента силы трения; $M_{T \text{ кон}}$ - конечное значение момента силы трения.

Процесс трения, также характеризует – V_{M_T} , Н·м/ч, скорость изменения момента силы трения.

$$V_{M_T} = M_{T \text{ нач}} - M_{T \text{ кон}} / t_{\text{оп}} , \quad (4.2)$$

где $t_{\text{оп}}$ – время опыта, ч.

Средние значения показателей процесса приработки испытуемых образцов представлены в таблице 4.1

Таблица 4.1 - Показатели процесса приработки исследуемых образцов на машине трения СМТ-1 при ($n=500 \text{ мин}^{-1}$; $P=600 \text{ Н}$; $t=15 \text{ мин}$)

№ состава	$M_{T \text{ нач}}$ Н·м	$M_{T \text{ кон}}$ Н·м	ΔM_T		V_{M_T} , Н·м/ч	$t_{\text{ст}}$, мин	T_c , К	Износ, г
			Н·м	%				
1 чистое масло М-8-В ($T=333 \text{ К}$)	1,95	1,90	0,05	2,6	0,23	13	345	$4,7 \cdot 10^{-3}$
2 масло М-8-В +3 % ВАРКС ($T=333 \text{ К}$)	1,95	1,80	0,15	7,7	0,82	11	343	$2,5 \cdot 10^{-3}$
3 масло М-8-В +3 % ВАРКС ($T=293 \text{ К}$ -5 мин, $T=333 \text{ К}$ -10 мин)	1,95	1,70	0,25	12,8	1,67	9	338	$0,8 \cdot 10^{-3}$
4 масло М-8-В +3 % ВАРКС ($T=293 \text{ К}$)	1,95	1,75	0,20	10,3	1,33	9	341	$0,9 \cdot 10^{-3}$
5 бензин А-76 + 3 % ВАРКС ($T=293 \text{ К}$)	1,95	1,78	0,17	8,7	1,13	9	336	$1,2 \cdot 10^{-3}$

При применении в качестве смазочного материала моторного масла М-8В снижение момента силы трения происходит на пятой минуте и по мере

приработки снижается не значительно на 0,05 Н·м. Стабилизация момента трения происходит по мере формирования оптимальной шероховатости пар трения и увеличения площади контакта трущихся поверхностей, главным образом за счет механического срезания микронеровностей под действием нагрузки.

Добавление в моторное масло М-8В поверхностно-активных и химически активных веществ, способствует интенсивному формированию оптимальной микрогеометрии поверхностей, а, следовательно, интенсивному снижению, а также более быстрой стабилизации момента силы трения.

При испытании образцов с использованием масла с присадками, мы видим, что снижение момента силы трения, наблюдается с первой минуты, а стабилизация происходит на 9-11 минутах. При испытании составов 2, 3, 4, 5 значение ΔM_T соответствует 0,15 Н·м, 0,25 Н·м, 0,20 Н·м, 0,17 Н·м.

Существенная роль в реализации комплексного действия ПАВ и ХАВ принадлежит физико-химическим процессам, протекающим на поверхностях трения и приводящих к образованию противоизносных пленок. Пленки переноса по-разному реагируют на изменение температуры [118]. Так при низких температурах протекают в основном адсорбционные процессы. При повышении температуры до 333...343 К начинают интенсивно протекать хемосорбированные процессы. С течением времени, в следствии пластифицирования сопряженных поверхностей твердых тел поверхностно-активными веществами смазки и малой твердости образующихся защитных покрытий, фактическая площадь контакта увеличивается. Это приводит к уменьшению удельной нагрузки и температуре в зоне контакта.

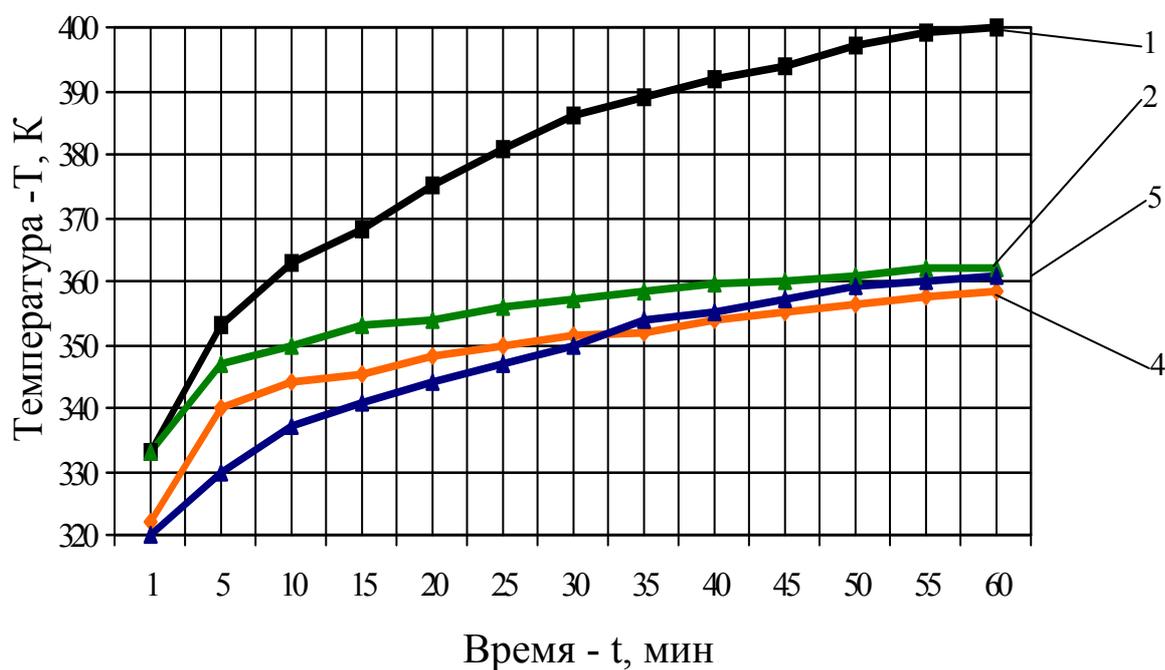
Состав № 3 дает наилучшие показатели снижения момента сил трения при $M_{T \text{ нач}} = 1,95 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $M_{T \text{ кон}} = 1,70 \text{ Н} \cdot \text{м}$, изменение составило 12,8 %, а скорость изменения момента сил трения $V_{MT} = 1,67 \text{ Н} \cdot \text{м/ч}$.

4.1.2 Изменение температуры поверхностей трения

Температура поверхностей трения является одним из наиболее важных факторов, влияющих на коэффициент трения [119].

Средние значения температуры приработочного состава и поверхностей трения представлены в Приложении – В.

На рисунке 4.2 приведены зависимости изменения температур от времени проведения испытания.



- состав 1 – Масло М8-В (температура - 333 К)
- состав 2 – Масло М8-В + ВАРКС -3%, (температура - 333 К)
- состав 4 – Масло М8-В + ВАРКС -3%, (температура - 293 К)
- состав 5 – бензин А-76 плюс присадка ВАРКС-3% (температура 293 К)

Рисунок 4.2 - Зависимость температуры колодок от времени испытаний

Проведенные исследования показали, что условно графики температуры в процессе приработки на маслах с присадками можно разделить на два периода: период нарастания температуры; период стабилизации температуры на минимальных для данных условиях значениях. В первый период происходит активное взаимодействие микронеровностей, что приводит к росту температуры.

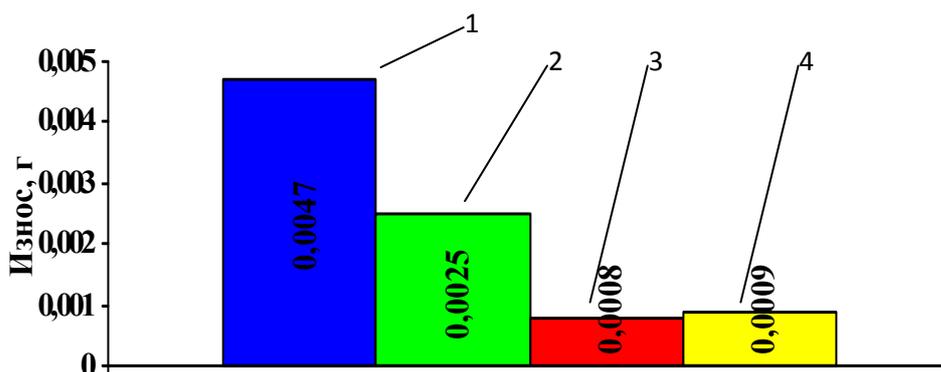
Основное изменение шероховатости поверхности происходит в этот период. При приработке на чистом масле М-8В на всем протяжении испытания наблюдается рост температуры поверхностей трения и в конце достигает значения 400 К. Противоизносные пленки, образованию которых способствуют олеиновая кислота, октадецилсульфат натрия – обладают большой теплопроводностью. Они способствуют отводу тепла от основных трущихся поверхностей.

При работе составов 2 и 4 с повышением температуры происходит десорбция физически адсорбируемого вещества и осуществляется переход к хемосорбции. При этом значения температур в конце испытания составили для состава № 2 – 363 К, для состава № 4 – 358 К.

4.1.3 Определение износа образцов

Прирабочные составы должны ускорять приработку деталей, а не приводить к повышенным износам деталей, иначе ресурс трущихся соединений двигателя будет уменьшен.

Средние значения износа колодок за время испытаний на машине трения СМТ-1 представлены в таблице 4.1 (рис. 4.3).



- 1 – Масло М-8-В (Т – 333 К);
- 2 – Масло М-8-В + ВАРКС – 3% (Т – 333 К);
- 3 – Масло М-8-В + ВАРКС – 3% (Т – 293 К – 5 мин и 333 К – 10 мин);
- 4 - Масло М-8-В + ВАРКС – 3% (Т – 293 К);

Рисунок 4.3 - Средний износ колодок за время испытаний

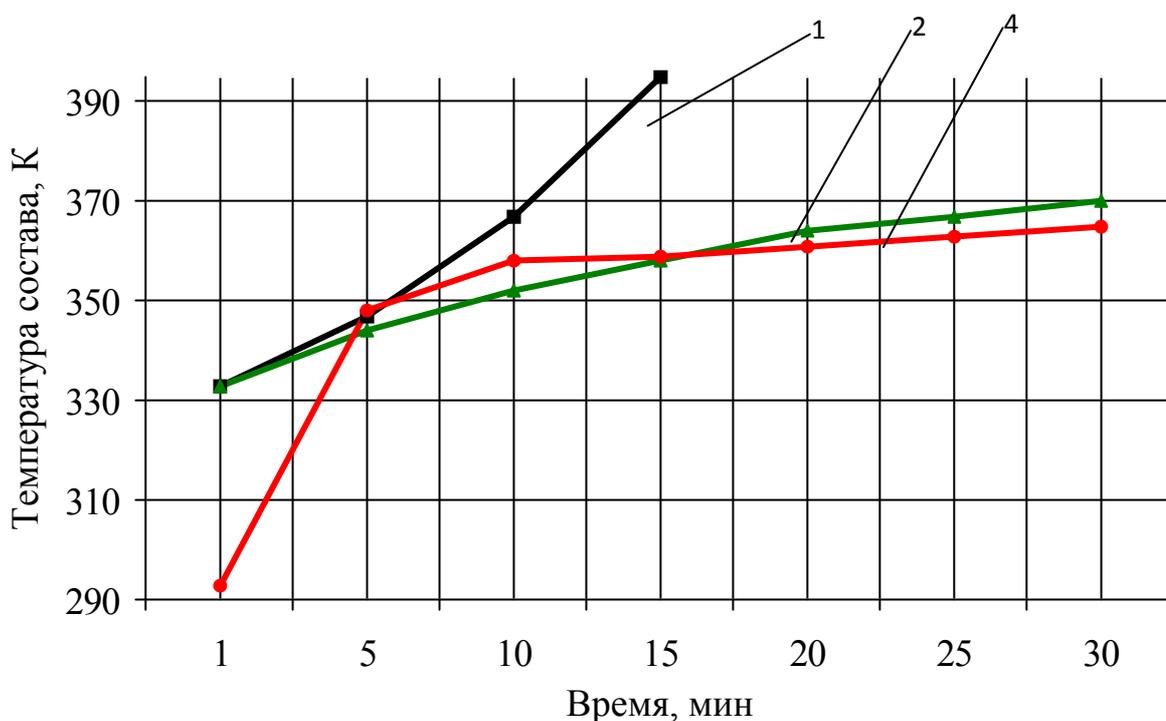
Таким образом, образцы, приработанные на масле с присадками имеют износостойкость поверхностных слоев в 5,9 раза выше, чем на чистом масле М-8В.

4.1.4 Исследование противозадирных свойств приработочных присадок

Одним из основных критериев оценки надежности работы двигателя является время сопротивления схватывания трущихся поверхностей.

За начало схватывания была принята температура приработочного состава, равная 393 К и начало «всплеска» момента силы трения.

Результаты испытаний представлены в Приложении Д (рис. 4.4).



- состав 1 – Масло М-8-В (температура - 333 К)
- состав 2 – Масло М-8-В + ВАРКС -3% (температура - 333 К)
- состав 4 – Масло М-8-В + ВАРКС -3% (температура - 293 К)

Рисунок 4.4 - Зависимость температуры приработочных составов от времени при испытании образцов на схватывание ($n=500 \text{ мин}^{-1}$; $P=1274 \text{ Н}$; $t=30 \text{ мин}$)

При работе трибосоединения на чистом масле М-8-В, видно, что схватывание наступает на 15-й минуте. Добавление в масло присадки ВАРКС значительно повышает противозадирную стойкость. За время испытания образцы, исследуемые на составах № 2 и № 4, не подвергаются схватыванию, так как температура не достигает критической.

Такое повышение времени сопротивления схватывания объясняется образованием на поверхностях трения пленок переноса, локализирующих теплоту в тонком поверхностном слое и обеспечивающих ее отвод из зоны трения.

4.1.5 Определение шероховатости образцов

Шероховатость поверхностей после приработки свидетельствует о формировании оптимальной микрогеометрии соединения.

В результате обработки профилограмм (Приложение - Д) были получены следующие характеристики шероховатости образцов.

Таблица 4.2 - Результаты оценки шероховатости приработочных поверхностей

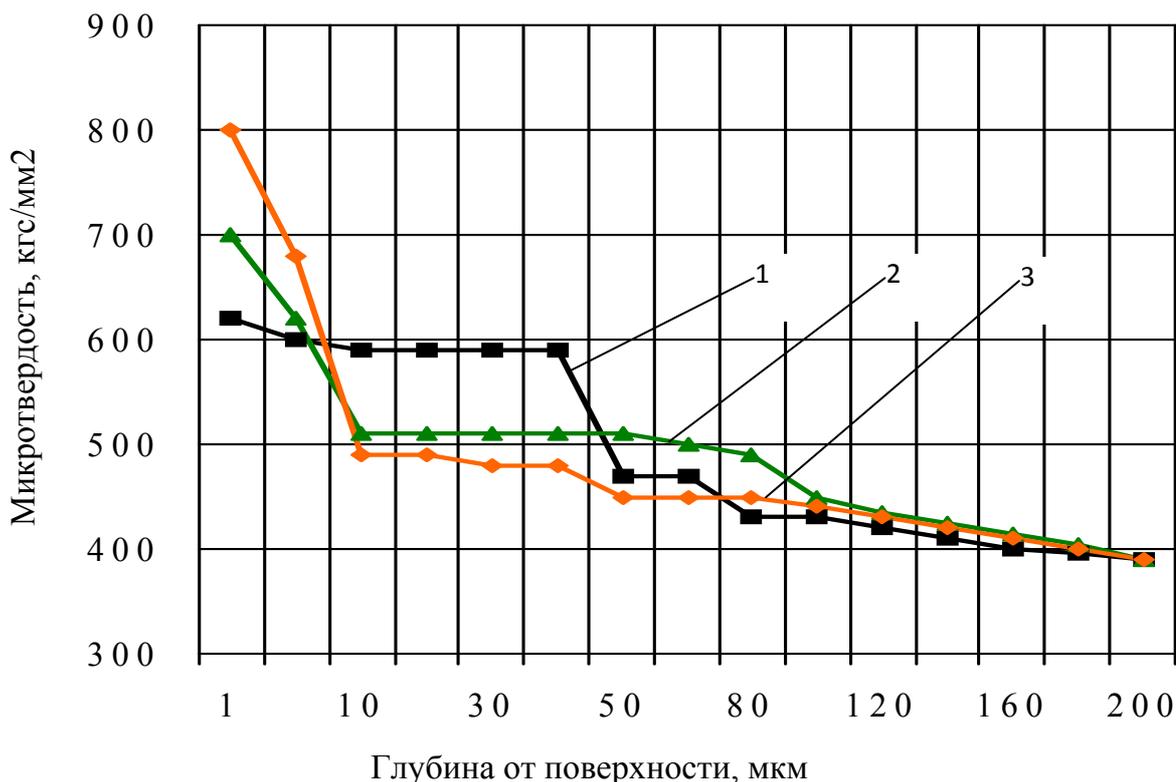
№ состава	Параметры шероховатости, мкм		
	R_{MAX}	R_z	R_a
2	3,75	1,5	1,3
1	5,25	2,2	1,8
4	2,75	0,95	0,63

4.1.6 Определение микротвёрдости образцов после приработки

Один из показателей по которому определяют возможность повышения ресурса двигателей - это микротвердость поверхностей трения. Применение присадок приводит к процессам, обеспечивающим изменение структуры

поверхностного слоя металла в процессе трения под действием температуры и нагрузки. Увеличение микротвердости поверхности трения свидетельствует об эффективности присадки.

Образцы, используемые при определении микротвердости, приработаны при следующих режимах: $n = 500 \text{ мин}^{-1}$; $p = 780 \text{ Н}$; $t = 60 \text{ мин}$. Результаты экспериментов приведены на рисунке 4.5



- 1- Масло М-8-В;
- 2- Масло М-8-В + ВАРКС-3% (температура – 333 К);
- 3- Масло М-8-В + ВАРКС-3% (температура – 293 К).

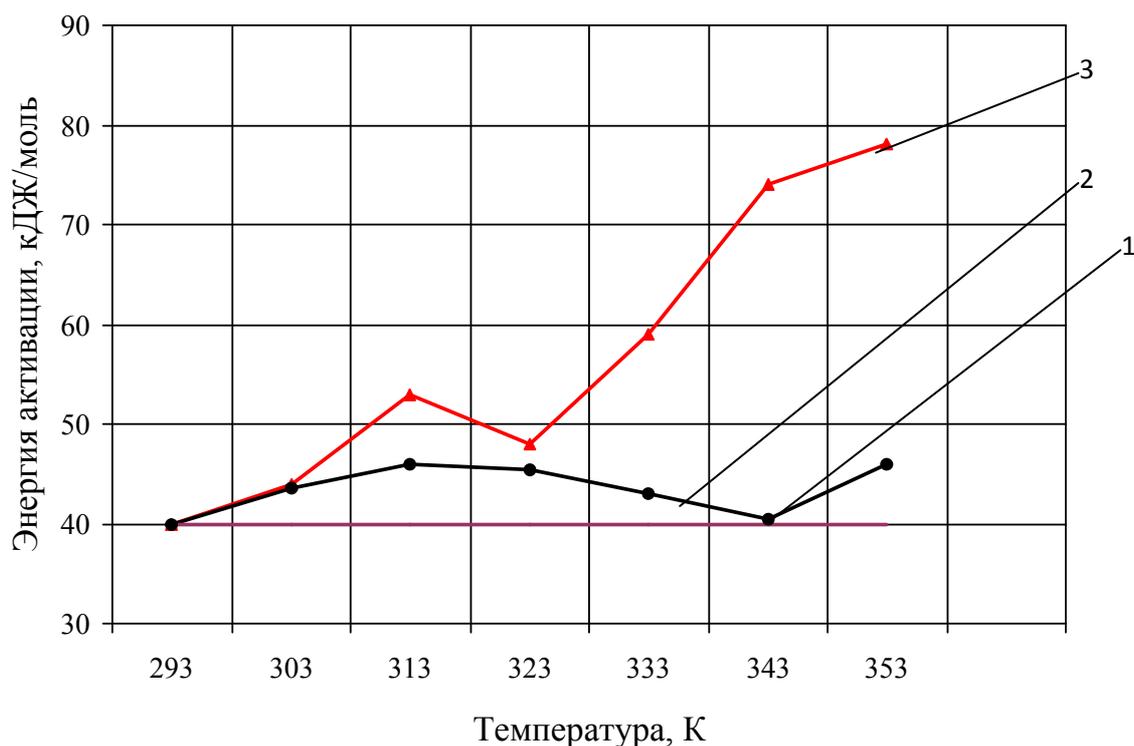
Рисунок 4.5 – Зависимость микротвердости по глубине от поверхности образцов

4.1.7 Оценка пластичности поверхностей трения

Энергия активации является параметром многих кинетических моделей, например, для оценки долговечности, скорости деформации и скорости изнашивания материалов и, как в данном случае для оценки влияния смазочных материалов на прочность поверхностных слоёв [119].

Исследования пластичности поверхностей трения проводили в научно-техническом центре «Надежность» Самарского государственного технического университета [120].

Энергия активации поверхностного слоя у образца приработанного на масле с присадкой ВАРКС в 1,65 раза больше, чем у образца приработанного на масле М-8-В без присадки (рис. 4.6).



- 1 – Сухая поверхность
- 2 – Масло М-8-В
- 3 – Масло М-8-В + ВАРКС-3%

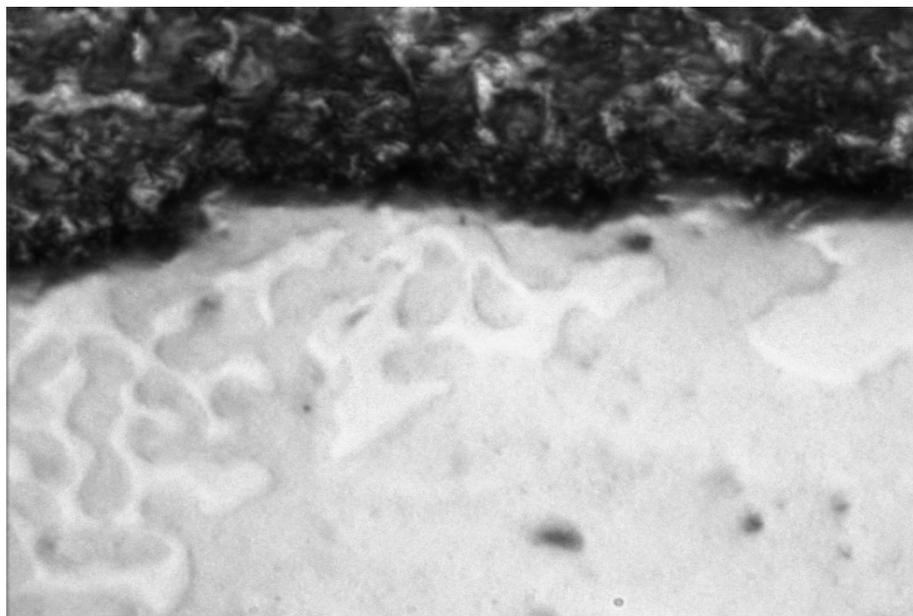
Рисунок 4.6 - Сравнительные значения энергии активации поверхностей при различных температурах и с различными смазочными материалами

4.1.8 Результаты исследований элементного состава пленки переноса поверхностей трения образцов деталей

Исследования элементного состава пленки переноса поверхностей трения образцов деталей проводились в Испытательном центре «ОМВ-ИЦ»

ФГУП «Государственный научный центр РФ научно-исследовательском институте атомных реакторов» в г.Димитровграде (Приложение Е).

На металлографическом микроскопе МИМ-8М, с увеличением 500-1500 раз, цифровой фотокамерой Criative PC-CAM300 были сделаны фотографии поверхностей трения рисунок 4.7.



а) образец приработанный на масле М-8-В + 3% ВАРКС



б) образец приработанный на чистом масле М-8-В

Рисунок 4.7 – Металлографические фотографии поверхности трения

При обработке полученных от образца и эталона масс-спектров были идентифицированы масс-пики, которые можно отнести к таким возможным элементам как: H, B, C, N, O, Na, Mg, Al, Si, P, S, K, Ca, Cr, Mn, Fe, а также к масс--пикам молекул и кластеров, в состав которых входили эти же элементы: CH, CH₂, NH, OH, H₂O, O₂, AlO, SiOH, CaO, CaOH, FeC, CrO, FeO, FeOH, C_nH_n и другие (рис. 4.8).

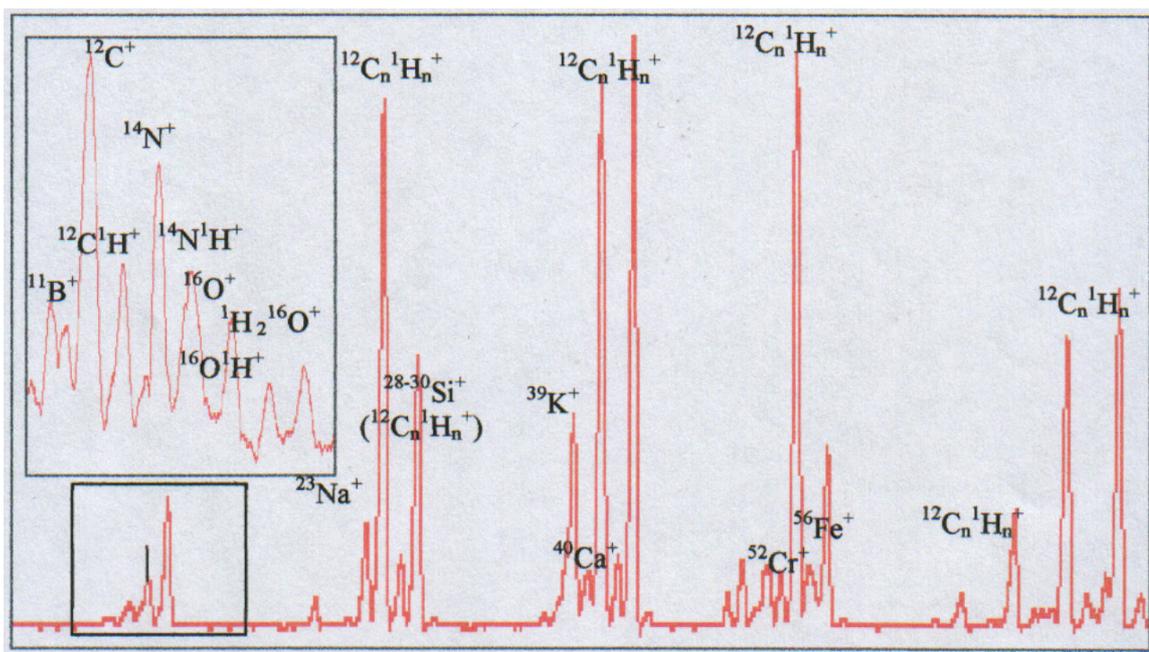


Рисунок 4.8а – Масс-спектр поверхности образца

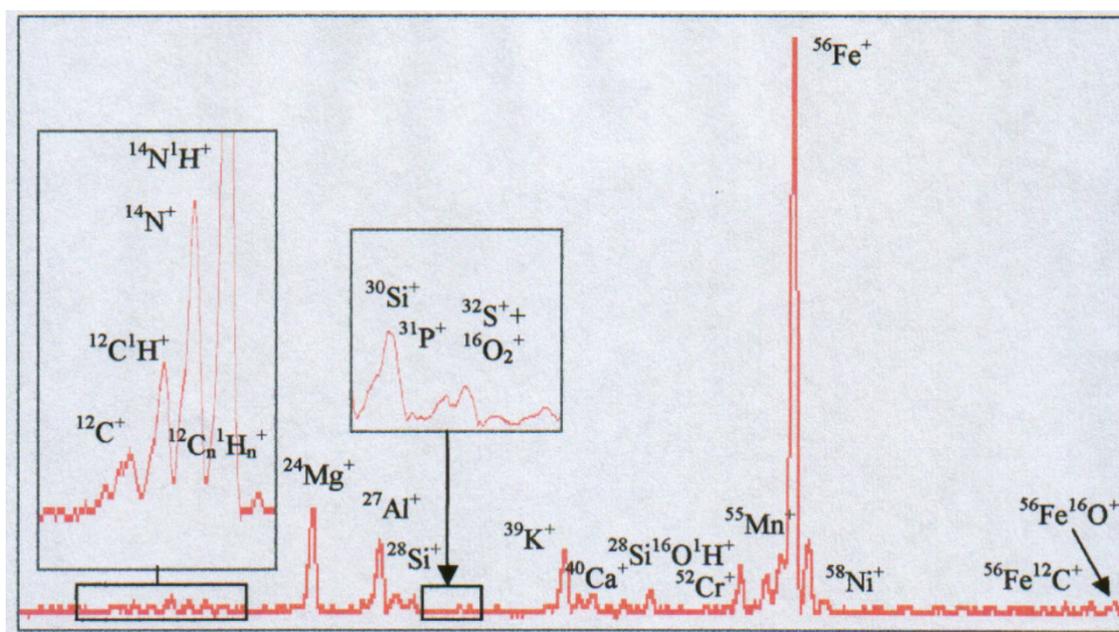


Рисунок 4.8б – Масс-спектр поверхности эталона

Предварительный анализ масс-спектров, полученных от произвольно выбранных областей на поверхности образца и эталона, показал, что качественно они лишь незначительно отличаются друг от друга. Основное отличие состояло в присутствии на поверхности трения несколько большего количества углерода, чем на поверхности эталона (то есть обычной поверхности материала). Кроме того, при записи масс-спектров от поверхности трения были зарегистрированы значительные по интенсивности (по сравнению с эталоном) масс-пики идентификация которых вызвала определенные затруднения – это масс-пики с отношением массы к заряду $m/e = 29, 43, 45$ и др..

Для более надежной идентификации масс-пиков (разделения возможных наложений) и для выяснения особенностей распределения отмеченных выше элементов и их кластеров по исследуемой поверхности трения, от одной из ее областей были получены вторично-ионные изображения.

На рисунке 4.9 представлены элементные изображения области поверхности трения, полученные во вторичных ионах различных элементов и их кластеров. Размер раstra или размер полученных изображений равен 1000×1000 мкм.

Формирование ионного изображения обусловлено топографическим и элементным контрастом. При незначительном влиянии топографического контраста светлые участки на изображениях соответствуют областям с большей относительной атомной концентрацией соответствующего элемента, темные участки – с меньшей концентрацией.

Перед записью ионных изображений было проведено избирательное травление центра выбранной области (выделено пунктирным кругом на ионном изображении ^{12}C (рис. 4.9)). В результате этого в данном месте образовалась область чистого металла, в то время прилегающие области сохранили состав поверхности трения. При записи ионных изображений различие между центром и прилегающими к центру областями должно было

уменьшаться до полного исчезновения следов предварительного травления, что и наблюдается на изображениях в ионах марганца и железа, которые записывались последними (ионные изображения представлены на рисунке 4.9 в порядке их записи).

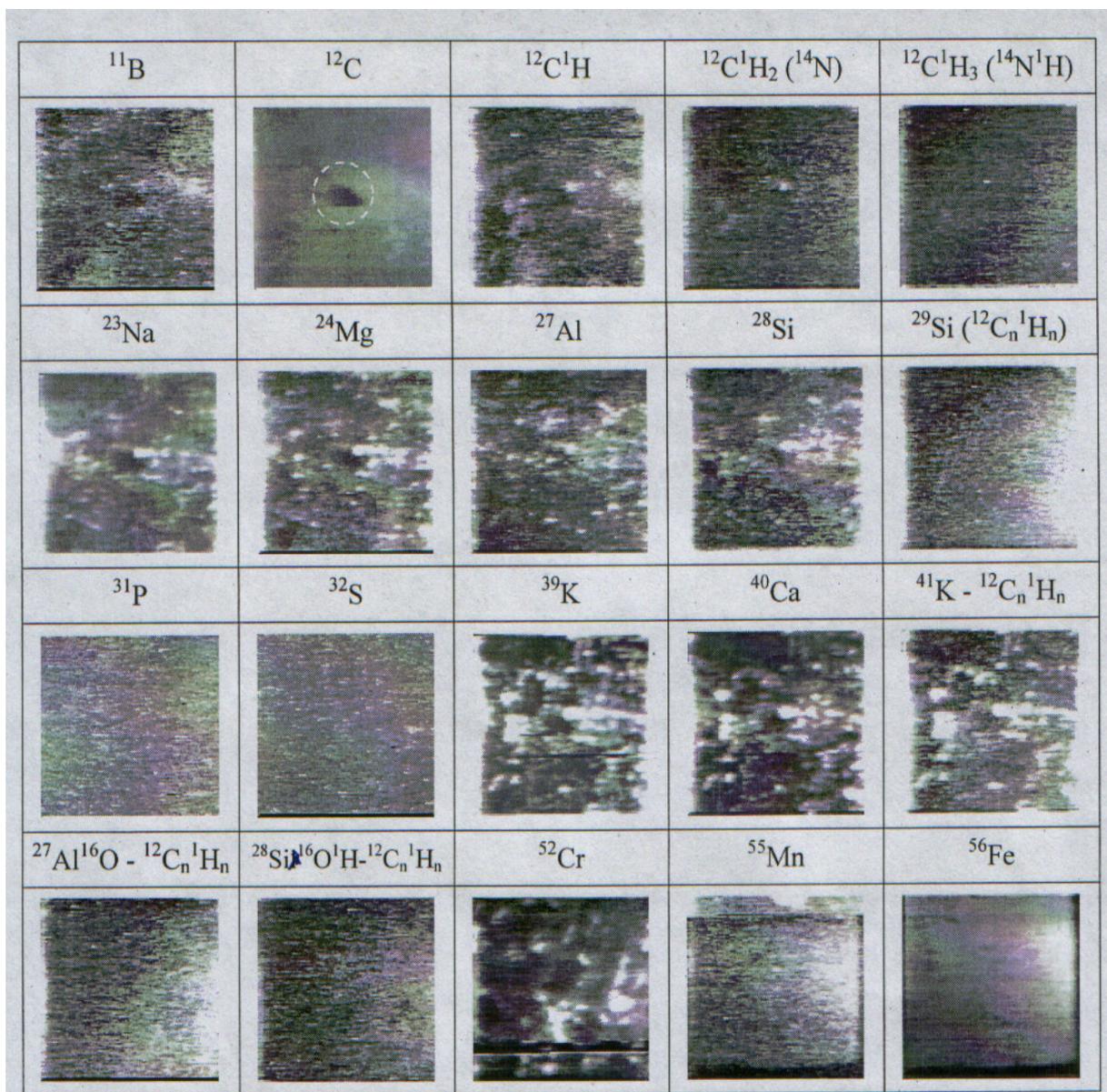


Рисунок 4.9 – Ионные изображения выбранной области на поверхности трения образца

Для получения полуколичественной информации о содержании интересующих элементов в поверхностных слоях образца было проведено профилирование этих слоев по глубине. Полученные результаты

сравнивались со спектрами, записанными аналогичной процедурой от нескольких областей на поверхности эталона (рис. 4.10).

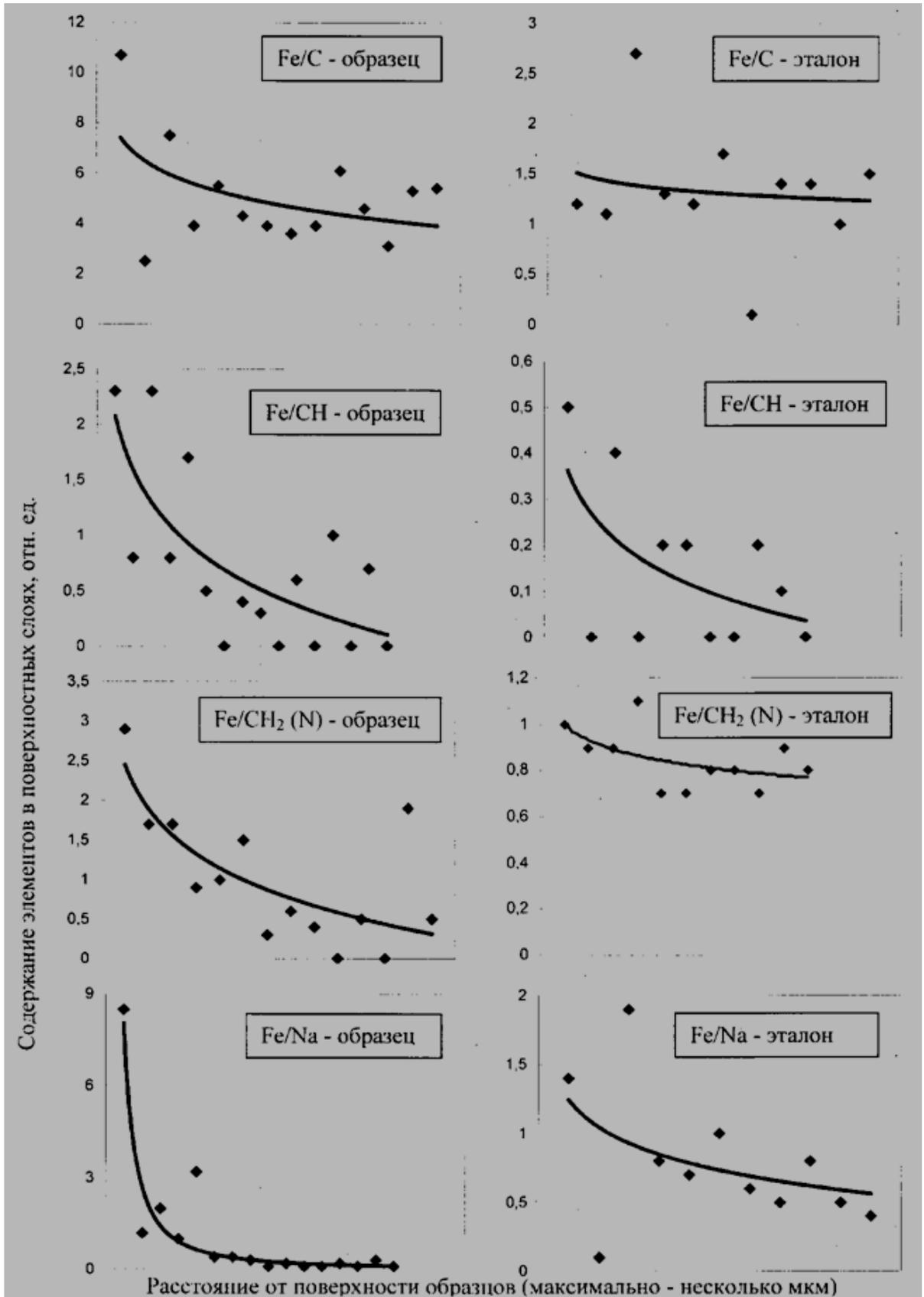


Рисунок 4.10 – Профили распределения относительного содержания

различных элементов по глубине поверхностных слоев образца и эталона

Комплексный анализ результатов исследования поверхности трения образцов, методами РЭМ и ВИМС показывает, что:

- относительное содержание углерода и углеводов, а также натрия в поверхностных областях образца в несколько раз превышает относительное содержание этих элементов и их соединений в поверхностях эталона;

- содержание углерода и углеводов, а также натрия в поверхностных областях образца резко падает при удалении на глубину до одного микрона, однако содержание собственно углерода все же остается несколько большим по сравнению с эталонным образцом даже после продолжительного травления;

- содержание хрома изменяется по глубине профилированных слоев образца, что подтверждает предположение о его возможном перераспределении под воздействием каких-либо факторов.

4.2 Выбор рациональных условий и параметров обкатки отремонтированных двигателей

Как показали предварительные исследования, на момент трения наибольшее влияние оказывают нагрузка и частота вращения коленчатого вала двигателя, с помощью которых можно влиять на процесс приработки.

Применение прирабочного масла с присадкой способствует снижению момента трения. В связи с этим, для возможности интенсификации процесса приработки, важно определить зависимость момента трения от нагрузки и частоты вращения коленчатого вала при использовании чистого масла и масла с прирабочной присадкой ВАРКС.

Для этого были проведены эксперименты на машине трения СМТ-1, результаты которых приведены в таблице 4.3.

Обработку данных проводили с помощью ЭВМ согласно методики (см. п. 3.4). Программа расчета приведена в приложении Б, а значения коэффициентов уровней регрессий даны в таблице 4.4.

Таблица 4.3 – Результаты определения момента трения (M_T) в зависимости от нагрузки и частоты вращения вала

Обкаточное масло	Нагрузка, Н	Частота вращения вала		
		$n=500 \text{ мин}^{-1}$ $M_T, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$n=1000 \text{ мин}^{-1}$ $M_T, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$n=1500 \text{ мин}^{-1}$ $M_T, \text{ Н}\cdot\text{м}$
М-8-В	0	1,04	0,98	1,10
	400	1,14	0,98	1,14
	700	1,28	1,02	1,20
	1000	1,42	1,26	1,26
	1300	1,66	1,36	1,40
	1600	1,84	1,40	1,52
	1900	2,20	1,70	1,70
М-8-В + 3% присадки ВАРКС	0	0,96	0,98	0,96
	400	1,00	0,98	0,94
	700	1,06	1,00	0,96
	1000	1,20	1,00	1,04
	1300	1,26	1,02	1,06
	1600	1,34	1,02	1,06
	1900	1,34	1,02	1,06

Таблица 4.4 – Коэффициенты уровней регрессий

Вид обкаточного масла	Параметр оптимизации	b_0	b_1	b_2	$b_{1,1}$	$b_{1,2}$	$b_{2,2}$
Масло М-8-В	Z_1	7,6407	- 3,3151	0,1680	0,8931	- 0,0678	- 0,0085
Масло М-8-В + 3% ВАРКС	Z_2	6,1574	- 1,7073	0,1321	0,4285	- 0,0376	- 0,0002

где Z_1 – момент трения M_T , Н·м, после испытания на чистом масле; Z_2 – момент трения M_T , Н·м, после испытания на масле М-8-В + 3% ВАРКС; X_1 – частота вращения вала n , мин^{-1} ; X_2 – нагрузка P , Н.

Проверку адекватности модели проводим по формулам (3.17...3.20).

В нашем эксперименте число степеней свободы $f=15$, табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл.}} = 2,3$ (см. таблицу 9.4 [112]), при $\beta=0,95$, $N=21$. Результаты расчета ($F_{\text{расч.}}$) приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Расчет адекватности модели

Определяемая величина	Параметр оптимизации	
	Чистое масло М-8-В	Масло М-8-В + 3% ВАРКС
$S_{\text{ад}}^2$	0,063	0,067
$S_{\{\bar{z}\}}^2$	0,045	0,048
$F_{\text{расч.}}$	1.400	1,400

Модель адекватна, т.к. $F_{\text{табл.}} > F_{\text{расч.}}$.

Проверку значимости коэффициентов зависимости проводим по формулам (3.21, 3.22). Табличное значение $t = 2,08$ (см. таблицу (9.5 [112])).

При испытании на масле + 3% присадки ВАРКС

$$S_{\{b_j\}}^2 = \frac{0,048}{21} = 0,00228$$

$$\Delta b_j = \pm 2,08 \cdot 0,048 = 0,1$$

При испытании на чистом масле М-8-В

$$S_{\{b_j\}}^2 = \frac{0,045}{21} = 0,00214$$

$$\Delta b_j = \pm 2,08 \cdot 0,046 = 0,096$$

Для обоих уравнений коэффициенты ($b_{1.2}$) и ($b_{2.2}$) незначимы, поэтому уравнения примут вид:

для масла с присадкой:

$$Z_1 = 6,1574 - 1,7073X_1 + 0,132X_2 + 0,4285X_1^2, \quad (4.3)$$

для чистого масла:

$$Z_2 = 7,6407 - 3,315X_1 + 0,168X_2 + 0,8931X_1^2. \quad (4.4)$$

Округлив значения свободных членов и коэффициентов до сотых,

подставив в уравнения натуральные обозначения, то есть вместо $Z - M_T, Н \cdot м$,

вместо $X_1 - \frac{n}{500}, \text{мин}^{-1}$, вместо $X_2 - \frac{P}{100}, Н$ получим уравнения, по которым

можно определить момент трения при любом значении (n) и (P).

$$M_{T_1} = 6,16 - \frac{1,71 \cdot n}{500} + \frac{0,43 \cdot n^2}{25 \cdot 10^4} + \frac{0,13 \cdot P}{100}, \quad (4.5)$$

$$M_{T_2} = 7,64 - \frac{3,32 \cdot n}{500} + \frac{0,39 \cdot n^2}{25 \cdot 10^4} + \frac{0,17 \cdot P}{100}. \quad (4.6)$$

Момент трения уменьшается при увеличении числа оборотов (n). Это подтверждается также тем, что отрицательное слагаемое с (n) больше чем слагаемое с (n^2). Для определения возможного увеличения числа оборотов при использовании масла М-8-В + 3% ВАРКС, подставляем во второе и третье слагаемое уравнений (4.5) и (4.6) значения $n=500, \text{мин}^{-1}$.

$$\left[-\frac{1,71 \cdot 500}{500} + \frac{0,43 \cdot (500)^2}{25 \cdot 10^4} \right] < \left[-\frac{3,32 \cdot 500}{500} + \frac{0,39 \cdot (500)^2}{25 \cdot 10^4} \right]$$

или имеем соотношение $1 < 1,9$, то есть имеется возможность увеличить частоту вращения коленчатого вала двигателя на 90% по сравнению с обкаткой на чистом масле.

Возможное увеличение нагрузки при использовании масла М-8-В + 3% ВАРКС рассчитываем, подставив в четвертое слагаемое уравнений $P=1900 Н$, то есть при максимальном значении момента трения.

$$\text{Тогда} \quad \frac{0,13 \cdot 1900}{100} < \frac{0,17 \cdot 1900}{100} \quad \text{или} \quad 1 < 1,31$$

Это дает возможность увеличить нагрузку при обкатке на масле М-8-В + 3% ВАРКС на 30% по сравнению с чистым маслом.

Таким образом, подтверждена возможность увеличения нагрузки и частоты вращения коленчатого вала при обкатке на масле М-8-В + 3% ВАРКС. Согласно типовой технологии обкатка производится при $P_{\max}=294$ Н, $n=2400$ мин⁻¹. При обкатке на масле с присадкой ВАРКС можно повысить нагрузку до $P = 490$ Н, а частоту вращения до $n=4500$ мин⁻¹.

4.3 Результаты исследований эффективности применения приработочных присадок на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543

Стендовые испытания проводились научно-производственной лабораторией «Качество и сертификация» на кафедре «Технический сервис и ремонт машин» Ульяновской ГСХА [45, 91].

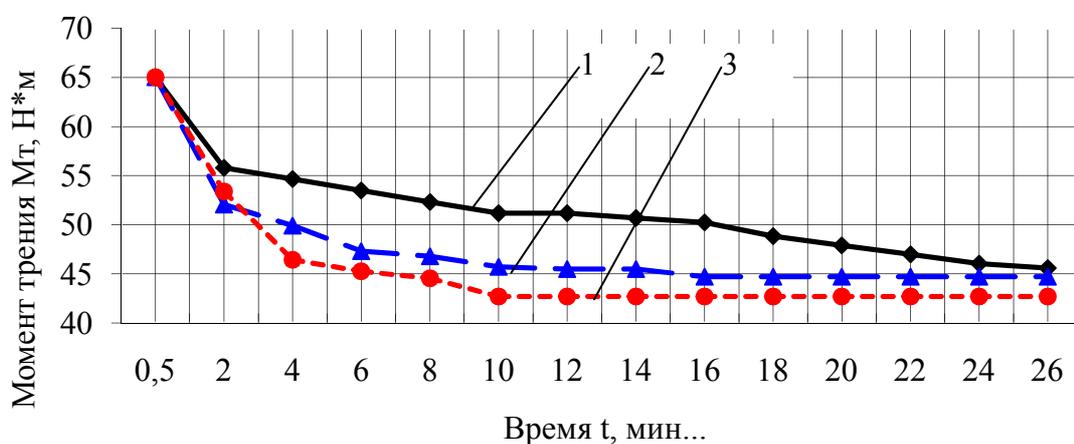
Для определения качества приработки двигателей были выбраны следующие составы обкаточных масел: чистое масло М-8В (взято как базовое, применяемое в настоящее время при обкатке двигателей УМЗ), масло М-8-В плюс 2 % присадки ОГМ (как наиболее эффективная и известная в классе металлоплакирующих составов), масло М-8В плюс 3 % присадки ВАРКС (выбрана как наиболее эффективная по результатам лабораторных исследований).

По данным [43] в период холодной и горячей обкатки происходит интенсивное изменение геометрических характеристик поверхностей с износами, достигающими до 70 % от всего приработочного периода. Величина момента механических потерь на трение по шкале весового механизма обкаточно-тормозного стенда в основном будет зависеть от величины трения цилиндропоршневой группы и кривошипно-шатунного механизма. По данным [46] 78...83 % работы трения затрачивается в сопряжениях ЦПГ. Поэтому величина момента механических потерь на трение является важным параметром при определении эффективности

приработки деталей двигателя.

По экспериментальным данным (Приложение-Н) получены следующие зависимости (рис. 4.11).

Анализируя изменения момента механических потерь на трение, мы видим, что приработка на чистом масле М-8В происходит постепенно и заканчивается на 26 минуте. Приработка на масле М-8В + 2 % ОГМ происходит более интенсивно и заканчивается на 16 минуте. Наибольшее влияние на интенсивность приработки оказывает приработочная композиция М-8-В + 3% ВАРКС. Время стабилизации механических потерь при трении с присадкой ВАРКС равно 10 минутам.



- 1 - Чистое масло М-8-В
- 2 - Масло М-8-В + 2% ОГМ
- - - 3 - Масло М-8-В + 3% ВАРКС

Рисунок 4.11 – Изменение приведенного момента механических потерь на трение двигателей УМЗ – 417 от времени

Значение момента механических потерь на трение с применением приработочной композиции М-8В + 3 % ВАРКС на 6,3 %, а с применением при-садки ОГМ лишь на 4,5 % меньше, чем на чистом масле для двигателя УМЗ-417.

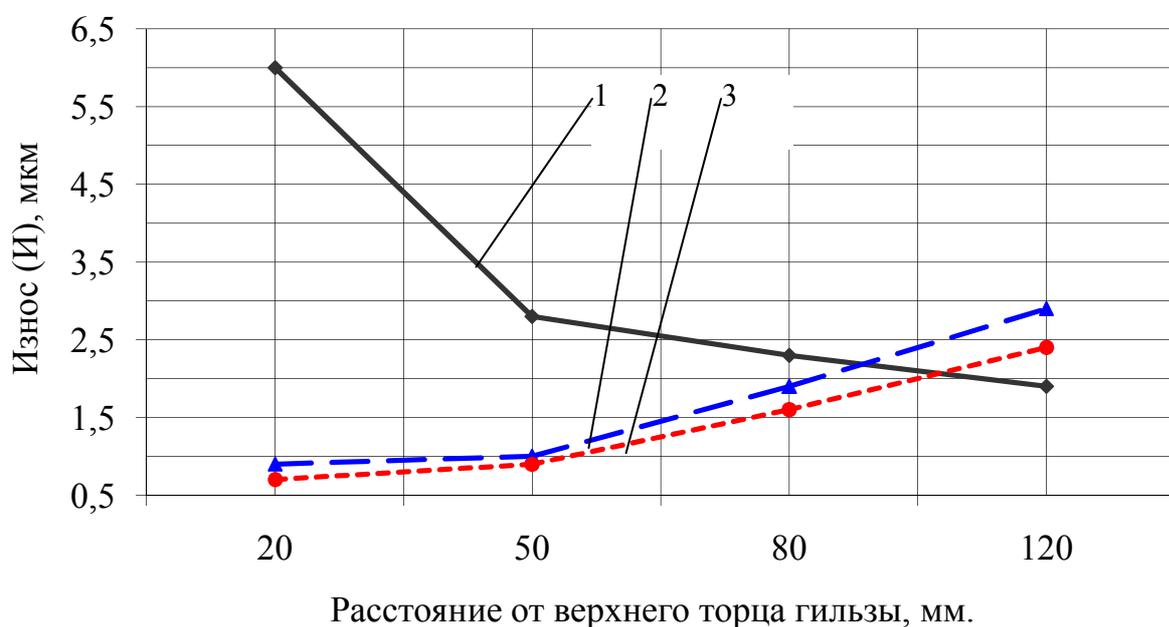
Для определения величины стендового приработочного износа основных деталей двигателей, обкатанных на маслах с присадками, необходимо провести микрометраж гильз цилиндров, поршневых колец,

коленчатого вала, взвешивание вкладышей коленчатого вала и поршневых колец.

По экспериментальным данным (см. приложение-П) получены зависимости износа гильз цилиндров двигателей по высоте на чистом масле М-8-В, на масле М-8-В + 2 % ОГМ, на масле М-8-В + 3 % ВАРКС после типовой 3-х часовой обкатки (рисунок 4.12) и после 35-часовой обкатки (рис. 4.13).

Анализ полученных зависимостей показывает, что после обкатки двигателей на чистом масле по типовой технологии характер износа соответствует классической зависимости износа гильз [55]. После обкатки на маслах с присадками ОГМ и ВАРКС износ в верхней части гильз значительно снижается.

В тоже время износ в нижней части гильз несколько увеличивается, предположительно, так как в эту зону подается большее количество масла и активно действуют поверхностно-активные вещества присадок.



- 1 — Чистое масло М-8-В
- 2 — Масло М-8-В + 2% ОГМ
- 3 — Масло М-8-В + 3% ВАРКС

Рисунок 4.12 – Износ гильз цилиндров двигателя УМЗ-417 за время типовой стендовой обкатки

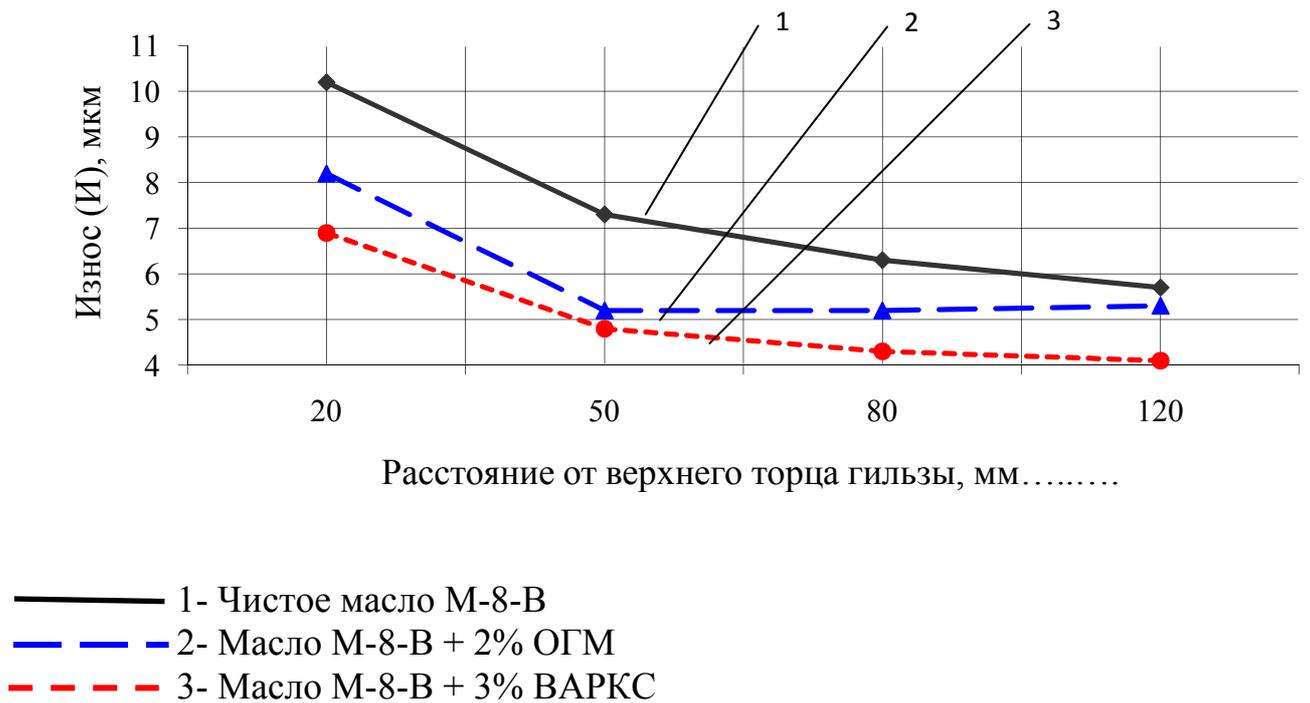


Рисунок 4.13 – Износ гильз цилиндров двигателя УМЗ-417 за время 35-часовой стендовой обкатки

35-часовая обкатка показала, что износ в нижней части, гильз, обкатанных на маслах с присадками, становится меньше, чем гильз после обкатки на чистом масле. Максимальный износ цилиндров при 35-часовой обкатке, на масле М-8-В + 3 % ВАРКС (0,0069 мм), на масле М-8-В + 2 % ОГМ (0,0082 мм) ниже, чем на чистом масле (0,0102 мм) в 1,48 и 1,24 раза соответственно.

Средний износ поршневых колец определяли по зазору в замке колец и взвешиванием (Приложение-Н). Средний износ, определенный по зазору в замке колец после обкатки на масле М-8-В + 3 % ВАРКС в 2,09 раза, на масле М-8-В + 2 % ОГМ в 1,67 раза меньше чем на чистом масле. Средний весовой износ поршневых колец двигателей УМЗ-417 после обкатки на масле М-8-В + 3 % ВАРКС составил 0,0158 г, на масле М-8-В + 2 % ОГМ – 0,0174 г, после обкатки на чистом масле – 0,0314 г, то есть оказался соответственно в 1,98 и 1,8 раза меньше (рис. 4.14).

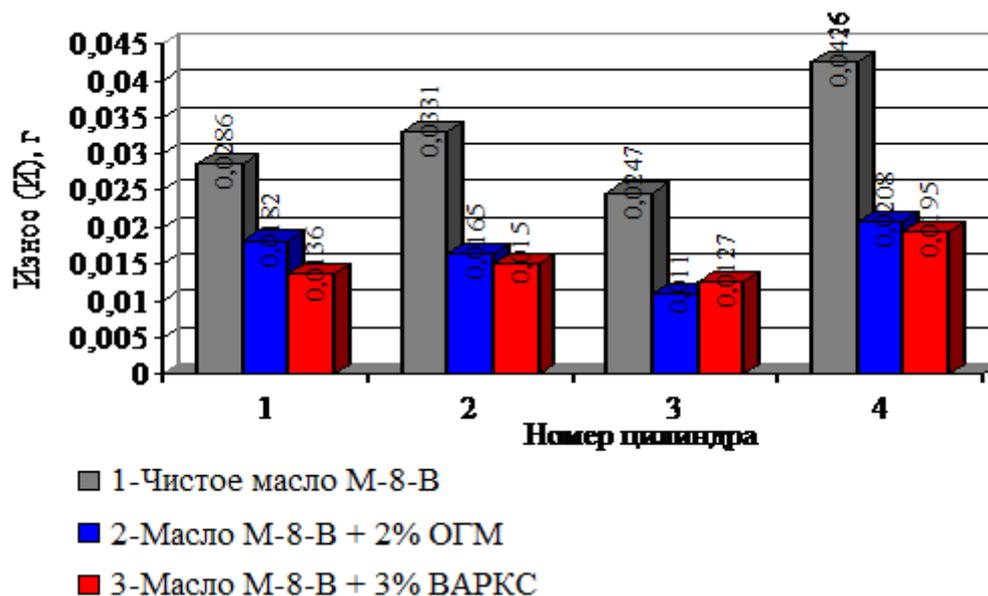


Рисунок 4.14 – Гистограмма среднего износа поршневых колец двигателя УМЗ-417

Средний износ шеек коленчатого вала (Приложение-Р) после обкатки на масле М-8-В + 3 % ВАРКС составил 1 мкм. После обкатки на чистом масле средний износ шатунных шеек коленчатого вала составил 5 мкм, а коренных шеек 2,2 мкм, то есть в 5 раз и 2,2 раза больше соответственно (рис. 4.15).

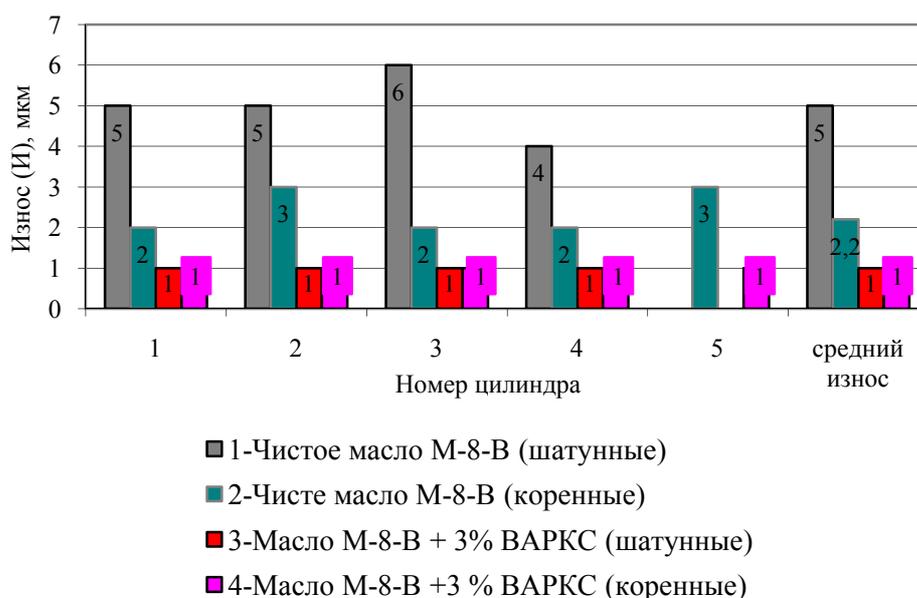


Рисунок 4.15 – Гистограмма среднего износа коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя УМЗ-417

Средний износ коренных и шатунных вкладышей (Приложение-Р) 2,83 раза коленчатого вала двигателей УМЗ-417 обкатанных на масле М-8-В + 3% ВАРКС в меньше по сравнению с обкаткой на чистом масле (рис. 4.16).

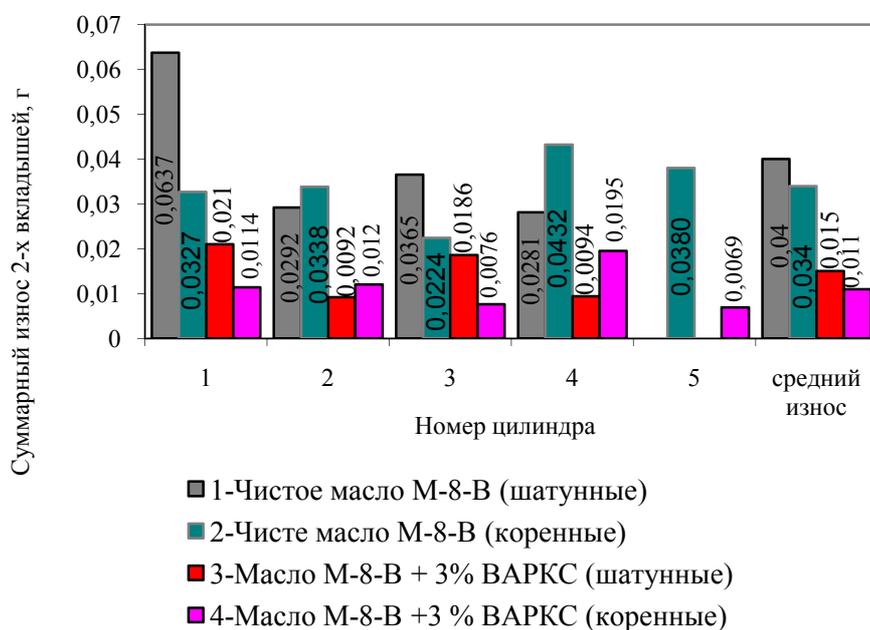


Рисунок 4.16 – Гистограмма среднего износа коренных и шатунных вкладышей коленчатого вала двигателя УМЗ-417

Качество приработанной поверхности вкладышей коленчатого вала оценивали по шероховатости поверхности трения и площади приработки вкладышей. Перед сборкой опытных двигателей УМЗ-417 определяли шероховатость рабочей поверхности коренных и шатунных вкладышей коленчатого вала, которая оказалась равной $R_a = 0,26$ мкм. Общая площадь одной половины коренного вкладыша составляет – 2742 мм^2 , а шатунного – 2751 мм^2 . После обкатки двигатели разбирали и определяли шероховатость и площадь приработки каждой половинки вкладышей. За окончательный результат принимали среднеарифметические значения измерений (рис. 4.17 и 4.18).

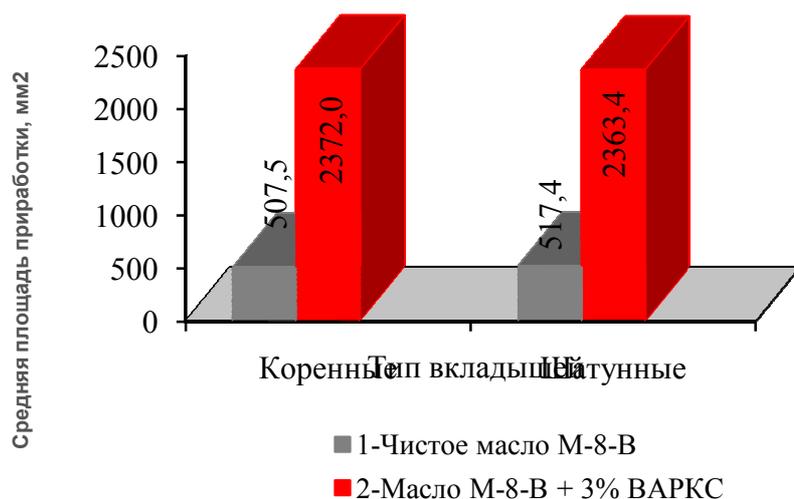


Рисунок 4.17 – Гистограмма средних значений площади приработки вкладышей коленчатого вала двигателя УМЗ-417

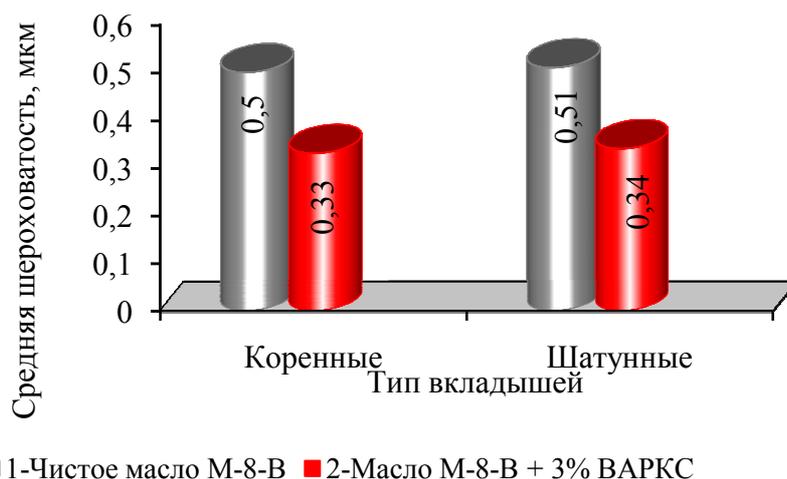


Рисунок 4.18 – Гистограмма средних значений шероховатости вкладышей коленчатого вала двигателя УМЗ-417

Анализируя полученные результаты видим, что после испытаний на чистом масле М-8-В, средние значения шероховатости приработанных поверхностей коренных вкладышей составляют 0,50 мкм, шатунных – 0,51 мкм, а площадь приработки 507,5 мм² и 517,4 мм² соответственно. Добавление в масло 3 % по массе присадки ВАРКС увеличивает площадь приработки коренных вкладышей в 4,7 раза, а шатунных в 4,6 раза. Причем шероховатость вкладышей снижается на 66 % по сравнению с обкаткой на чистом масле и достигает эксплуатационных значений 0,33...0,34 мкм уже

через 30 минут обкатки.

Одним из основных показателей определяемых после обкатки двигателя – является расход топлива. Снижение механических потерь на трение приводит к повышению коэффициента полезного действия двигателя, который выражается в уменьшении расхода топлива. Следовательно, по этому показателю можно судить о степени приработки двигателя.

Основные характеристики двигателя, которые определяют при приемо-сдаточных испытаниях приведены в таблице 4.3.

Вполне естественно, что обкаточные составы, снижающие механические потери на трение, уменьшают расход топлива.

Таблица 4.6 – Основные характеристики обкатки двигателя УМЗ-417

Обкаточное масло	Нагрузка, Р, Н	Частота вращения коленвала, n , мин ⁻¹	Часовой расход топлива, G_T , кг/ч	Эффективная мощность, N_e , кВт	Удельный расход топлива, G_e , кВт·ч
М-8-В	213	2500	10,56	40,0	264
М-8-В +3% ВАРКС	232	2500	10,39	43,5	239

Анализ результатов показывает, что применение в качестве обкаточного состава масла М-8-В + 3 % ВАРКС приводит к уменьшению часового расхода топлива G_T на 1,6 %, удельного расхода топлива g_e на 9,5 %, при увеличении эффективной мощности N_e на 8 % по сравнению с обкаткой на чистом масле.

4.4 Эксплуатационные испытания двигателей

Эксплуатационные испытания проводились в научно-производственной лаборатории Качество и сертификация на кафедре «Технический сервис и ремонт машин» Ульяновской ГСХА [45].

На основании отчетов эксплуатационных испытаний двигателей УМЗ-417 в испытательном комплексе УГК УАЗ, было определено, что пробег автомобилей с новыми двигателями УМЗ-417 составляет 137216 км и после капитального ремонта на АРЗ № 2 – 48678 км, что составляет 35,5% ресурса новых двигателей.

В июне-июле 2003 года были поставлены на эксплуатационные испытания на предприятия Ульяновской области 30 капитально отремонтированных двигателей УМЗ-417, из них 10 двигателей после обкатки по типовой технологии на масле М-8-В, 10 двигателей по ускоренной технологии на масле М-8-В плюс 2 % ОГМ и 10 двигателей по ускоренной технологии на масле М-8-В плюс 3% ВАРКС. Режимы обкатки двигателей представлены в таблицах (Приложения П, Р, С). После обкатки все двигатели прошли контрольные испытания (приемо-сдаточные) согласно техническим требованиям на капитальный ремонт двигателей УМЗ-417. Перед отправкой двигателей на предприятия к ним вместе с паспортом был приложен журнал эксплуатационных испытаний.

Двигатели были установлены на автомобилях УАЗ-3151, 3303, 2262 и их модификациях. Наблюдение за эксплуатацией двигателей и сбор информации о их наработке и техническом состоянии проводили непосредственно в хозяйствах, где эксплуатировались двигатели. Информацию о наработке двигателей брали в бухгалтерии, о техническом состоянии – у водителей и механиков хозяйств.

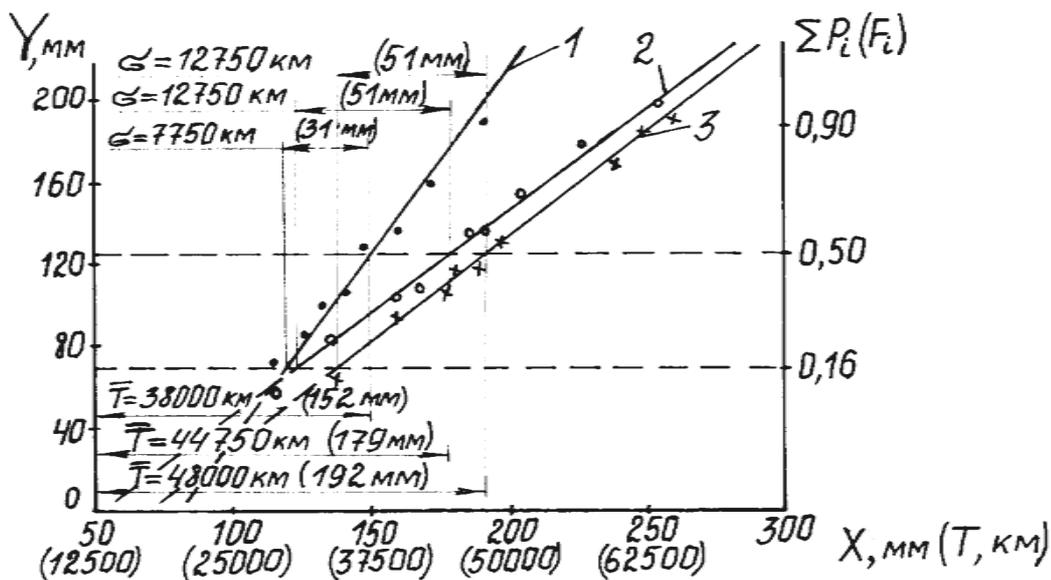
В период испытаний два двигателя, обкатанных по типовой технологии, были сняты с эксплуатации и направлены в ремонт из-за серьезных повреждений блока в результате аварий.

У двигателей, обкатанных по ускоренной технологии с применением масла М-8В плюс 3 % ВАРКС и масла М-8В плюс 2 % ОГМ, серьезных неисправностей не наблюдалось и только два двигателя (по одному из каждой группы) закончили эксплуатационные испытания с пробегом 36193

км и 46916 км из-за выработки ресурса. Данные о наработке двигателей УМЗ-417 по состоянию на 31.07.2004 года приведены в таблице (Приложение С).

Обработку результатов эксплуатационных испытаний проводили согласно методики по формулам (3.24...3.37) с использованием графического и аналитического методов координатных точек для обработки многократно усеченной информации по плану наблюдений NUR, а также критерия Стьюдента при малых выборках статистического ряда.

Вначале составляли сводные таблицы информации в порядке возрастания пробега двигателей за период испытаний. При обработке информации графическим методом координаты опытных точек определяли в миллиметрах и наносили их на обычную миллиметровую бумагу. На рисунках 4.19 и 4.20 представлены интегральные прямые распределения пробегов двигателей УМЗ-417 на 31.07.2004 года.

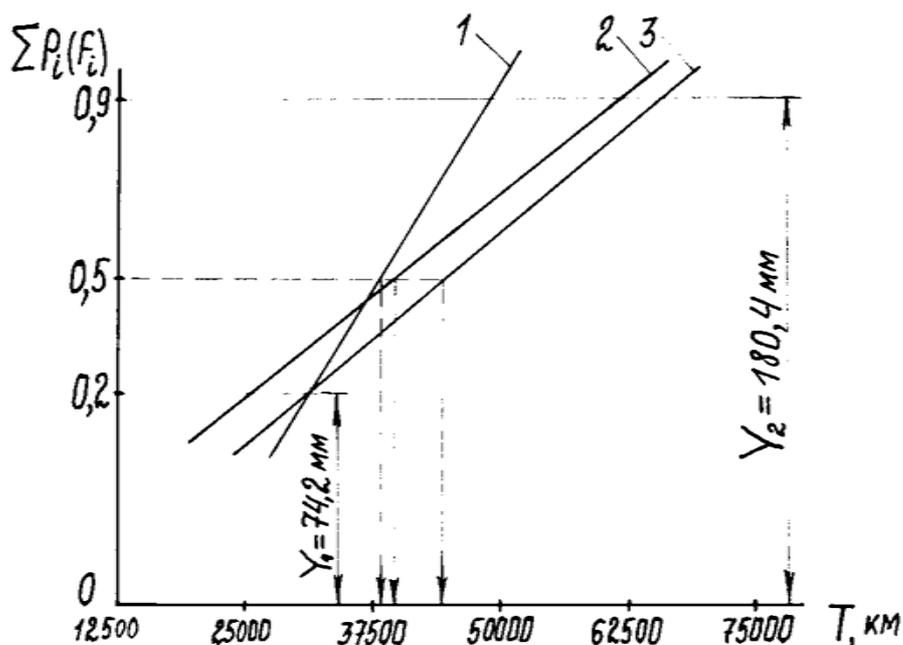


1- наработка двигателей после ремонта, обкатанных по типовой технологии с использованием чистого масла М-8-В;

2 - наработка двигателей после ремонта, обкатанных по ускоренной технологии с применением присадки ОГМ;

3 - наработка двигателей после ремонта, обкатанных по ускоренной технологии с применением присадки ВАРКС.

Рисунок 4.19 – Интегральные прямые распределения пробега двигателя УМЗ-417 (графический метод координатных точек)



- 1- наработка двигателей после ремонта, обкатанных по типовой технологии с использованием чистого масла М-8-В;
- 2 - наработка двигателей после ремонта, обкатанных по ускоренной технологии с применением присадки ОГМ;
- 3 - наработка двигателей после ремонта, обкатанных по ускоренной технологии с применением присадки ВАРКС.

Рисунок 4.20 – Интегральные прямые распределения пробега двигателя УМЗ-417 (аналитический метод двух координатных точек)

Установлено, что пробег двигателей УМЗ-417 подчиняется нормальному закону распределения, так как интегральные прямые данного распределения имеют лучшее совпадение с исходной информацией.

Точность результатов определяли сравнением данных, полученных при обработке их двумя методами. Ошибка при сопоставлении полученных результатов лежит в пределах 1,21 ... 3,49 %.

Анализируя полученные данные, установлено, что капитально отремонтированные двигатели, обкатанные по ускоренной технологии с применением присадок, имели пробег в среднем на масле М-8-В плюс 2 % ОГМ на 14,2 %, а на масле М-8-В плюс 3 % ВАРКС на 22,1 % выше, по сравнению с двигателями, обкатанными по типовой технологии.

В таблице 4.7 представлены результаты обработки данных.

Таблица 4.7 - Данные обработки результатов эксплуатационных испытаний двигателей УМЗ-417 по многократно-усеченной информации

Группа двигателей	Графический метод координатных точек		Аналитический метод 2-х координатных точек		Среднее значение \bar{T} , км	Ошибка при расчетах разными методами, %
	\bar{T} , км	σ , км	\bar{T} , км	σ , км		
Обкатанные по типовой технологии на масле М-8-В	38000	7750	38250	7801	38125	1,21
Обкатанные по ускоренной технологии на масле М-8-В плюс 2 % ОГМ	44750	12750	40000	11397	42375	3,49
Обкатанные по ускоренной технологии на масле М-8-В плюс 3 % ВАРКС	48000	12750	45000	11953	46500	1,88

Определим минимальный экономически оправданный ресурс капитально отремонтированных двигателей из неравенства:

$$\frac{C_n}{T_n} \geq \frac{C_p}{T_p}; \quad T_p \geq \frac{T_n \cdot C_p}{C_n}, \quad (4.1)$$

где C_n – отпускная цена нового двигателя, руб.; C_p – отпускная цена капитально отремонтированного двигателя, руб.; T_n – пробег до капитального ремонта нового двигателя, км; T_p – межремонтный пробег капитально отремонтированного двигателя, км.

Отпускная цена нового двигателя на 01.06.2004 года составляет 27576,09 руб, капитально отремонтированного – 7400 руб. Тогда экономически оправданная наработка двигателей УМЗ-417 составит:

$$T_p \geq \frac{137216 \cdot 7400}{27576,09} = 36822 \text{ км}$$

Наработка капитально отремонтированных двигателей УМЗ-417 выше экономически оправданной: у обкатанных по типовой технологии на 3,4 %, у обкатанных по ускоренной технологии с применением масла М-8В плюс 2% ОГМ на 13,1 %, у обкатанных по ускоренной технологии с применением масла М-8-В плюс 3% ВАРКС на 20,8 %.

Следовательно, применение ускоренной технологии обкатки капитально отремонтированных двигателей с использованием масла М-8В плюс 3 % ВАРКС может дать, за счет повышения ресурса двигателей, значительный экономический эффект по сравнению с обкаткой по типовой технологии и с обкаткой по ускоренной технологии с применением М-8В плюс 2 % ОГМ.

4.5 Общие производственные рекомендации

На основании проведенных лабораторных испытаний капитально отремонтированных двигателей УМЗ-417 было сделано заключение, что наиболее качественная приработка с наименьшими начальными износами и меньшим временем приработки достигается при применении присадки ВАРКС в масло и в воздушно-присадочную смесь, состав которой описан в главе 2.3 диссертации.

Присадка ВАРКС смешивается с моторным маслом М-8-В в количестве 3 % по массе и вводится в картер обкатываемого двигателя, а также специальным устройством подается воздушно-присадочная смесь (предварительно приготовленная) непосредственно в камеру сгорания двигателя.

В соответствии с методиками [55, 113, 114] была определена продолжительность обкатки, число ступеней повышения нагрузки, частота вращения коленчатого вала на каждой ступени и предложены режимы (таблица 4.8) ускоренной обкатки двигателей УМЗ-417 и их модификаций для авторемонтных заводов, районных ремонтно-технических предприятий и хозяйств.

Данный процесс ускоренной обкатки двигателя УМЗ с применением присадки ВАРКС внедрен в производство на Ульяновском авторемонтном заводе № 2 и в ФГУП учхозе Ульяновской ГСХА. Он позволяет сократить время стендовой обкатки в 3,8 раза, эксплуатационной в 4,38 раза.

Таблица 4.8 - Режимы ускоренной обкатки отремонтированных двигателей УМЗ-417 и их модификаций

Этапы обкатки	Нагрузка, Н	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Время, мин	Прирабочный состав
1	2	3	4	5
Холодная	-	700...800	5	Воздушно-присадочная смесь, М-8-В+3% «ВАРКС»
	-	800...1000	5	
Горячая без нагрузки	-	1200	2	М-8-В+3% «ВАРКС»
	-	1600	3	
Горячая под нагрузкой	110	1800	2	М-8-В+3% «ВАРКС»
	120	2100	2	
	140	2300	2	
	170	2500	3	
	190	2800	3	
	200	3000	3	
Всего:			30	

Выводы

1 Сравнительные лабораторные исследования присадки ВАРКС к моторному маслу М-8-В и воздушно-присадочной смеси на машине трения СМТ-1 показали, что применение присадки позволяет снизить момент трения на 12,8 %, на 8,7 %, при скорости изменения момента силы трения на 1,67 Н·м/ч, на 1,13 Н·м/ч, соответственно, по сравнению с чистым маслом, а период стабилизации равен 9 минутам.

2 Температурные испытания показали, что наименьшие значения температуры имеют образцы приработанные на масле с присадкой ВАРКС и в воздушно-присадочной смеси, соответственно 358 К и 360 К. По-видимому,

этому способствуют противоизносные пленки переноса, обладающие большой теплопроводностью и обеспечивающие отвод тепла из зоны трения.

3 Энергия активации поверхностного слоя у образца приработанного на масле с присадкой ВАРКС в 1,65 раза больше, чем у образца приработанного на чистом масле, следовательно повышается ресурс работоспособности деталей.

4 Методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС) на поверхностях трения зафиксированы пленки переноса толщиной до 2 мкм и отмечены такие элементы присутствующие в присадке, как В, Na, а также повышенное содержание N, С.

5 Стендовые испытания двигателей УМЗ-417 показали, что их приработка на масле М-8-В с добавлением 3 % присадки ВАРКС более эффективна по сравнению с обкаткой на чистом масле. О чем свидетельствуют следующие данные:

- время обкатки двигателей сокращается до 30 минут, по сравнению с обкаткой на чистом масле в 3,8 раза;

- увеличивается площадь приработки коренных вкладышей в 4,7 раза, шатунных в 4,6 раза по сравнению с обкаткой на чистом масле;

- снижается шероховатость поверхности вкладышей на 66 % по сравнению с обкаткой на чистом масле и достигает эксплуатационных значений 0,33...0,34 мкм уже через 30 минут обкатки;

- эффективная мощность двигателя УМЗ-417, обкатанного на масле с присадкой ВАРКС, увеличилась на 8 %, при уменьшении удельного расхода топлива на 9,5% по сравнению с двигателем обкатанном на чистом масле.

6 Эксплуатационные испытания показали, что среднее значение пробега капитально отремонтированных и обкатанных по ускоренной технологии двигателей УМЗ-417 при использовании присадки ВАРКС – 46500 км, что выше пробега двигателей, обкатанных по типовой технологии на 18 %.

7 Значение минимального экономически оправданного пробега капитально отремонтированных двигателей УМЗ-417 до следующего ремонта составляет 36822 км. Пробег отремонтированных двигателей УМЗ-

417 обкатанных по ускоренной технологии с применением присадки ВАРКС, выше экономически оправданного на 20,8 %, следовательно, за счет повышения ресурса двигателей можно достигнуть значительного экономического эффекта по сравнению с обкаткой по типовой технологии.

8 Технологический процесс ускоренной обкатки отремонтированных двигателей УМЗ-417, с применением присадки ВАРКС к маслу, внедрен в производство на Ульяновском авторемонтном заводе № 2 и в ФГУП учхозе Ульяновской ГСХА, позволяющий сократить время стендовой обкатки в 3,8 раза, эксплуатационной в 4,38 раза по сравнению с типовой обкаткой.

5 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

5.1 Расчет экономического эффекта от внедрения процесса ускоренной обкатки двигателей с использованием приработочной присадки

Расчет экономической эффективности приведен на примере внедрения технического процесса ускоренной обкатки двигателей УМЗ-417 на Ульяновском авторемонтном заводе №2.

Расчет сравнительного экономического эффекта (\mathcal{E}_c), по состоянию на 2004 год, от применения ускоренной обкатки определяем по формуле:

$$\mathcal{E}_c = \mathcal{E}_{T2} - \mathcal{E}_{T1}, \quad (5.1)$$

где \mathcal{E}_{T1} – экономический эффект от применения обкатки по типовой технологии на масле М-8-В, руб.; \mathcal{E}_{T2} – по ускоренной технологии на масле М-8-В плюс 3 % ВАРКС.

Экономический эффект [120] от применения типовой (\mathcal{E}_{T1}) и ускоренной (\mathcal{E}_{T2}) технологий обкатки за расчетный период определяется по формулам:

$$\mathcal{E}_{T1} = P_{T1} - Z_{T1}; \quad \mathcal{E}_{T2} = P_{T2} - Z_{T2}, \quad (5.2)$$

где P_{T1} ; P_{T2} – стоимостная оценка результатов обкатки двигателей за расчетный период, руб.; Z_{T1} , Z_{T2} – стоимостная оценка затрат на осуществление обкатки двигателей за расчетный период.

Стоимостную оценку результатов обкатки [123] определяем по формулам:

$$P_{Ti} = \sum_{t=t_n}^{t_k} W_{Ti} \cdot C_{Ti} \cdot \alpha_{Ti} \cdot K_{Иi}, \quad (5.3)$$

где W_{Ti} – программа ремонта двигателей, шт.; C_{Ti} – отпускная цена двигателя, руб.; α_{Ti} – коэффициенты приведения одновременных затрат и результатов к расчетному году; $K_{Иi}$ – коэффициенты учитывающие инфляцию по годам расчетного периода; t_n – начальный год расчетного периода (2004 г.); t_k – конечный год расчетного периода (2007 г.).

Величина $K_{Иi}$ определяется за каждый год расчетного периода. В расчетах, при самых благоприятных условиях, можно принять для стран с

переходной экономикой [120,123] $K_{и}^{2004} = 0,15$; $K_{и}^{2005} = 0,25$; $K_{и}^{2006} = 0,35$; $K_{и}^{2007} = 0,45$.

Значение коэффициента приведения разновременных затрат и результатов определяется по формуле:

$$\alpha_T = \frac{1}{(1 + E_H)^{t_p - t}} \quad (5.4)$$

где E_H – норматив приведения разновременных затрат и результатов, $E_H = 0,1$; t – расчетный год; t_p – год, затраты и результаты которого приводятся к расчетному году.

Значения α_T равны, согласно [123], соответственно по годам внедрения: 1,0000; 0,9091; 0,8265; 0,7513.

Стоимостную оценку затрат на осуществление обкатки двигателей по типовой (1) и ускоренной (2) технологии определяем по формуле:

$$З_{Ti} = \sum (W_{Ti} \cdot C_{Bi} + Kt_i - Lt_i) \cdot \alpha_{Ti} \cdot K_{иi} \quad (5.5)$$

где C_{Bi} – себестоимость восстановления двигателя, руб.; Kt_i – единовременные затраты или капитальные вложения при ремонте в году (t) после внедрения мероприятий, руб.; Lt_i – ликвидационное сальдо (остаточная стоимость) основных фондов, выбывших в году (t), после внедрения мероприятий.

Себестоимость восстановления двигателя определяли по формуле:

$$C_{Bi} = C_{Pi} + C_{Oi} \quad (5.6)$$

где C_{Pi} – себестоимость ремонта двигателя, руб.; C_{Oi} – себестоимость обкатки двигателя, руб.

Себестоимость обкатки двигателя по типовой (1) и ускоренной (2) технологии определяли по формуле:

$$C_{Oi} = ЗП_i + И_{Эли} + И_{Ми} + И_{Ti} + ОПУ_i \quad (5.7)$$

где $ЗП_i$ – затраты на заработную плату рабочим-обкатчикам, руб.; $И_{Эли}$ – затраты на электроэнергию, руб.; $И_{Ми}$ – затраты на приработочное масло, руб.; $И_{Ti}$ – затраты на топливо, руб.; $ОПУ_i$ – затраты, связанные с организацией и управлением производством, руб.

Затраты на заработную плату обкатчика определяли по формуле:

$$ЗП_i = ЗП_{Oi} + ЗП_{Ди} + Н_{Фот} \quad (5.8)$$

где $ЗП_{Оi}$ – основная заработная плата, руб; $ЗП_{Дi}$ – дополнительная заработная плата, руб; $Н_{ФОТ}$ – налоги, которые выплачивает ремонтное предприятие из фонда оплаты труда, руб.

Основную заработную плату определяли по формуле:

$$ЗП_{Оi} = T_i \cdot C_{\text{ЧАС}} \cdot K_T , \quad (5.9)$$

где T_i – трудоемкость обкатки, чел.-ч; $C_{\text{ЧАС}}$ – часовая тарифная ставка обкатчика, руб; K_T – коэффициент, учитывающий доплату к основной заработной плате за сверхурочные и другие работы ($K_T = 1,02 \dots 1,03$).

Дополнительную заработную плату определяли из выражения:

$$ЗП_{Дi} = (5 \dots 15) \% \cdot ЗП_{Оi} , \quad (5.10)$$

Фонд оплаты труда (ФОТ) определяли по формуле:

$$ФОТ_i = ЗП_{Оi} + ЗП_{Дi} , \quad (5.11)$$

Налоги, которые выплачивает ремонтное предприятие из фонда оплаты труда, определяли по формуле:

$$Н_{ФОТ} = П_{\Phi} + ФСС + ОМС + СВНС , \quad (5.12)$$

где $П_{\Phi}$ – отчисления в пенсионный фонд ($П_{\Phi} = 28 \%$ от ФОТ), руб; $ФСС$ – отчисления в фонд социального страхования ($ФСС = 4 \%$ от ФОТ), руб; $ОМС$ – отчисления в фонд обязательного медицинского страхования ($ОМС = 3,6 \%$ от ФОТ), руб; $СВНС$ – страховые взносы от несчастных случаев на производстве ($СВНС = 1 \dots 3 \%$ от ФОТ), руб.

Затраты на электроэнергию определяли из выражения:

$$И_{Элi} = N \cdot C_{Эл} \cdot T_X \cdot \eta , \quad (5.13)$$

где N – мощность электродвигателя стенда, ($N = 55$ кВт); $C_{Эл}$ – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб; T_X – трудоемкость холодной обкатки двигателя, чел.·ч; η – коэффициент загрузки тормозного стенда.

Затраты на приработочное масло определяли по формуле:

$$И_{Мi} = C_{Мi} \cdot Y , \quad (5.14)$$

где $C_{М1}$ – стоимость 1 кг моторного масла и масла М-8-В, руб; $C_{М2}$ – стоимость 1 кг моторного масла с присадкой ВАРКС, руб; Y – нормативный расход масла на обкатку двигателя, кг.

Стоимость 1 кг моторного масла М-8-В с присадкой ВАРКС определяли из выражения:

$$C_{M2} = C_{M1} + \Pi \cdot C_{ПР2} , \quad (5.15)$$

где Π – коэффициент, учитывающий содержание присадки в масле, $\Pi = 0,03$; $C_{ПР2}$ – стоимость 1 кг присадки ВАРКС, руб.

Затраты на топливо определяли по формуле:

$$И_{Ti} = \frac{N_e \cdot g_e \cdot T_{Ti} \cdot C_T \cdot K_3}{1000} , \quad (5.16)$$

где N_e – эффективная мощность двигателя, кВт; g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч; C_T – стоимость 1 кг топлива, руб; K_3 – коэффициент использования мощности двигателя, $K_3 = 0,6$.

Затраты на организацию и управление производством [123] определяли по формуле:

$$ОПУ_i = (280...460) \% \cdot \Phi O T_i , \quad (5.17)$$

Согласно приведенной методике расчета, используя данные (таблицы 5.2) проводили расчет экономической эффективности от сокращения времени стендовой обкатки и повышения ресурса двигателя.

Учитывая, что двигатели в эксплуатации обкатывают в течение 30...40 часов на пониженных на 25 % скоростях и нагрузках, а после стендовой ускоренной обкатки время эксплуатационной обкатки сокращается, экономический эффект за расчетный период определяли по формуле:

$$\mathcal{E}_\mathcal{E} = \sum_{t=t_n}^{t_k} W_{Ti} \cdot C_K \cdot \left(\frac{\Pi_1 - \Pi_2}{100} \right) \cdot (B_1 - B_2) \cdot \alpha_{Ti} \cdot K_{иi} , \quad (5.18)$$

где C_K – нормативная себестоимость 1 ч работы автомобиля, руб; $\Pi_{1,2}$ – процент работы выполняемой автомобилем с двигателем, соответственно после обкатки и во время обкатки в условиях эксплуатации, %; $B_{1,2}$ – время эксплуатационной обкатки двигателя соответственно после типовой и ускоренной обкатки, ч.

Исходные данные и результаты расчета экономической эффективности от сокращения времени стендовой обкатки представлены в таблицах (5.1, 5.2, 5.3).

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета экономического эффекта

Наименование показателей	Условные обозначения	Единицы измерения	Обкатка	
			Типовая	Ускоренная с использованием присадки ВАРКС
Время стендовой обкатки	T	ч	1,92	0,50
Время холодной обкатки	T _х	ч	0,42	0,17
Время горячей обкатки	T _г	ч	1,50	0,33
Эффективная мощность двигателя УМЗ-417	N _е	кВт	66	66
Удельный расход топлива двигателя УМЗ-417	G _е	г/кВт·ч	286	286
Нормативный расход моторного масла на обкатку одного двигателя	У	кг	5,2	5,2
Расход присадки на обкатку	У ₁	кг	-	0,03
Стоимость 1 кг присадки к маслу	С _{пр}	руб	-	102,5
Стоимость 1 кг масла М-8-В	С _{м1}	руб	19,5	19,5
Стоимость 1 кг бензина А-76	С _т	руб	8,0	8,0
Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии	С _{эл}	руб	1,63	1,63
Часовая тарифная ставка обкатчика 5-го разряда	С _{час}	руб	8,25	8,25
Нормативная стоимость 1 часа работы автомобиля	С _к	руб	183,46	183,46
Программа ремонта двигателей	W _{т1}	шт	600	600
Отпускная цена отремонтированного двигателя УМЗ-417	Ц _{т1}	руб	7400	7400

Таблица 5.2 – Себестоимость восстановления двигателя УМЗ-417

Себестоимость , руб	Условные обозначения	Обкатка	
		Типовая	Ускоренная с использованием присадки ВАРКС
Себестоимость обкатки по видам затрат:			
- на электроэнергию	И _{ЭЛ}	27,6	7,01
- на топливо	И _Т	133,3	29,9
- на заработную плату	ЗП	42,5	11,1
- на моторное масло	И _М	140,4	140,4
- на присадку	И _П	-	30,0
- прочие расходы	ОПУ	42,32	11,01
Всего:	С _О	386,12	229,42
Себестоимость ремонта	С _Р	6254,74	6254,74
Общая себестоимость ремонта двигателя	С _В	6640,86	6484,16

Таблица 5.3 – Результаты расчетов экономической эффективности

Наименование показателей	Условные обозначения	Единицы изме- рения	Обкатка	
			Типовая	Ускоренная с использованием присадки ВАРКС
Стоимостная оценка результатов труда	Р _Т	руб.	4460579	4460579
Стоимостная оценка затрат	З _Т	руб.	3518402	3459146
Экономический эффект	Э _Т	руб.	942177	1001433
Сравнительный эконо- мический эффект с типовой обкаткой	Э _С	руб.	-	59256
Экономия от сокра- щения эксплуата- ционной обкатки	Э _Э	руб.	-	621347,4
Общий экономичес- кий эффект	Э	руб.	-	680603,4

Выводы

Внедрение технологического процесса ускоренной обкатки двигателей марки УМЗ-417 и их модификаций с применением 3 % присадки ВАРКС дает экономию топлива в 3,8 раза, повышает производительность работы автомобилей по сравнению с типовым процессом обкатки на стандартных маслах М-8В.

Расчетный экономический эффект от внедрения данного технологического процесса (на примере обкатки двигателей УМЗ-417 на Ульяновском авторемонтном заводе № 2) за расчетный период 2004-2007 г.г. по состоянию на 01.06.2004 года составил 680603,4 рубля по сравнению с использованием типового процесса обкатки.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1 На основании анализа используемых присадок для приработки деталей двигателей после ремонта определено перспективное применение комплексных присадок, содержащих поверхностно-активные и химически активные вещества.

2 Теоретически выявлено и практически подтверждено, что предложенная присадка комплексного действия ВАРКС (патент № 2002100775/04) взаимодействует с трущимися поверхностями в два этапа: при холодной обкатке поверхностно-активные вещества за счет адсорбированных молекул образуют пленку переноса, что приводит к интенсификации времени приработки; при горячей обкатке с повышением температуры вступают во взаимодействие химически активные вещества, которые в процессе хемосорбции насыщают поверхностную структуру деталей, образуют жаропрочную и износостойкую пленку и тем самым увеличивают ресурс работы деталей и двигателя.

3 Предложено, для улучшения качества распыла воздушно-присадочной смеси в камеру сгорания двигателя, в устройстве заменить конус с гладкой поверхностью на спираль с фасонной поверхностью, а также соединение выпускного коллектора с емкостью для присадки, позволяет использовать устройство, как при режимах холодной обкатки, так и при режимах горячей обкатки.

4 Установлено при проведении сравнительных лабораторных исследований, что энергия активации поверхностного слоя у образца, приработанного на масле с присадкой комплексного действия ВАРКС в 1,65 раза больше, чем у образца приработанного на масле М-8В без присадки. Применение присадки ВАРКС позволяет снизить момент трения на 12,8 %, при скорости изменения момента силы трения 1,67 Н·м/ч, по сравнению с чистым маслом М-8-В.

5 Выявлено, что пленка переноса, образовавшаяся на поверхностях трения деталей, имеет относительное содержание бора, углерода и углеводов, а также натрия в поверхностных областях образца, в 3...5 раз превышающее относительное содержание этих элементов и их соединений в поверхностях деталей до приработки. Методами растровой электронной микроскопии и вторично-ионной масс-спектрометрии на поверхностях трения зафиксирована пленка переноса до 2 мкм и отмечены такие элементы присутствующие в присадке, как В, Na, а также повышенное содержание N, С, в результате чего изменяется структура и свойства трущихся деталей (уменьшается износ).

6 Определено, что при стендовых испытаниях двигателей УМЗ-417 применение присадки комплексного действия ВАРКС позволяет: снизить шероховатость поверхности вкладышей на 66 % по сравнению с обкаткой на чистом масле и достигает эксплуатационных значений 0,33...0,34 мкм уже через 30 минут обкатки; сократить время обкатки по сравнению с обкаткой на чистом масле М-8В в 3,8 раза; повысить эффективную мощность двигателя УМЗ-417, обкатанного на масле с присадкой ВАРКС на 8%, при уменьшении удельного расхода топлива на 9,5% по сравнению с двигателем, обкатанным на чистом масле.

7 Определен экономический эффект от внедрения технологического процесса ускоренной обкатки (на примере обкатки двигателей УМЗ-417 на АРЗ № 2 г. Ульяновска) за расчетный период 2004-2007 гг. составил 680603,4 руб.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Носихин, П.И. Повышение качества и ускорение обкатки отремонтированных дизелей на основе современных достижений трибологии: Автореф. дис ... доктора техн. наук. – М., 1997. – 34 с.
2. Старосельский, А.А. Долговечность трущихся деталей машин / Под ред. А.А.Старосельский, Д.Н.Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1967. – 395 с.
3. Школьников, В.М. Масла и составы против износа автомобилей / В.М.Школьников, Ю.Н.Шехтер и др. – М.: Химия, 1988. – 96 с.
4. Проников, А.С. Надежность машин. – М.: Машиностроение, 1979. – 591с.
5. Григорьев, М.А. Отечественный и зарубежный опыт повышения надежности и долговечности автомобильных двигателей / Под ред. М.А.Григорьев, В.А.Далецкий. – М.: НИИавтопром, 1973. – 177 с.
6. Шаронов, Г.П. Ускоренная приработка автотракторных двигателей / Г.П. Шаронов. – Саратов, 1983. – 25 с.
7. Кацилграс, Г.А. Особенности сборки и приработки капитально отремонтированных двигателей / Г.А. Кацилграс. – М.: Росвузиздат, 1963. – 28 с.
8. Григорьев, М.А. Износ и долговечность автомобильных двигателей / М.А. Григорьев, Н.Н. Пономарев.– М.: Машиностроение, 1976. – 248 с.
9. Халфин, М.А. Определение межремонтных сроков машин в сельском хозяйстве / М.А. Халфин. - М.: Колос, 1969. – 239 с.
10. Маслов, Н.Н. Эффективность и качество ремонта автомобилей / Н.Н. Маслов. – М.: Транспорт, 1981. – 304 с.
11. Маслов, Н.Н. Исследование влияния режимов технологических процессов на качество ремонта машин / Н.Н. Маслов. – Л.: ВАТТ, 1968. – 272с.
12. Шаронов, Г.П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей / Г.П. Шаронов. – Л.: Химия, 1965. – 223 с.

13. Справочник по триботехнике. В 3 т. Т.1. Теоретические основы / под общ. ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1990, - 480 с.
14. Гаркунов, Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков. – М.: Транспорт, 1969. – 104 с.
15. Носихин, П.И. Повышение качества и ускорение обкатки капитально отремонтированных дизелей в условиях ремонтных предприятий Агропрома: Дис ... канд. техн. наук: П.И. Носихин. – М., 1990. – 166 с.
16. Ахматов, А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. - 472 с.
17. Браун, Э.Д. Моделирование трения и изнашивания в машинах / Э.Д. Браун, Ю.А. Евдокимов, А.В. Чичинадзе. – М.: Машиностроение, 1982. – 191с.
18. Костецкий, Б.И. Механо-химические процессы при граничном трении / Б.И. Костецкий, М.Э. Натансон, Л.И. Бершадский. – М.: Наука, 1972. – 170с.
19. Стрельцов, В.В. Ускорение приработки деталей во время стендовой обкатки отремонтированных двигателей внутреннего сгорания (на примере ЗМЗ-53 и ЗИЛ-130): Дис ... доктора техн. наук: В.В. Стрельцов. – М., 1993. – 619 с.
20. Авдеев, М.В. Технология ремонта машин и оборудования / М.В. Авдеев, Е.Л. Воловик, И.Е. Ульман. – М.: Агропромиздат, 1986. – 247 с.
21. Шаронов, Г.П. Влияние приработки на межремонтный срок службы тракторного двигателя / Г.П. Шаронов, В.С. Сухоруков // Тракторы и сельхозмашины. – 1975. - № 4. - с.48-51.
22. Лихтман, В.Н. Физико-химическая механика металлов / В.Н. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер. – М.: ВНИИСТ, 1982. – 303 с.
23. Маслов, Н.Н. Влияние режимов приработки двигателей на начальные износы их деталей / Н.Н. Маслов, Б.Г. Богданов // Повышение износостойкости деталей ДВС. – М.: Машиностроение, 1972. – с.78-84.

24. Селиванов, А.И. Теоретические основы ремонта и надежности сельскохозяйственной техники / А.И. Селиванов, Ю.Н. Артемьев – М.: Колос, 1978. – 248 с.
25. Кагарманов, М.А. Методы диагностирования шатунных подшипников дизелей сельскохозяйственного назначения: Дисс ... канд. техн. наук: М.А. Кагарманов. – М., 1984. – 191 с.
26. Кацилграс, Г.А. Особенности сборки и приработки капитально отремонтированных двигателей / Г.А. Кацилграс. – М.: Росвузиздат, 1963. – 27 с.
27. Кошкин, Т.К. Технологические основы авторемонтного производства: Дисс доктора техн. наук: Т.К. Кошкин. – М., 1967. – 481 с.
28. Бурумкулов, Ф.Х. Долговечность прирабатываемых восстановленных сопряжений / Ф.Х. Бурумкулов, С.А. Поляков // Обеспечение надежности отремонтированной сельскохозяйственной техники. – Саранск:, 1985. – с.27-33.
29. Маликов, И.И. Повышение износостойкости деталей машин модифицированием поверхностей трения твердыми смазками: Дисс ... доктора техн. наук: И.И. Маликов. – Могилев, 1988. – 463 с.
30. Халфин, М.А. Определение межремонтных сроков машин в сельском хозяйстве / М.А. Халфин. - М.: Колос, 1969. – 239 с.
31. Воинов, Н.П. Подбор смазочных масел для обкатки двигателей и механизмов/ Н.П. Воинов. – М.: Гостоптехиздат, 1950. – 85 с.
32. Гурвич, И.Б. Долговечность автомобильных двигателей / И.Б. Гуревич. – М.: Машиностроение, 1967. – 103 с.
33. Казарцев, В.И. Ремонт машин / В.И. Казарцев. – М.: Сельхозиздат, 1981,-583с.
34. Кемпбел, Р.Б. Сера, как смазочный материал для сверхвысоких давлений / Р.Б. Кемпбел // Международная конференция по смазке и износу машин. – М.: Машгиз, 1962. – с.474-480.

35. Шаронов, Г.П. Ускоренная полная приработка тракторных и автомобильных двигателей: Проблемная лекция. – Саратов, 1982. – 18 с.
36. Арабян, С.Г. Влияние качества приработки на эксплуатационные показатели тракторных дизелей. – Тр. НАТИ / С.Г.Арабян, И.А.Холомонов, М.М. Яковишина. – М., 1978. – Вып.258. – с. 22-27.
37. Воинов, Н.П. Выбор оптимальных условий обкатки двигателей /Н.П. Воинов. – М.: МДНТП, 1955. – 32 с.
38. Вороницын, И.С. Исследование структуры поверхностного слоя металла в сопряженных парах трения при применении металлоплакирующих смазок // Избирательный перенос при трении и его экономическая эффективность. – М., 1972. - с. 143-150.
39. Владимиров, В.А. Обкатка судовых дизелей / В.А. Владимиров, А.Е. Гриншпун. – М.: Транспорт, 1982. – 285 с.
40. Гаенко, Л.М. Приработка и испытание автомобильных двигателей / Л.М. Гаенко. – М.: Транспорт, 1967. – 66 с.
41. Гуревич, А.С. Обкатка дизелей Д-37 / А.С. Гуревич, С.Г. Попова // Тракторы и сельхозмашины. – 1972.- № 3. – с.12 – 15.
42. Долбин, В.В. Экспериментальное исследование режимов ускоренной приработки гильзопоршневой группы двигателя / В.В. Долбин, В.В. Клевакин // Труды Т.27 Свердл. с.-х. ин-та. – Свердловск, - с.63 – 79.
43. Заренбин, В.Г. Исследование режимов приработки автомобильных двигателей при капитальном ремонте / В.Г. Заренбин, А.Х. Касумов.– М.:Транспорт,1983.–73с.
44. Карасик, И.Н. Прирабатываемость, закономерности и методы оценки влияния приработки и изнашивания на триботехнические характеристики опор скольжения: Дисс ... доктора техн. наук: И.Н. Карасик. – М., 1983. – 450с.
45. Карпенко, М.А. Интенсификация процесса приработки двигателей УМЗ применением присадок в масло с поверхностно-активными и химически-активными веществами: Дисс ... канд. техн. наук: М.А. Карпенко. – Пенза, 2002. – 171 с.

46. Кривенко, П.М. Сокращение продолжительности приработки двигателей / П.М. Кривенко // Автомобильный транспорт. –1973. -№ 5. – с.30-32.
47. Кугель, Р.В. Испытания на надежность машин и их элементов / Р.В. Кугель. – М.: Машиностроение, 1982. – 181 с.
48. Маслов, Н.Н. Качество ремонта автомобилей. – М.: Транспорт, 1975. – 363 с.
49. Мухин, Е.М. Приработка и испытание автомобильных двигателей / Е.М. Мухин, Н.И. Столяров. – М.: Транспорт, 1981. – 265 с.
50. Некрасов, С.С. Послеремонтная обкатка двигателя / С.С. Некрасов, В.В. Стрельцов, П.И. Носихин // Агропромышленный комплекс России. - 1989. -№ 1. – с. 38 –39.
51. Нигаматов, М.Х. Ускоренная обкатка двигателя после ремонта / М.Х. Нигаматов. – М.: Колос, 1984. – 79 с.
52. Носихин, П.И. Повышение качества и ускорения обкатки отремонтированных дизелей на основе современных достижений трибологии: Автореф. дис. ... доктора техн. наук / П.И. Носихин. – М., 1997. – 34 с.
53. Савченко, Н.З. Теоретические и экспериментальные основы процесса приработки сопряженных деталей двигателей внутреннего сгорания: Дисс ... доктора техн. наук: Н.З. Савченко. – Киев, 1971. – 457 с.
54. Ребиндер, П.Я. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Изб. Труды. –М.: Наука, 1979. – 381 с.
55. Стрельцов, В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков. – М.: Колос, 1995. –175 с.
56. Храмцов, Н.В. Совершенствование технической обкатки автотракторных двигателей / Н.В. Храмцов, А.Е. Королев.– Тюмень, 1989. – 12 с.

57. Цыпцын, В.И. Повышение долговечности отремонтированных дизелей совершенствованием технологии приработки и применением упрочняющих покрытий: Дисс ... доктора техн. наук: В.И. Цыпцына. – М., 1991. – 485 с.
58. Шаронов, Г.П. Исследование ускоренной приработки автотракторных двигателей: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Г.П. Шаронов. Л., 1967. – 34 с.
59. Непрелов, С.С. Приработка деталей при обкатке двигателя / С.С. Непрелов, В.Ф. Карпенков, В.В. Стрельцов и др. // Механизация и электрификация. – 1996. - № 4. – с.18-20.
60. Ермолов, Л.С. Основы надежности сельскохозяйственной техники / Л.С. Ермолов, В.М. Кряжков, В.Е. Черкун. – М.: Колос, 1982. – 271 с.
61. Лезин, П.П. Формирование надежности сельскохозяйственной техники при ее ремонте / П.П. Лезин. - Изд-во Саратовского университета, 1987. – 168 с.
62. Аскинази, Б.М. Упрочнение и восстановление деталей машин электро-механической обработкой / Б.М. Аскинази – М.: Машиностроение, 1989. – 200 с.
63. Электроалмазное хонингование гильз цилиндров двигателей / В.Ф. Карпенков, В.Н. Попов, В.В. Стрельцов, Л.Г. Баграмов. – Пушино: МГАУ, 1996. – 170 с.
64. Bouden F.P. Friktion – An Introdution to Tribology / F.P. Bouden, D. Tabor.– London, Heinemann, 1973. – 128 p.
65. Чихов, Х.А. Системный анализ в трибонике / Х.А. Чихов. – М.: Изд-во Мир, 1982. – 351 с.
66. Campbel W.E. Boundary lubrication,in:Boundary Lubrication, Ling F.E., Klaus E.E., Fein R.S. (Eds), ASME, N.Y., 1969. – p. 87.
67. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. –2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.
68. О механизме приработочного действия трибополимеробразующих присадок к маслам / Р.Н. Заславский, Ю.С. Заславский, Э.М. Васильева и др. – Доклады АН СССР, -1980, -Т. 2, № 4. - с. 863-865.

69. Виноградова, И.Э. Физические методы исследования противозадирных присадок к маслам / В кн.: Методы оценки противозадирных и противоизносных свойств смазочных материалов. – М.: Наука, 1969. – 230 с.
70. Виноградова, И.Э. Противоизносные присадки к маслам / И.Э. Виноградова. – М.:Химия, 1972. – 272с.
71. Репников, А.В. Ремонт промышленных и сельскохозяйственных тракторов с использованием новых методов и средств: Тезисы докладов.– Челябинск, 1981. – с. 115-120.
72. Носихин, П.И. Применение обкаточного масла ОМД-8 для ускоренной обкатки капитально отремонтированных двигателей ЯМЗ-240Б / П.И. Носихин. –М.:ЦНТИПР, 1988.– 65 с.
73. Виппер, А.Б. Зарубежные масла и присадки / А.Б. Виппер, А.В. Виленкин, Д.А. Гайснер. – М.: Химия, 1981. – 192 с.
74. Литвинов, В.Н. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В.Н. Литвинов, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин. – М.: Наука, 1979. – 188 с.
75. Анатольев, А.А. и др. Результаты предварительных испытаний моторного масла дизелей с присадкой на основе коллоидного графита // Тез. докл. науч.- техн. конф. – Челябинск, 1989. – с.164-169.
76. Громаковский, Д.Г. Многоцелевая антифрикционная противоизносная присадка «Стойкость» / Д.Г. Громаковский. – Самара, 1994. – 48 с.
77. Пугина, Л.Н. Дисульфид молибдена его свойства и применение / Л.Н. Пугина. – Киев: Наукова думка, 1968. – 186 с.
78. Сентюрихина, Л.Н. Твердые дисульфидмолибденовые смазки / Л.Н. Сентюрихина, Е.М. Опарина. – М.: Химия, 1966. – 193 с.
79. Холомонов, И.А. Исследование и подбор эффективных обкаточных присадок для ускорения приработки тракторных двигателей: Дисс ... канд. техн. наук: И.А. Холомонов. – М.: НАТИ, 1973. – 194 с.

80. Облеухова, О.И. Об эффективности присадки « Моликот» / О.И. Облеухова, В.Н. Протасов // Автомобильный транспорт. – 1962. - № 2. – с. 5-8.

81. Цыпцын, В.И. Повышение долговечности отремонтированных дизелей мобильных сельскохозяйственных машин путем совершенствования технологии приработки и применения упрочняющих покрытий деталей: Дисс ... доктора техн. наук: В.И. Цыпцына. – М., 1991. 445 с.

82. Сафонов, В.В. Повышение качества стендовой приработки тракторных двигателей путем совершенствования очистки масла на ремонтных предприятиях агропрома: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: /В.В. Сафонов – Саратов, 1988.–21с.

83. Цыпцын, В.И. Исследование влияния присадок к маслу и топливу на ускорение приработки и повышение износостойкости деталей тракторного дизельного двигателя: Дисс...канд. техн. наук: В.И. Цыпцын–Саратов, 1976.–233с.

84. Варнаков, В.В. Технический сервис машин сельскохозяйственного назначения / В.В. Варнаков, В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков – М.: Колос, 2000. – 256 с.

85. Малаев, В.С. Ускоренная обкаткадвигателей ЗМЗ-53 / В.С. Малаев, Н.В. Храмцов, Э.М. Дерягина, М.Г. Воронков.// Техника в сельском хозяйстве. – 1982. - № 3. – с. 53-54.

86. Радин, Ю.А. Безызность деталей машин при трении / Ю.А. Радин, П.Г. Суслов. – Л.: Машиностроение, 1989. – 229 с.

87. Гаркунов, Д.Н. Триботехника / Д.Н. Гаркунов. – М.: Машиностроение, 1986. – 424 с.

88. Долговечность трущихся деталей машин: Сб. науч. статей. Вып. 4 / Под общ. ред. Д.Н. Гаркунова. – М.: Машиностроение, 1990. 350 с.

89. Карпенков, В.Ф. Ускоренная обкатка карбюраторных двигателей / В.Ф.Карпенков, В.Н.Попов, В.В.Стрельцов // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. – 1996. - № 7. – с. 15-17.

90. Повышение эффективности обкатки отремонтированных двигателей / В.В. Стрельцов, В.Ф. Карпенков, В.Н. Попов, В.Н. Еремин // Механизация и электрофикация сельского хозяйства. – 1996. - № 2. – с. 18-20.
91. Артемов, В.В. Исследование эксплуатационных свойств моторных масел при приработке двигателей вооружения и военной техники: Дисс ... канд. техн. наук: 20.02.19 В.В. Артемов. – Ульяновск, 2003.–128с.
92. Карпенко, М.А. Интенсификация процесса приработки двигателей УМЗ применением присадок в масло с ПАВ и ХАВ: Автореф. Дис....канд. тех. Наук: / М.А. Карпенко.-Пенза, 2002.– 18 с.
93. Храмцов, Н.В. Надежность отремонтированных автотракторных двигателей / Н.В. Храмцов.– М.: Росагропромиздат, 1989. – 159 с.
94. Носихин, П.И. Повышение качества и ускорение обкатки капитально отремонтированных дизелей в условиях ремонтных предприятий агропрома: Дисс ... канд. техн. наук. – М., 1990. – 336 с.
95. Хохлов, А.Л. Исследования присадок при обкатке двигателей с введением в воздух на впуске./ А.Л. Хохлов, М.А. Карпенко, В.В. Варнаков// Инновационные технологии в аграрном образовании, науке и технике и АПК России: Материалы Всероссийской науч.-произ. конф., май 2003. – Ульяновск: УГСХА, 2003. с. 359-361.
96. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
97. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. – М.: Машиностроение, 1984. – 280 с.
98. Белый, А.В. Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев / А.В. Белый, Г.Д. Прокопенко, Н.К. Мышкин. – М.: Машиностроение, 1991. – 208 с.
99. Коттрелл, А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах / А.Х. Коттрелл. – М.: Металлургиздат, 1958. – 267 с.
100. Ребиндер, П.Я. Физико-химические основы явлений износа трущихся поверхностей и смазки при высоких давлениях: 1-я Всесоюзная конференция

по трению и износу в машинах / П.Я. Ребиндер, Н.Н. Петрова. – М.: Изд-во АН СССР, 1939. – Т. 1. – 380 с.

101. Ребиндер, П.Я. Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика: Изб. Труды. – М.: Наука, 1979. – 381 с.

102. Rigney D.A., Chen L.H., Naylor M.G.S., Spesivsev A.A. In Proc. Of the 1986. Int. Powder Metallurgy Conf. and Exhibition «The Future of Powder Metallurgy». – Dusseldorf, 1986. p. 835-838.

103. Rigney D.A., Don Y. Wear, 1985, Vol. 105, № 1, - p. 63-75.

104. Регель, В.Р. Кинетическая теория прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.

105. Хохлов, А.Л. Формирование пленок переноса при обкатке двигателей с применением приработочной присадки «Варкс» / А.Л. Хохлов // Вестник УГСХА № 11, серия «Механизация сельского хозяйства» 2004, Ульяновск: УГСХА, – с. 127-130.

106. Костецкий, Б.И. Качество поверхности и трение в машинах / Б.И. Костецкий, Н.Ф. Колесниченко. – Киев: Техника, 1969. – 216 с.

107. Авторское свидетельство 1638338 А1 СССР. Устройство для подачи приработочной присадки в камеру сгорания двигателя внутреннего сгорания / С.С. Некрасов, П.И. Носихин, В.В. Стрельцов; Московский ин-т инженеров сельскохозяйственного производства им. В.П. Горячкина – № 1317835; Опубл. 1973; Бюл. № 12.

108. Варнаков, В.В. Совершенствование устройства для качественного распыления приработочной присадки/ В.В. Варнаков, А.Л. Хохлов, А.Н. Еремеев// Вестник УГСХА № 11, серия «Механизация сельского хозяйства» 2004, Ульяновск: УГСХА, 2004. – с. 130-134.

109. Зажинаев, Л.С. Методы планирования и обработки результатов / Л.С. Зажинаев, А.Д. Кишьян. – Л.: 1971. – 230 с.

110. Мельников, С.В. Планирование эксперимента в исследованиях сельско-хозяйственных процессов / С.В. Мельников, В.Р. Алешин, П.М. Роцин. – Л.: Колос, 1980. – 38 с.

111. Методика выбора и оптимизация контролируемых параметров технологических процессов. Методические указания. РДМУ 109-77. – М.: Издательство стандартов, 1978. – 64 с.
112. Адлер, Ю.П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий/ Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1976. – 279 с.
113. Левитин, М.А. Разработка основ теории оптимизации трибосопряжений как многоцелевых систем (на примере трибосистем с возрастающей износостойкостью): Дисс ... д-ра техн. наук: М.А. Левитин.–Ташкент, 1987. 393 с.
114. Машина для испытаний материалов на трение и износ. Заводское обозначение 2070 МСТ-1: Инструкция по эксплуатации. Союзточмашприбор. – Завод испытательных приборов. – Иваново, 1987. – 38 с.
115. Патент РФ № 2166745. Способ оценки энергии активации разрушения материала поверхностного слоя, деформированного трением / Д.Г. Громаковский, Е.В. Беленький, И.Д. Ибатуллин и др. – Заявл. 28.05.1997; Оpubл. 10.05.2001. – Бюл.№ 3. – 6 с.
116. Рубоц, Д.А. Система питания автомобильных карбюраторных двигателей / Д.А. Рубоц, О.К. Шухов. – М.: Транспорт, 1974. – с. 18...22.
117. Степанов, М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний / М.Н. Степанов. – М.: Машиностроение, 1985. – 395 с.
118. Хохлов, А.Л. Результаты трибологических испытаний поверхностей трения с применением присадки ВАРКС/ А.Л. Хохлов, В.В. Варнаков// Основы достижения устойчивого развития сельского хозяйства: Материалы Международной науч.-практ. конф. 02-04 февраля 2004. – Волгоград: ВГСХА, 2004. – с. 186-189.
119. Применение метода поверхностной активации при исследовании эксплуатационных свойств компрессорных масел / И.Н. Гарбар, А.Г.

Маруфенко, Е.С. Погорелов и др. – химическое и нефтяное машиностроение, 1978, № 10, с. 41-42.

120. Варнаков, В.В. Оценка энергии активации разрушения поверхностного слоя образованного при применении присадок при обкатке двигателей/ В.В. Варнаков, А.Л. Хохлов // Основы достижения устойчивого развития сельского хозяйства: Материалы Международ. науч.-практ. конф. 02-04 февраля 2004. – Волгоград: ВГСХА, 2004. – с. 162-164.

121. Конкин, Ю.А. Экономическое обоснование внедрения мероприятий научно-технического прогресса в АПК: Методические рекомендации и примеры расчета./Ю.А. Конаин, А.Ф. Пацкалева и др.- М.: МИИСП, 1991.- с. 11...71.

122. Руководство по капитальному ремонту двигателей УМЗ-417, УМЗ-421 и их модификаций. – М.: Транспорт, 1998. – 196 с.

123. Осинов, В.И. Оценка экономической эффективности внедрения мероприятий по совершенствованию менеджмента на предприятии: Материалы лекций по дисциплине: «Менеджмент в АПК». – М.: МГАУ, 1998. – 49 с.

Приложение А

Программа расчета теоретических значений

CLS

```
DIM x (21), y (21), a (21,21)
```

```
FOR i=1 TO 21
```

```
INPUT x (i)
```

```
NEXT i
```

```
FOR i=1 TO 21
```

```
INPUT y (i)
```

```
NEXT i
```

```
DIM sx (21), sxy (21)
```

```
GOSUB koeff
```

```
n = 18
```

```
m = 20
```

```
GOSUB resh
```

```
GOSUB koeff
```

```
n = 19
```

```
m = 20
```

```
GOSUB resh
```

```
END
```

resh:

```
FOR i=1 TO n
```

```
d = a (i, i)
```

```
FOR j=1 TO m
```

```
a (i, j) = a (i, j) / d
```

```
NEXT j
```

```
FOR k=1 TO n
```

```
d = a (k, i)
```

```
FOR j=1 TO m
```

```
IF k <> i THEN a (k, j) = a (k, j) - a (i, j) * d
```

```
NEXT j
```

```
NEXT k
```

```
NEXT i
```

```
PRINT 'N='; n - 1; 'Yn';
```

```
FOR i=1 TO n
```

```
PRINT USING '#####.##### * x ^ #'; a (i, 9); i - 1;
```

```
IF i < n THEN PRINT "+";
```

```
NEXT i
```

```
PRINT
```

```
RETURN
```

Продолжение Приложения А

```
koeff :  
FOR i = 0 TO 21  
sx (i) = 0  
NEXT i  
FOR i = 0 TO 18  
sxy (i) = 0  
NEXT i  
FOR i = 0 TO 21  
FOR j = 1 TO 21  
sx (i) = sx (i) + x (j) ^ i  
NEXT j  
NEXT i  
FOR i = 0 TO 18  
FOR j = 1 TO 21  
sxy (i) = sxy (i) + y (j) * x (j) ^ i  
NEXT j  
NEXT i  
FOR i = 0 TO 19  
FOR j = 1 TO 19  
a (i, j) = sx (i + j - 2)  
NEXT j  
a (i, 20) = sxy (i - 1)  
NEXT i  
RETURN
```

Приложение Б

Средние значения основных показателей приработки ($n=500 \text{ мин}^{-1}$; $P=600 \text{ Н}$; $t=15 \text{ мин}$)

Минуты	Состав № 1			Состав № 2			Состав № 3			Состав № 4			Состав № 5		
	Мг, Н·м	Тк, К	Тм, К												
1	1,95	332	333	1,95	328	333	1,95	315	293	1,95	315	293	1,95	317	293
2	1,95	334	333	1,93	330	333	1,90	320	303	1,92	320	303	1,93	321	304
3	1,95	335	334	1,90	332	333	1,85	325	310	1,88	325	311	1,92	325	314
4	1,95	336	335	1,88	334	334	1,83	328	315	1,86	328	316	1,90	328	318
5	1,95	337	336	1,85	336	335	1,80	331	318	1,84	331	320	1,88	330	321
6	1,93	338	337	1,85	338	336	1,78	333	333	1,83	334	324	1,85	332	325
7	1,90	339	338	1,85	339	337	1,75	335	334	1,80	337	327	1,82	334	328
8	1,88	340	339	1,85	340	338	1,73	337	335	1,78	339	330	1,80	335	331
9	1,85	341	340	1,85	341	339	1,70	338	336	1,75	341	333	1,78	336	332
10	1,85	342	341	1,83	342	340	1,70	338	336	1,75	341	336	1,78	336	333
11	1,85	343	342	1,80	343	341	1,70	338	337	1,75	341	338	1,78	336	334
12	1,88	344	343	1,80	343	342	1,70	338	337	1,75	341	339	1,78	336	335
13	1,90	345	344	1,80	343	343	1,70	338	338	1,75	341	340	1,78	336	335
14	1,90	345	345	1,80	343	343	1,70	338	338	1,75	341	341	1,78	336	336
15	1,90	345	345	1,80	343	343	1,70	338	338	1,75	341	341	1,78	336	336

Состав № 1 – чистое масло М-8-В (температура 333 К)

Состав № 2 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 333 К)

Состав № 3 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 293 К – 5 мин. И 333 К – 10 мин)

Состав № 4 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 293 К)

Состав № 5 – бензин А-76 плюс присадка ВАРКС – 3% (температура 293 К)

Приложение В

Средние значения основных показателей приработки ($n=500 \text{ мин}^{-1}$; $P=780 \text{ Н}$; $t=60 \text{ мин}$)

Минуты	Состав № 1			Состав № 2			Состав № 4			Состав № 5		
	М _г , Н·м	Т _к , К	Т _м , К	М _г , Н·м	Т _к , К	Т _м , К	М _г , Н·м	Т _к , К	Т _м , К	М _г , Н·м	Т _к , К	Т _м , К
1	1,95	332	333	1,95	327	333	1,95	322	293	1,95	320	293
5	1,95	353	338	1,90	347	336	1,90	340	320	1,93	330	325
10	1,90	363	342	1,85	350	338	1,85	344	326	1,88	337	332
15	1,95	368	348	1,85	353	340	1,80	346	332	1,83	341	336
20	2,00	375	351	1,90	354	342	1,83	348	333	1,85	343	339
25	2,10	381	357	1,95	356	344	1,85	350	334	1,88	347	341
30	2,20	386	362	2,00	357	346	1,88	352	335	1,91	350	343
35	2,30	389	366	2,05	358	347	1,90	353	336	1,94	353	348
40	2,40	392	369	2,10	359	348	1,93	354	337	1,97	355	345
45	2,40	394	372	2,15	360	349	1,95	355	338	2,00	357	346
50	2,45	397	373	2,20	361	349	1,98	356	339	2,02	359	347
55	2,50	399	374	2,25	362	350	2,00	357	340	2,03	360	348
60	2,55	400	375	2,25	363	350	2,00	358	341	2,04	361	349

Состав № 1 – чистое масло М-8-В (температура 333 К)

Состав № 2 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 333 К)

Состав № 4 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 293 К)

Состав № 5 – бензин А-76 плюс присадка ВАРКС – 3% (температура 293 К)

Приложение Г

Средние значения основных показателей приработки

(n=500 мин⁻¹; P=1274 Н; t=30 мин)

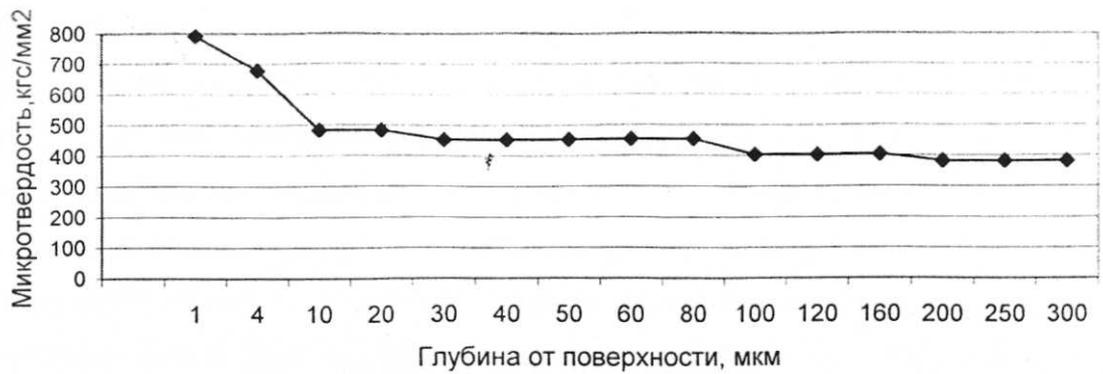
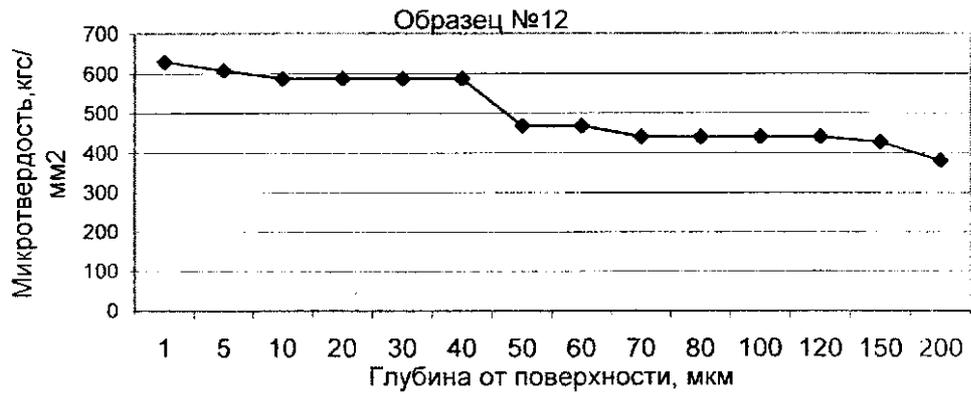
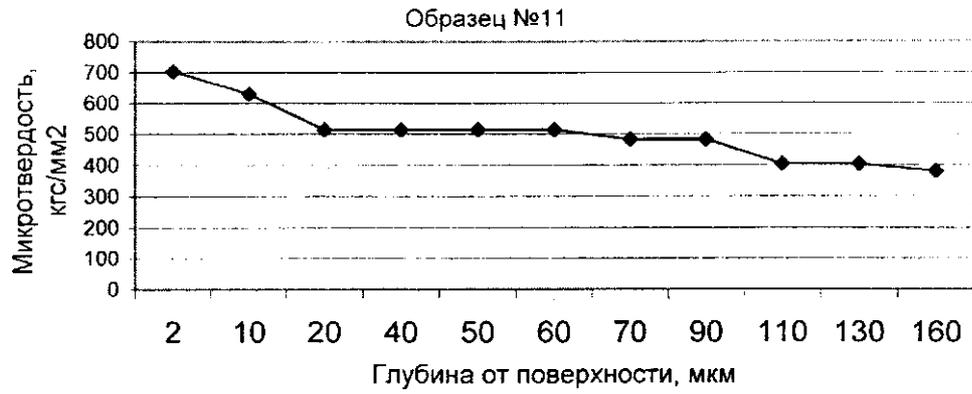
Минуты	Состав № 1			Состав № 2			Состав № 4		
	М _т , Н·м	Т _к , К	Т _м , К	М _т , Н·м	Т _к , К	Т _м , К	М _т , Н·м	Т _к , К	Т _м , К
1	2,85	354	333	2,65	344	333	2,70	332	293
2	2,73	363	337	2,53	351	335	2,50	353	329
3	2,65	366	340	2,45	353	338	2,40	360	338
4	2,63	369	345	2,40	356	341	2,35	364	344
5	2,60	371	347	2,37	358	344	2,32	366	348
6	2,60	373	348	2,35	360	347	2,32	369	349
7	2,62	375	349	2,35	362	348	2,32	371	351
8	2,80	378	351	2,35	364	349	2,32	372	354
9	2,90	380	354	2,35	365	350	2,32	373	357
10	3,00	388	367	2,35	367	352	2,35	374	358
15	3,50	400	395	2,40	373	358	2,37	376	359
20	-	-	-	2,45	383	364	2,40	378	361
25	-	-	-	2,50	387	367	2,42	380	363
30	-	-	-	2,52	391	370	2,45	382	365

Состав № 1 – чистое масло М-8-В (температура 333 К)

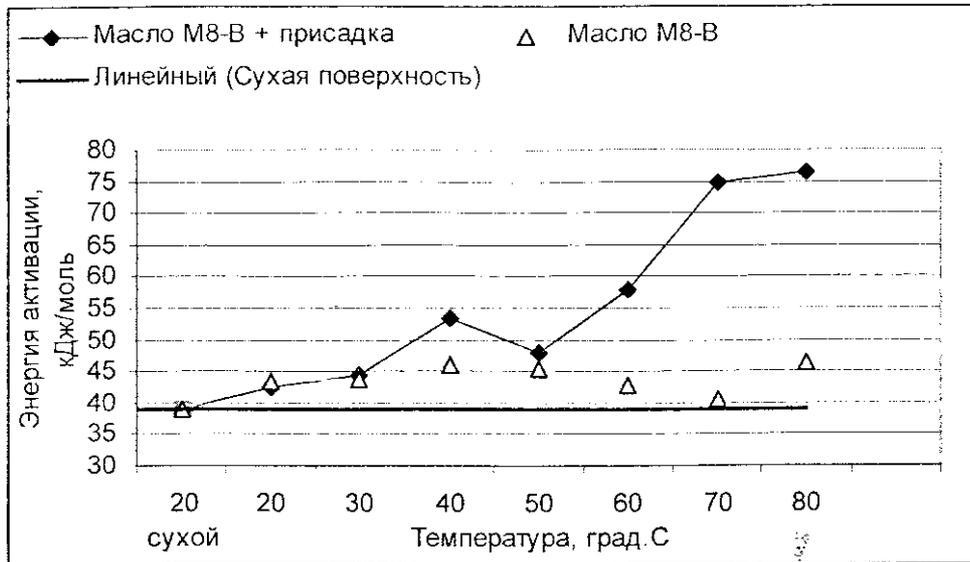
Состав № 2 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 333 К)

Состав № 4 – масло М-8-В плюс присадка ВАРКС-3% (температура 293 К)

Приложение Д



Продолжение приложения Д



Приложение Е

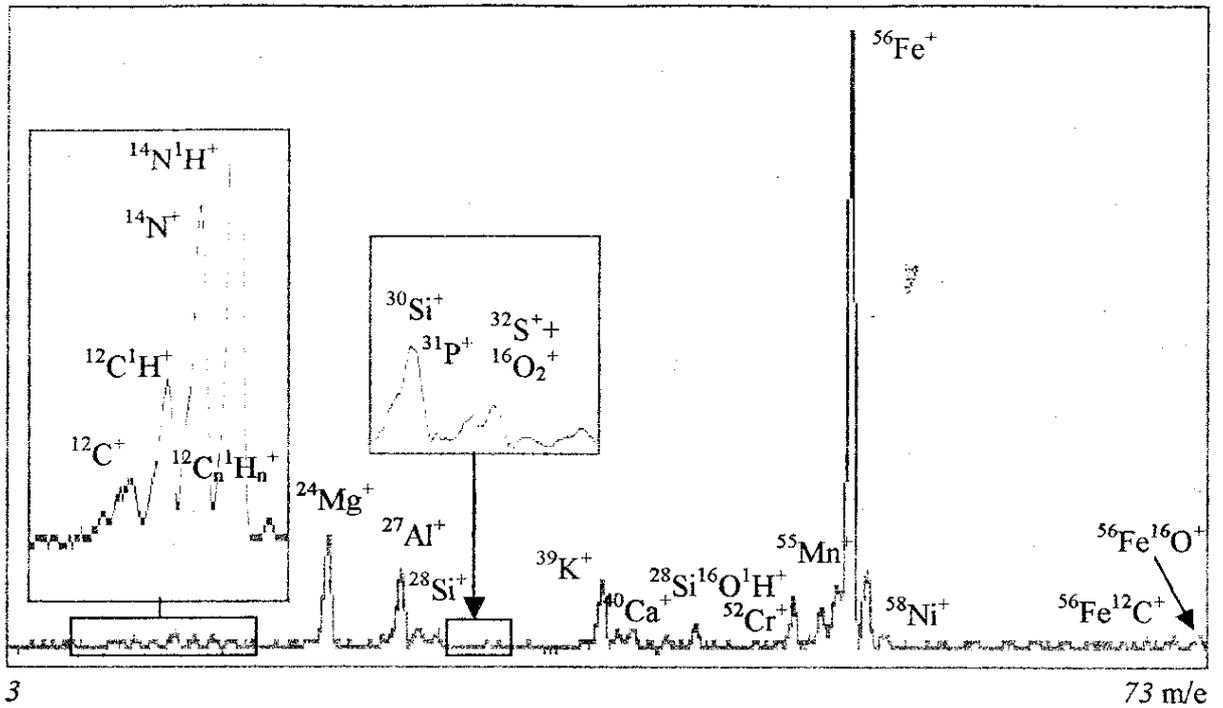


Рис.2а Масс-спектр поверхности эталона ("ролик")

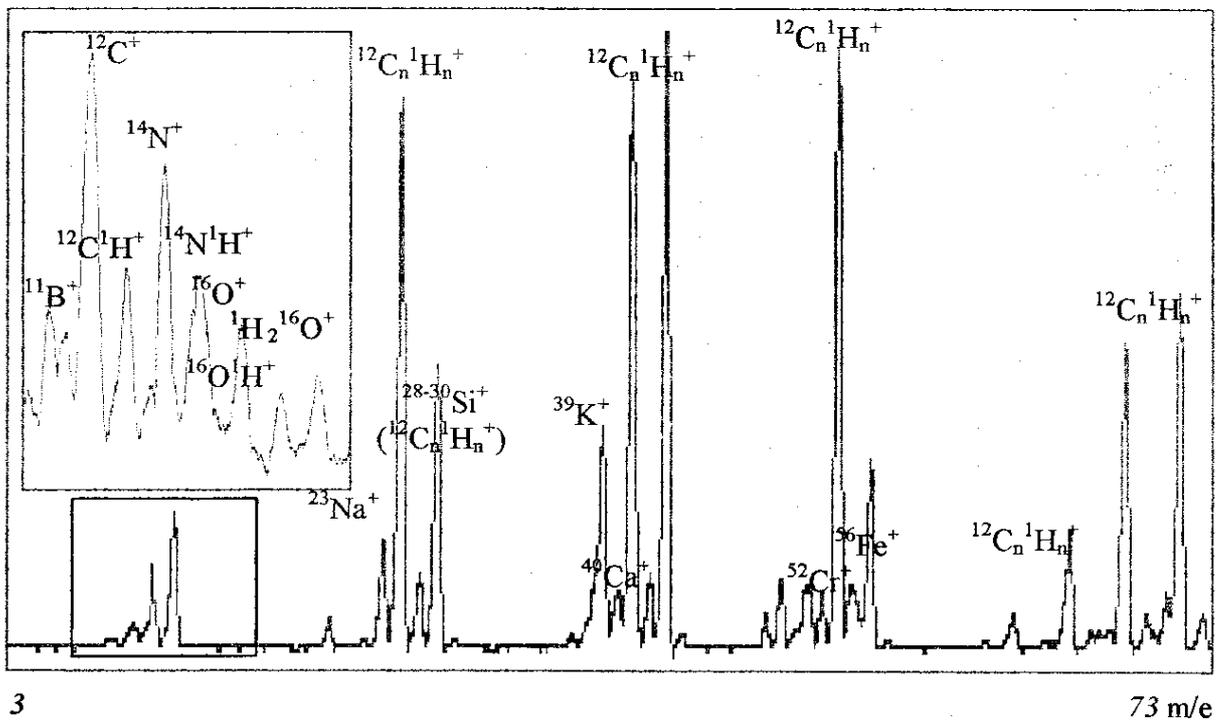


Рис.2б Масс-спектр поверхности образца ("ролик")

Продолжение приложения Е

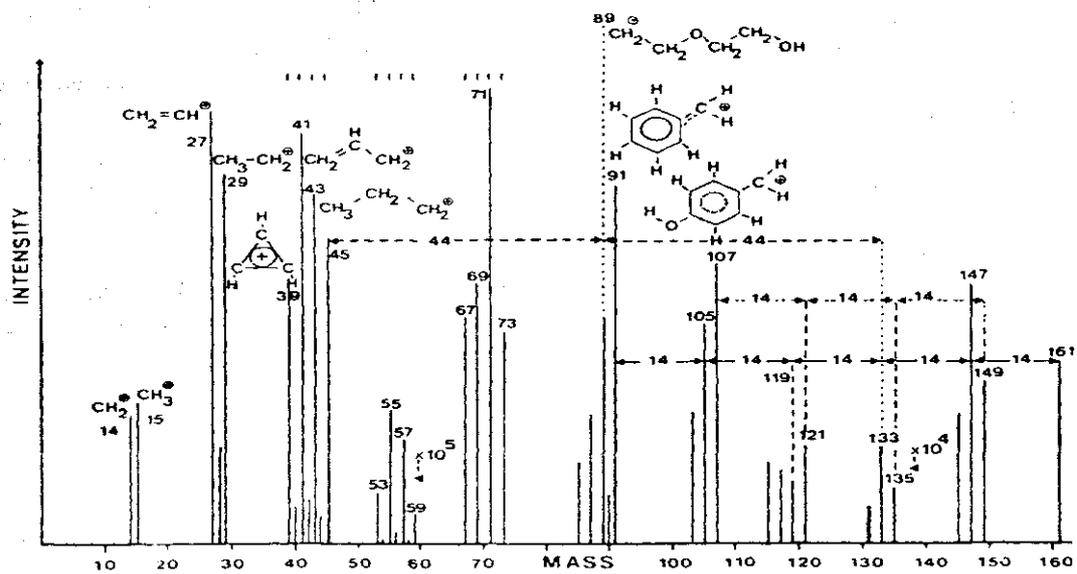
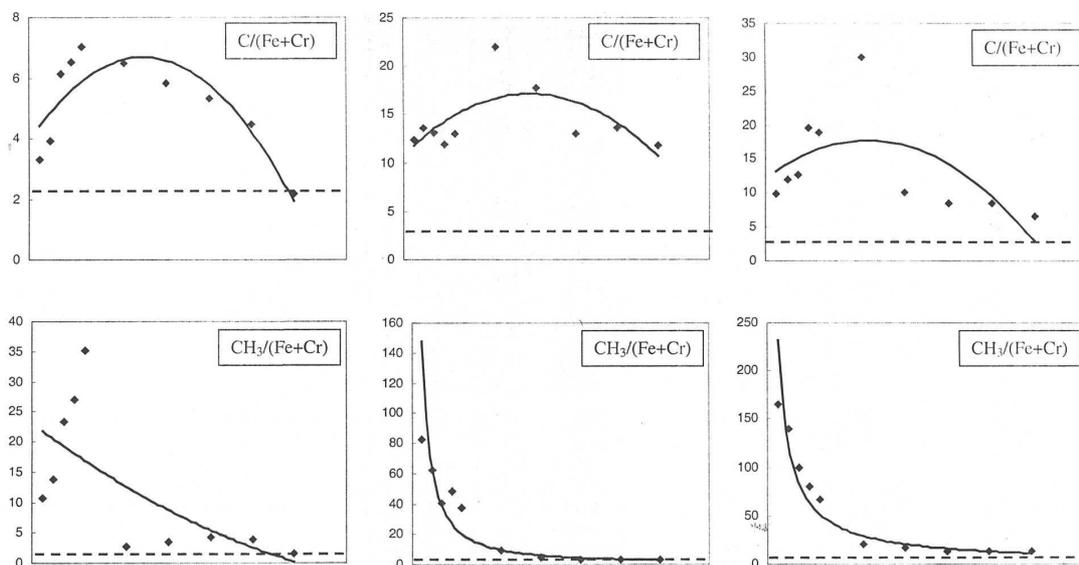


Рис. 3. Масс-спектр эфира сложного состава из примера, приведённого в раб

Продолжение приложения Е



Продолжение приложения Е

Исследование структуры и элементного состава поверхности фрагментов чугунных подшипников методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС)

Методами РЭМ и ВИМС исследовались фрагменты чугунных подшипников в виде частей шайбы с сечением примерно 10x10 мм. По предварительной информации основным материалом подшипников являлся легированный (хромом и никелем) чугун, на поверхности трения которого могли находиться следы присадки, состоящей из олеиновой кислоты, тетрабората этилендиаммония, октадецисульфата натрия и моторного масла М-8-В (как основного компонента присадки).

Образцы

От каждого из фрагментов шайб (подшипники с маркировкой 6 рисок, 2 риски и “ролик”) были отпилены по два образца (образец и эталон) в виде прямоугольных параллелепипедов с размерами примерно 10x3x3 мм. Методом ВИМС исследовался элементный состав одной из граней образцов, которая являлась фрагментом поверхности трения, и элементный состав одной из граней эталонов не являющейся поверхностью трения.

Методика исследования

Метод РЭМ использовался для исследования поверхности образцов в исходном состоянии. Образцы загружались в вакуумную камеру электронного микроскопа (РЭМ-101). Поверхность трения осматривалась при различных увеличениях и в дальнейшем характерные участки этой поверхности фотографировались.

Исследования элементного (изотопного) состава поверхности образца и эталона проводились на вторично-ионном масс-спектрометре - ионном зонде МС7202М. В качестве первичных ионов использовались ионы Ag^+ с энергией 10 кэВ. Ток пучка первичных ионов составлял 0,1 мкА, выбранный диаметр пучка - примерно 20 мкм. Качественный анализ состава поверхностных слоёв образцов и эталонов проводился в областях размером 1,0x1,0 мм и 0,5x0,5 мм на их поверхности (ионный зонд разворачивался в сначала растр 1,0x1,0 мм, затем на том же месте сворачивался в растр 0,5x0,5 мм). Записывались участки масс-спектра положительных ионов, содержащие масс-пики с отношением массы к заряду от 1 до 75 (регистрировались элементы и кластеры от 1H до $^{58}Fe^{16}O^1H$). Запись спектров проводилась в течение определённого времени, что позволяло оценить изменение содержания различных элементов по толщине поверхностных слоёв (до долей мкм). После этого масс-пики различных элементов и их кластеров на полученных масс-спектрах идентифицировались. В отдельных областях на поверхности образцов производилась запись элементных (изотопных) изображений.

Результаты исследования

На рис.1а, 1б, 1в приведены полученные на растровом электронном микроскопе изображения поверхности трения образцов чугунных подшипников при увеличении в 1500 раз. Поверхность трения достаточно сильно развита. На ней наблюдаются царапины, риски и неровности размером от 100 до 200 мкм, что связано с характером эксплуатации подшипника. В наибольшей степени развит рельеф поверхности трения для первого образца. На этой поверхности в приповерхностном слое присутствуют многочисленные трещины. В меньшей степени развит рельеф у образца-ролика, и ещё меньше у образца с двумя рисками.

Продолжение приложения Е

Микрофотографии поверхности трения

Рисунок 1а – образец с 6-ю рисками



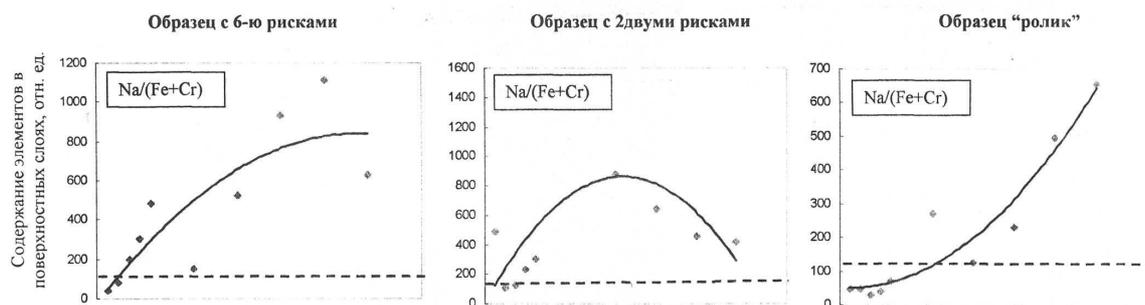
Рисунок 1б – образец с двумя рисками



Рисунок 1в – образец «ролик»



Продолжение приложения Е



Приложение Ж

Режимы обкатки отремонтированных двигателей УМЗ-417

(типовой ГОСНИТИ)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Нагрузка, Н	Время, Мин
Холодная	500...700	-	15
	700...900	-	10
Горячая без нагрузки	1400	-	15
Горячая под нагрузкой	1600	87	15
	1600	95	10
	1600	100	10
	1800	120	10
	2000	136	10
	2200	145	10
	2500	170	10
Всего			115

Режимы обкатки отремонтированных двигателей УМЗ-417

(типовой Ульяновского моторного завода)

Этапы обкатки	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Время, мин	Обкаточное масло
Холодная обкатка	1200...1500	15	М-8-В
Горячая обкатка	1000	60	М-8-В
	1500	60	
	2000	30	
	2500	15	
Всего		180	

Приложение К

Режим 35-часовой обкатки двигателя УМЗ-417

№ п/п	Нагрузка, Н (мощность, кВт) Режим работы	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Время, мин
1	65,5 (7,36)	1500	4
2	80,8 (10,3)	1700	120
3	Холостой ход	1500	5
4	83,4 (12,5)	2000	180
5	102,5 (16,9)	2200	240
6	Холостой ход	1500	5
7	117,4 (22,0)	2500	300
8	124,7 (25,7)	2750	240
9	Холостой ход	1500	10
10	130,8 (29,4)	3000	180
11	137,6 (33,0)	3200	120
12	Холостой ход	1500	10
13	140,3 (36,8)	3500	60
14	Холостой ход	1500	15
15	Полный дроссель	2200	60
16	Полный дроссель	2500	120
17	Холостой ход	1500	5
18	Полный дроссель	2750	120
19	Полный дроссель	3000	60
20	Холостой ход	1500	10
21	Полный дроссель	3250	60
22	Полный дроссель	3500	30
23	Холостой ход	1500	10
24	Полный дроссель	3750	30
25	Холостой ход	1500	15
26	Полный дроссель	1000	20
27	Холостой ход	1500	15
28	Остановка		
Всего			2100

Приложение Л

Режим ускоренной обкатки двигателя УМЗ-417 на масле

М-8-В плюс 3 % присадки ВАРКС

Этап обкатки	Нагрузка, Н	Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	Время, мин
<i>Холодная</i>	-	700...800	5
	-	800...1000	5
Горячая без нагрузки	-	1200	2
	-	1600	3
Горячая под нагрузкой	110	1800	2
	120	2100	2
	140	2300	2
	170	2500	3
	190	2800	3
	200	3000	3
Всего			30

Приложение М

Приведенные значения момента механических потерь на трение в период холодной обкатки двигателей УМЗ-417

Время холодной обкатки, мин	<i>Состав обкаточного масла</i>		
	<i>М-8-В</i>	М-8-В + + 2% ОГМ	М-8-В + + 3% ВАРКС
0,5	65,00	65,00	65,00
2	55,80	52,06	53,38
4	54,65	49,92	46,43
6	53,48	47,32	45,26
8	52,32	46,80	44,56
10	51,16	45,72	42,71
12	51,16	45,50	42,71
14	50,69	45,50	42,71
16	50,23	44,72	42,71
18	48,83	44,72	42,71
20	47,90	44,72	42,71
22	46,97	44,72	42,71
24	46,04	44,72	42,71
26	45,58	44,72	42,71
Коэффициент приведения	1,12	0,96	1,00

Приложение Н

Средний износ цилиндров двигателей УМЗ-417:

1) за время типовой стендовой обкатки, мм

Обкаточное масло	Расстояние от верхнего торца гильзы, мм				<i>Шероховатость</i> гильзы R _a , мкм
	20	50	80	120	
М-8-В	0,0060	0,0028	0,0023	0,0019	0,120
М-8-В+2% ОГМ	0,0009	0,0010	0,0019	0,0029	0,008
М-8-В+2% ВАРКС	0,0007	0,0009	0,0016	0,0024	0,006

2) за время 35-часовой стендовой обкатки, мм

Обкаточное масло	Расстояние от верхнего торца гильзы, мм				<i>Шероховатость</i> гильзы R _a , мкм
	20	50	80	120	
М-8-В	0,0102	0,0073	0,0063	0,0057	0,10
М-8-В+2% ОГМ	0,0082	0,0052	0,0052	0,0053	0,04
М-8-В+2% ВАРКС	0,0069	0,0048	0,0043	0,0041	0,03

Приложение II

1) Изменение зазора в замке поршневых колец в рабочем состоянии двигателя УМЗ-417

Обкаточное масло	№ кольца	Номер цилиндра				Среднее значение
		1	2	3	4	
М-8-В	1	0,015	0,005	0,001	0,005	0,0117
	2	0,014	0,015	0,005	0,025	
М-8-В + +2% ОГМ	1	0,007	0,006	0,007	0,009	0,0070
	2	0,005	0,008	0,008	0,006	
М-8-В + + 3% ВАРКС	1	0,006	0,004	0,005	0,025	0,0056
	2	0,004	0,005	0,008	0,006	

2) Средний износ поршневых колец двигателей УМЗ-417, г

Обкаточное масло	Номер цилиндра			
	1	2	3	4
М-8-В	0,0286	0,0331	0,0247	0,0426
М-8-В +2% ОГМ	0,0182	0,0165	0,0110	0,0208
М-8-В +3% ВАРКС	0,0136	0,0150	0,0127	0,0195

Приложение Р

1) Износ шеек коленчатого вала двигателя УМЗ-417, мм

Приработочное масло	Тип шейки	Номер шейки					Средний износ
		1	2	3	4	5	
<i>М-8-В</i>	шат.	0,005	0,005	0,006	0,004	-	0,0050
	кор.	0,002	0,003	0,002	0,002	0,003	0,0022
М-8-В + 3% ВАРКС	шат.	0,001	0,001	0,001	0,001	-	0,0010
	кор.	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0010

2) Износ вкладышей двигателя УМЗ-417, г

Приработочное масло	Тип вкладышей	Суммарный износ 2-х вкладышей					Средний износ
		Номер шейки					
		1	2	3	4	5	
<i>М-8-В</i>	шат.	0,0637	0,0292	0,0365	0,0281	-	0,0362
	кор.	0,0327	0,0338	0,0224	0,0432	0,0380	
М-8-В + 3% ВАРКС	шат.	0,0210	0,0092	0,0186	0,0094	-	0,0128
	кор.	0,0114	0,0120	0,0076	0,0195	0,0069	

Приложение С

Данные о наработке двигателей УМЗ-417 (на 31.07.2004 г)

№ п/п	Номера:		Пробег, км	Примечания
	заказа	блока двигателя		
1	2	3	4	5
Обкатанные по типовой технологии на масле М-8-В				
1	310	60790248	48266	
2	327	72317718	33646	
3	349	34518202	41823	
4	351	25914299	11476	Снят с эксплуатации
5	367	93112208	35790	
6	368	40377300	31233	
7	370	24713620	4012	Снят с эксплуатации
8	371	48322331	30750	
9	372	09716932	44289	
10	373	94499236	38203	
Среднее значение:			38000	
Обкатанные по ускоренной технологии на масле М-8-В + 2 % ОГМ				
1	399	60172308	55549	
2	403	64636621	50402	
3	412	81046532	39142	
4	415	72618002	62922	
5	418	52112197	36193	Снят с эксплуатации
6	427	83013020	41554	
7	432	20719732	47419	
8	433	24691387	33243	
9	435	94823661	45308	
10	438	52665136	27211	
Среднее значение:			44750	

Продолжение приложения С

1	2	3	4	5
1	439	29962276	39142	
2	442	45617921	31367	
3	447	08271890	42627	
4	449	48626225	65683	
5	453	18853160	37533	
6	459	02195211	43699	
7	462	30000652	58230	
8	467	12794841	63854	
9	469	60300913	46916	Снят с эксплуатации
10	473	91107727	49865	
Среднее значение:			48000	

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ.....	3
1	СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПРОЦЕССА ПРИРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА НА ОСНОВЕ ПРИСАДОК.....	5
1.1	Приработка поверхностей трения деталей, как резерв повышения надёжности и ресурса двигателей после ремонта..	5
1.2	Основные направления повышения качества и ускорения приработки сопрягаемых деталей двигателей после ремонта..	10
1.3	Эксплуатационные мероприятия для ускорения приработки деталей при обкатке двигателей.....	12
	Выводы.....	13
2	ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ УСКОРЕННОЙ ПРИРАБОТКИ ТРУЩИХСЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОБКАТКЕ ДВИГАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ (поверхностно-активных и химически активных веществ).....	20
2.1	Взаимосвязь процессов трения, поверхностных явлений, пленок переноса.....	20
2.2	Теоретические подходы применения различных приработочных присадок при обкатке двигателей.....	25
2.3	Теоретическое обоснование и формирование пленок переноса	31
2.4	Способ холодной обкатки двигателей с применением присадки ВАРКС к воздушно-присадочной смеси, как направление формирования пленок переноса.....	34
2.5	Оптимизация режимов ускоренной обкатки двигателей.....	37
	Выводы.....	40
3	МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И СТРУКТУРА ИССЛЕДОВАНИЙ ПРИРАБОТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ ПОСЛЕ РЕМОНТА.....	41

3.1	Программа и общая методика исследований.....	43
3.2	Методика выбора и обоснования объекта исследований.....	44
3.3	Методика определения количества объектов исследований.....	44
3.4	Методика планирования проведения экспериментов.....	45
3.5	Методика экспериментальных исследований.....	51
3.5.1	Выбор характеристик оценки качества приработки деталей двигателей.....	52
3.5.2	Методика проведения лабораторных испытаний.....	53
3.5.2.1	Методика определения момента силы трения и периода его стабилизации.....	57
3.5.2.2	Методика определения температуры поверхностей трения и смазочного материала.....	58
3.5.2.3	Методика определения износа образцов.....	60
3.5.2.4	Методика определения времени сопротивления схватывания..	60
3.5.2.5	Методика определения шероховатости образцов.....	61
3.5.2.6	Методика определения микротвердости образцов.....	61
3.5.2.7	Методика оценки пластичности поверхностей трения.....	62
3.5.2.8	Методика определения элементного состава пленки переноса методами растровой электронной микроскопии (РЭМ) и вторично-ионной масс-спектрометрии (ВИМС).....	64
3.5.3	Методика стендовых испытаний.....	66
3.5.4	Методика эксплуатационных испытаний.....	70
3.6	Оценка точности результатов испытаний.....	73
	Выводы.....	75
4	РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПРИРАБОТОЧНЫХ ПРИСАДОК.....	76
4.1	Лабораторные исследования приработки двигателей после ремонта на основе присадок.....	76

4.1.1	Изменение момента силы трения.....	76
4.1.2	Изменение температуры поверхностей трения.....	79
4.1.3	Определение износа образцов.....	80
4.1.4	Исследование противозадирных свойств приработочных присадок.....	81
4.1.5	Определение шероховатости образцов.....	82
4.1.6	Определение микротвёрдости образцов после приработки.....	82
4.1.7	Оценка пластичности поверхностей трения.....	83
4.1.8	Результаты исследований элементного состава пленки переноса поверхностей трения образцов деталей.....	84
4.2	Выбор рациональных условий и параметров обкатки отремонтированных двигателей.....	90
4.3	Результаты исследований эффективности применения приработочных присадок на обкаточно-тормозном стенде КИ-5543.....	94
4.4	Эксплуатационные испытания двигателей.....	101
4.5	Производственные рекомендации.....	106
	Выводы.....	107
5	ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ.....	110
5.1	Расчёт экономического эффекта от внедрения процесса ускоренной обкатки двигателей с использованием приработочных присадок.....	111
	Выводы.....	116
	ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	117
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	119
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	131

Хохлов Алексей Леонидович
Варнаков Валерий Валентинович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ОБКАТКИ ДВИГАТЕЛЕЙ
ПОСЛЕ РЕМОНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИСАДОК**

(научное издание)

План 2012 г.

Сдано в набор

Подписано в печать 06.06.2012 г.

Формат 60x84/16

Бумага офсетная

Печать RJSO

Тираж 300

Заказ №

Издательство Ульяновской ГСХА им. П.А. Столыпина
432980, Ульяновск, б. Новый Венец, 1