



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ, КАФЕДРА «ДВИГАТЕЛИ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ»

Целью проведения настоящей работы является экспериментальное исследование влияния триботехнического состава НИОД на основные показатели работы бензинового карбюраторного двигателя – эффективную мощность, расход топлива, скорость износа а также показатели токсичности отработавших газов.

Работа проводилась в рамках независимой экспертизы присадок к смазочным маслам, проводимой Отделом экспертиз журнала «5 Колесо».

Программа испытаний

Согласно Методике ускоренных трибологических стендовых испытаний, принятой в качестве основы для проведения независимой экспертизы, программа проведения испытаний включала в себя:

Этап 1. Предварительная обкатка и регулировка собранного двигателя.

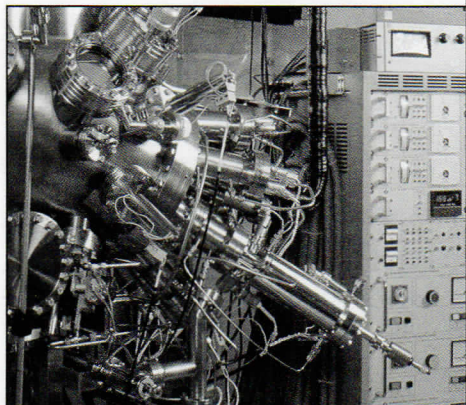
В состав работ на данном этапе входят:

- обкатка, проводимая в течение 15 моточасов, до стабилизации параметров по программе обкатки, рекомендованной Заводом-изготовителем;
- замер компрессии по цилиндрам.

Этап 2. Снятие базовых характеристик двигателя при работе на штатном масле.

В состав работ на данном этапе входят:

- стендовые испытания двигателя в течение 25 моточасов.
- через каждые пять циклов – цикл испытаний по программе «Холодный пуск» с прокруткой двигателя с отключенным зажиганием и подачей топлива на пусковой частоте



вращения коленчатого вала в течение 20 мин (аналог 60 пусков);

- по окончании цикла испытаний производится снятие характеристик двигателя: внешней скоростной и нагрузочных при $n=1500, 2500, 3500$ об/мин с замером основных показателей работы двигателя;
- через каждые 8 часов – отбор проб масла для спектрального и химического анализа;
- замер компрессии по цилиндрам;
- замер расхода масла методом «на слив».

Этап 3. Обработка двигателя триботехническим составом «НИОД-5» по технологиям фирмы-производителя НПИФ «Энион-Балтика» и снятие характеристик двигателя при работе на чистом масле.

- В состав работ на данном этапе входят:
- обработка двигателя составом согласно рекомендациям фирмы-производителя;
 - стендовые испытания двигателя в течение 25 моточасов.
 - через каждые пять циклов – цикл испытаний по программе «Холодный пуск» с прокруткой двигателя с отключенным зажиганием и подачей топлива на пусковой частоте вращения коленчатого вала в течение 20 мин (аналог 60 пусков);
 - по окончании цикла испытаний производится снятие характеристик двигателя: внешней скоростной и нагрузочных при $n=1200, 1500, 2000, 3500$ об/мин с замером основных показателей работы двигателя;
 - через каждые 8 часов – отбор проб масла для спектрального и химического анализа;
 - замер компрессии по цилиндрам;
 - замер расхода масла методом «на слив».

Этап 4. Анализ результатов проведения испытаний, подготовка отчета.

Оценка эффективности составов производится по следующим параметрам:

- изменению величины и степени равномерности компрессии по цилиндрам;
- величине максимальной мощности и максимального крутящего момента в абсолютной величине и в процентном выражении;
- оценочной величине скорости износа основных сопряжений трения, определяемой на основе данных спектрального анализа масла, замеров микропрофилей поверхностей деталей;
- величинам расхода топлива на режимах холостого хода, удельному минимальному расходу топлива, удельному расходу топли-

ва на номинальном режиме в абсолютном и процентном выражении в приведенных атмосферных условиях;

- изменению токсичности отработавших газов по компонентам CO и CH до и после обработки двигателя;
- по изменению величины эффективного к.п.д. двигателя до и после обработки.

В процессе проведения испытаний производятся замеры параметров двигателя с обеспечением следующей погрешности замеров величин:

Оценка скоростей износа производится путем:

- спектрального анализа масла;
- обмером деталей до и после испытаний.

Оценка пределов работоспособности двигателя при работе двигателя в аварийных условиях проводилась по следующей программе:

- Сборка двигателя с заменой распределительного вала, вкладышей подшипников и коленчатого вала;
- Установка двигателя на стенд, соединение с нагрузочным устройством, монтаж комплекса измерительной аппаратуры.

Результаты испытаний

Ниже приведены результаты, полученные в ходе контрольных замеров параметров двигателя.

Здесь и далее в таблицах использованы следующие обозначения:

- n – частота вращения коленчатого вала двигателя;
- M_e – эффективный крутящий момент;
- N_e – эффективная мощность;
- G_t – часовой расход топлива;
- g_e – удельный расход топлива;
- η_e – эффективный к.п.д.;
- CO – содержание окиси углерода в отработавших газах двигателя;
- CH – содержание остаточных углеводородов в отработавших газах двигателя

Результаты испытаний двигателя в аварийной ситуации, связанной с попаданием тосола в систему смазывания двигателя

Далее из двигателя было слито масло и залито 3 литра тосола. При этом оценочный остаток масла в скрытых полостях двигателя и масляном фильтре составило порядка 1л. Таким образом, двигатель работал на эмульсии «масло-тосол» с преимущественным содержанием тосола. Во избежание засорения карбюратора связь «вентиляция картера-воздушный фильтр» была разорвана.

Далее двигатель работал на режимах холостого хода со ступенчатым повышением частоты вращения коленчатого вала в диапазоне 800 ...2500 об/мин с выдержкой на каждом режиме в течение 60 мин.

Двигатель сохранял работоспособность на всех режимах вплоть до момента останова. После часового перерыва в испытаниях была предпринята попытка запуска двигателя от стартера. Двигатель удалось завести и обеспечить устойчивую работу только после его пусковой раскрутки до частоты вращения порядка 3400 об/мин, сразу

Табл. 15. Данные замера компрессии по цилиндрам.

Этап испытаний	1-й цилиндр	2-й цилиндр	3-й цилиндр	4-й цилиндр
По окончании приработки	9,1	12,0	12,2	12,2
Перед обработкой составом	8,9	11,8	12,0	12,1
После обработки составом	9,5	12,2	12,1	12,2
По окончании первой стадии испытаний	9,6	12,5	12,6	12,9
После переборки и замены вкладышей	11,9	12,1	12,1	12,6
После второй переборки	12,0	12,6	12,7	12,6

после чего появились стуки, характеризующие разрушение подшипников коленчатого вала. С подобным дефектом двигатель отработал 40 мин на режиме 3000 об/мин. После резкого нарастания интенсивности стука было принято решение прекратить эту стадию испытаний.

Разборка двигателя и его дефектация выявила разрушение антифрикционного слоя на первом шатунном, первом и третьем коренных подшипниках. Остальные вкладыши недопустимых дефектов не имели, хотя на их поверхности было отмечено наличие глубоких продольных рисок, очевидно, появившихся на стадии «холодной» обработки двигателя триботехническим составом НИОД. Рабочие поверхности цилиндров и поршневых колец находились в приемлемом состоянии и видимых дефектов не имели.

При разборке двигателя из поддона было слито порядка одного литра загущенной жидкости – смеси продуктов разложения этиленгликоля и смазочного масла с вязкостью ориентировочно более 100 сСт. Очевидно, что подобная смесь не могла обеспечивать смазывание узлов трения двигателя, поэтому можно утверждать, что окончание испытаний по сути моделировало серию «сухих испытаний» с полным отсутствием масла в системе смазывания двигателя.

Таким образом, частично была подтверждена работоспособность двигателя, обработанного триботехническим составом НИОД, в случае аварийных ситуаций, связанных с попаданием в масло тосола (работы на эмульсии тосол-масло) и полной потерей масла.

После дефектации двигателя, по согласованию с Заказчиком, была произведена сборка двигателя с новым комплектом вкладышей и с заменой распределительного вала. При этом была произведена «холодная» обработка двигателя путем нанесения консистентной смазки, содержащей триботехнический состав НИОД, на рабочие поверхности подшипников. После обкатки двигателя в течение 5 часов, была произведена «горячая обработка» путем ввода состава НИОД в моторное масло.

Далее, после пяти часов эксплуатации двигателя на различных режимах, были сняты контрольные характеристики.

В процессе проведения испытаний через определенное количество моточасов снимались контрольные параметры двигателя – мощность, расход топлива и показатели токсичности ОГ.

Замеры компрессии в цилиндрах двигателя проводились следующих этапах испытаний:

- после цикла обкатки – через 16 моточасов после начала цикла испытаний;
- после снятия базовых характеристик;
- после обработки двигателя ТС НИОД;
- по окончании первой серии испытаний;
- перед испытаниями на тосоле;
- перед сухими испытаниями.

Замеры производились при фиксированной частоте вращения коленчатого вала 250 об/мин, задаваемой двигателем стенда. Показания компрессометра усреднялись по трем замерам для каждого цилиндра. Замеры производились при полностью закрытой дроссельной заслонке.

Данные замеров сведены в табл. 15.

Анализ динамики процесса приработки двигателя с составом НИОД

Анализ динамики изменения параметров двигателя в процессе приработки дает возможность сделать предварительные выводы по составу и технологии применения состава.

Динамика изменения параметров двигателя бралась на трех режимах внешней скоростной характеристике и частичных характеристиках:

- малых частот вращения к.в. – 1500 об/мин;

- в зоне максимального крутящего момента – 3500 об/мин

- в зоне номинальной мощности – 5600 об/мин.

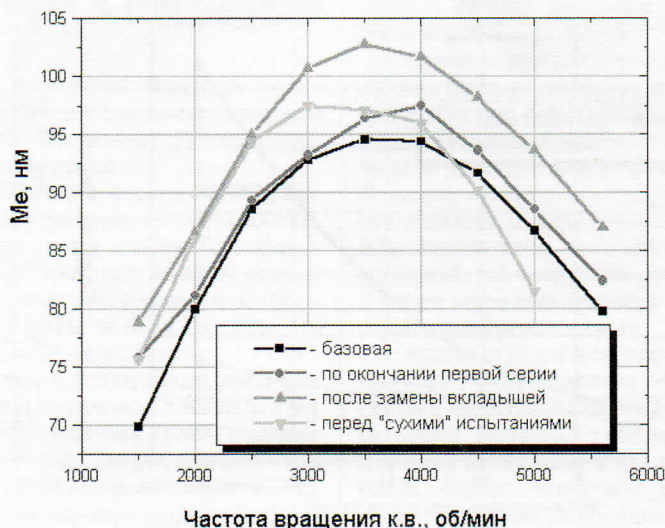
В связи с тем, что на начальном этапе приработки было отмечено существенное падение параметров двигателя, свидетельствующее о продолжении процесса модификации поверхностных слоев, первые 8 часов работы не допускалась работа на номинальных режимах.

Анализ полученных данных свидетельствует о наличии нескольких периодов приработки двигателя под воздействием состава НИОД.

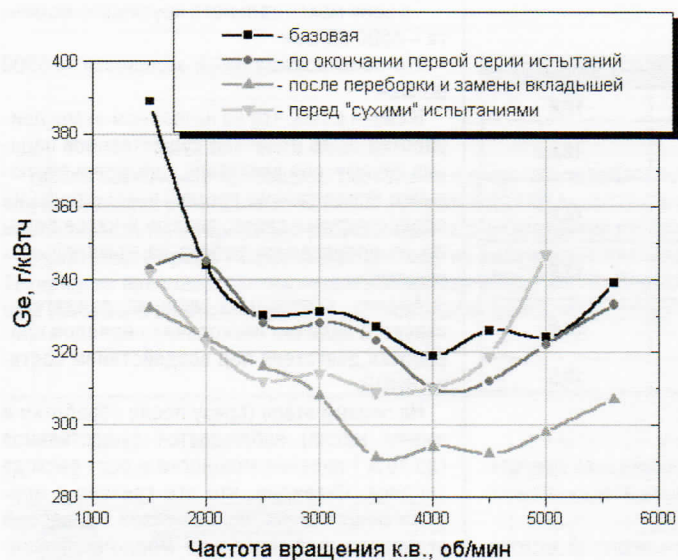
На первом этапе (сразу после обработки и смены масла) наблюдается существенное (до 10%) падение мощности и рост расхода топлива. Очевидно, что это связано с продолжающимся на первом этапе процессом активного формирования модифицированного слоя, происходящего с использованием процессов микрошлифовки поверхностей. Это дает существенное увеличение механических потерь в двигателе и, соответственно, ухудшение его параметров.

По мере формирования модифицированного слоя механические потери уменьшаются, и на втором этапе (продолжительность – 15...17 моточасов ускоренного цикла испытаний после обработки) наблюдается устойчивый рост мощности и снижение удельного расхода топлива. При этом параметры обработанного двигателя существенно превышают базовые характеристики. Так, при испытаниях в конце второго этапа приработки наблюдалось повышение крутящего момента на режиме 1500 об/мин – на 7%, на 3500 об/мин – на 3%. При этом удельный расход топлива снизился в диапазоне режимов, характерных для городского цикла на 12-17%. На этих же режимах наблюдалось существенное снижение выхода CO.

На третьем этапе наблюдалась стабилизация эффекта и некоторое его снижение. Возможно, это было связано со срабатыванием модифицированного слоя. Начало ухудшения характеристик на режимах городского цикла (диапазон частот вращения



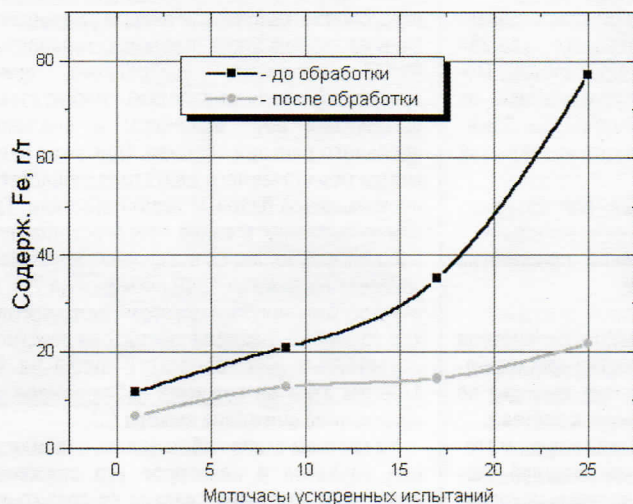
Изменение кривой крутящего момента при работе двигателя по ВСХ на различных стадиях испытаний



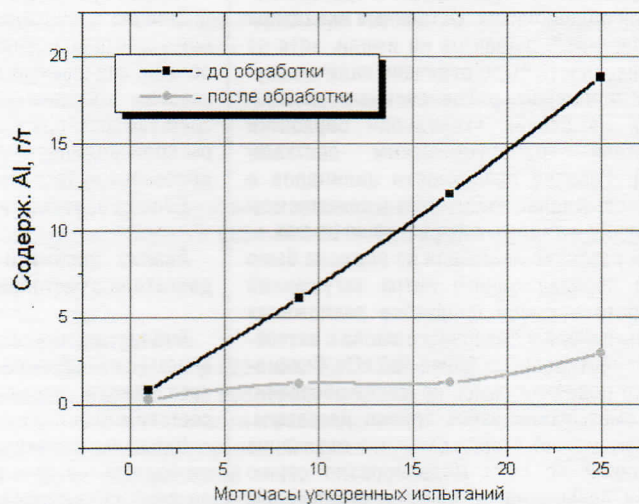
Изменение кривой удельного расхода топлива при работе двигателя по ВСХ на различных стадиях испытаний



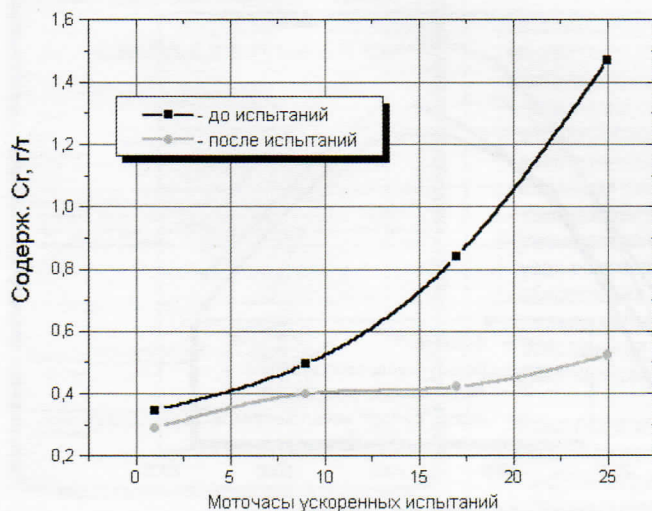
Изменение кривой содержания CO при работе двигателя по ВСХ на различных стадиях испытаний



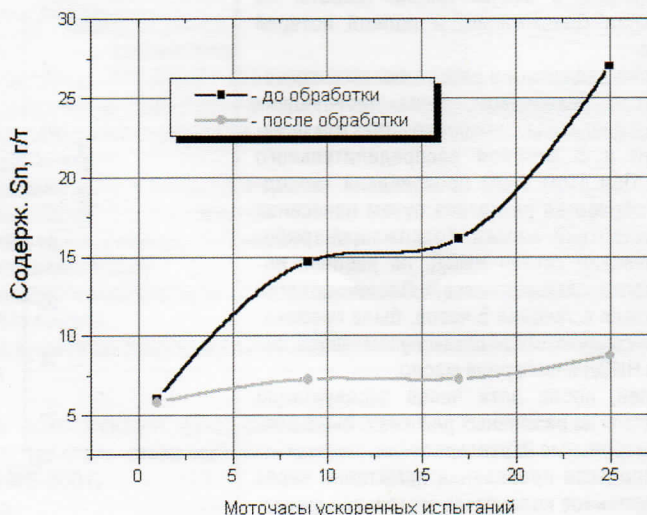
Содержание Fe в пробах масла, отобранных до и после обработки двигателя ВАЗ-2108 составом НИОД



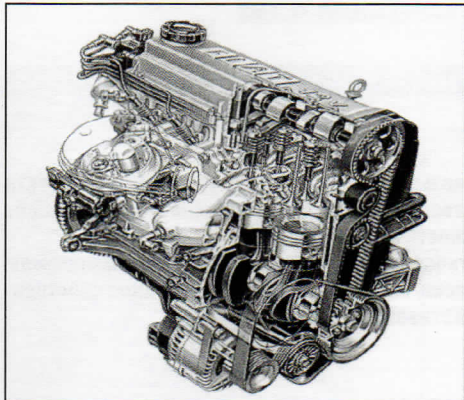
Содержание Al в пробах масла, отобранных до и после обработки двигателя ВАЗ-2108 составом НИОД



Содержание Zn в пробах масла, отобранных до и после обработки двигателя ВАЗ-2108 составом НИОД



Содержание Pb в пробах масла, отобранных до и после обработки двигателя ВАЗ-2108 составом НИОД



1500-3500 об/мин) наблюдался начиная с 20-го часа ускоренных испытаний, что соответствует пробегу 35...40 тыс. км для среднестатистического автомобиля, эксплуатирующегося в городских условиях.

Следует отметить, что на режимах, близких к номинальным, достичь начала третьего этапа не удалось – на всем протяжении испытаний наблюдалось устойчивое повышение параметров, однако темп улучшения характеристик двигателя был существенно меньшим.

Возможно, причиной этого являлось разрушение вкладыша 3-ей коренной опоры, обнаруженное при вскрытии двигателя. Начало разрушения вкладыша, как показали результаты спектрального анализа проб масла, произошло до обработки двигателя составом НИОД, при снятии базовых характеристик с выходом на номинальный режим работы. Процесс обработки поврежденного вкладыша составом НИОД ускорил процесс его разрушения.

Причиной разрушения вкладыша, по нашим предположениям, являлась высокая степень износа двигателя (2-ой капитальный ремонт), а также дефект самой детали.

Повреждение узла трения не позволило достичь максимального результата обработки и несколько исказило общую картину динамики работы состава.

Следует отметить, что обработка двигателя составом НИОД позволила сохранить работоспособность двигателя с тяжелым дефектом узла трения на всех режимах, вплоть до номинального. Очевидно, это свидетельствует о существенном снижении коэффициентов трения в трибологических узлах двигателя, допускающих сохранение работоспособности деталей даже в случае нарушения штатного гидродинамического режима смазывания.

Анализ данных по динамике изменения параметров двигателя на частичных режимах показывают наличие тех же тенденций и временных интервалов, которые были отмечены при снятии контрольных параметров на режимах внешней скоростной характеристики. Это говорит о том, что причиной достижения эффекта является снижение механических потерь в двигателе, которые зависят в основном от частоты вращения коленчатого вала и мало зависят от нагрузки на двигатель.

Существенного влияния обработки двигателя составом НИОД на токсичность отработавших газов отмечено не было. Однако полученные результаты свидетельствуют о

возможности обеднения топливо-воздушной смеси без потери мощности двигателя. Это, безусловно, должно дать существенный эффект снижения выхода СО и СН на всех режимах работы двигателя.

Наибольший эффект в повышении технико-экономических параметров двигателя был получен после переборки двигателя и замены вкладышей на новые. В этом варианте был подучен прирост мощности на 10...12%, снижение расхода топлива – на 9...14%. Очевидно, что это является следствием различного результата обработки пар трения, сформированных материалами с различной поверхностной твердостью. Если для пар с одинаковой твердостью происходит активная модификация обеих поверхностей, то для пар с существенно различной твердостью модифицируется только твердая поверхность. Поэтому замена деталей, формирующих «мягкие» рабочие поверхности пар трения (вкладыши), в совокупности с модифицированными «твердыми» поверхностями (шейки вала), обеспечивают максимальный результат.

Снижение характеристик двигателя на последнем этапе испытаний, очевидно, связано с резким ростом зазоров в сопряжениях, полученным при испытаниях на тосоле.

В целом, считаем, что полученного объема информации явно недостаточно для обоснованных выводов о методике применения состава НИОД в целом и позволяют лишь дать предварительную оценку эффекта от его применения. Для разработки методики необходима постановка методически проработанного эксперимента на большом количестве двигателей различного рабочего объема и с различной степенью износа с накоплением и статистическим анализом результатов.

На рис. приведены зависимости крутящего момента, удельного расхода топлива и содержания СО от частоты вращения коленчатого вала при работе двигателя по внешней скоростной характеристике.

Приведенные на рисунках результаты полностью подтверждают ранее сделанные выводы.

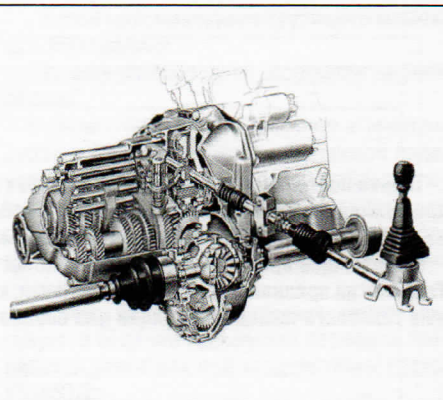
Результаты спектрального анализа проб масла, отобранных на различных стадиях испытаний

Динамика накопления продуктов износа по наиболее важным элементам приведена на рис. 15-18. Полученные данные свидетельствуют о следующем:

- Обработка двигателя составом НИОД приводит к резкому снижению скорости накопления продуктов износа в масле. По содержанию основных металлов базовых деталей двигателя отмечается снижение скорости износа по Fe – в 3.5 раза; по Al – в 3.5...4 раза; по Cr – в 3 раза, по Sn – в 3.2 раза.

- Одновременно с этим наблюдается резкое увеличение содержания в масле Si и Mg, что объясняется наличием в масле фрагментов состава НИОД, продолжающего свою работу даже после смены масла и промывки, проведенной на конечной стадии обработки двигателя.

- Резкое увеличение содержания всех металлов в пробе, отобранной после обработки



двигателя (перед заменой масла), свидетельствует о наличии механизма микрошлифовки рабочих поверхностей трения, осуществляемого составом НИОД.

Выводы по работе

По результатам проведенной работы можно сделать следующие выводы:

- В процессе обработки двигателя составом НИОД на промежуточной стадии испытаний было получено значительное повышение мощности и снижение удельного расхода топлива – на режимах малых частот вращения доходящее до 12...17%, на номинальном режиме – до 2...3%. Достигнутый результат говорит о положительном воздействии состава на двигатель, предположительно выявившемся в снижении механических потерь.

- Наилучшие результаты достигаются в случае использования триботехнического состава НИОД в качестве элемента технологии, частично заменяющей капитальный ремонт двигателя – обработку узлов трения с последующей заменой вкладышей подшипников. В этом случае достигается рост мощности двигателя на 4...12%, снижение удельного расхода топлива на 3...14% на различных эксплуатационных режимах работы.

- Анализ данных спектрального анализа проб масла, отобранных на различных стадиях испытаний, свидетельствует о существенном снижении темпа накопления продуктов износа по основным металлам базовых деталей двигателя, наблюдаемом после обработки двигателя.

- Обработка двигателя составом НИОД позволила сохранить работоспособность двигателя с тяжелым дефектом узла трения (разрушением вкладыша коренного подшипника) на всех режимах, вплоть до номинального. Очевидно, это свидетельствует о существенном снижении коэффициентов трения в трибологических узлах двигателя, допускающих сохранение работоспособности деталей даже в случае нарушения штатного гидродинамического режима смазывания.

- Обработка двигателя триботехническим составом НИОД позволила обеспечить частичную работоспособность при аварийных ситуациях, связанных с попаданием тосола в систему смазывания и при полной потере масла. Однако наилучшие результаты в плане повышения работоспособности, очевидно, могут быть достигнуты в случае использования стальных (чугунных?) вкладышей.