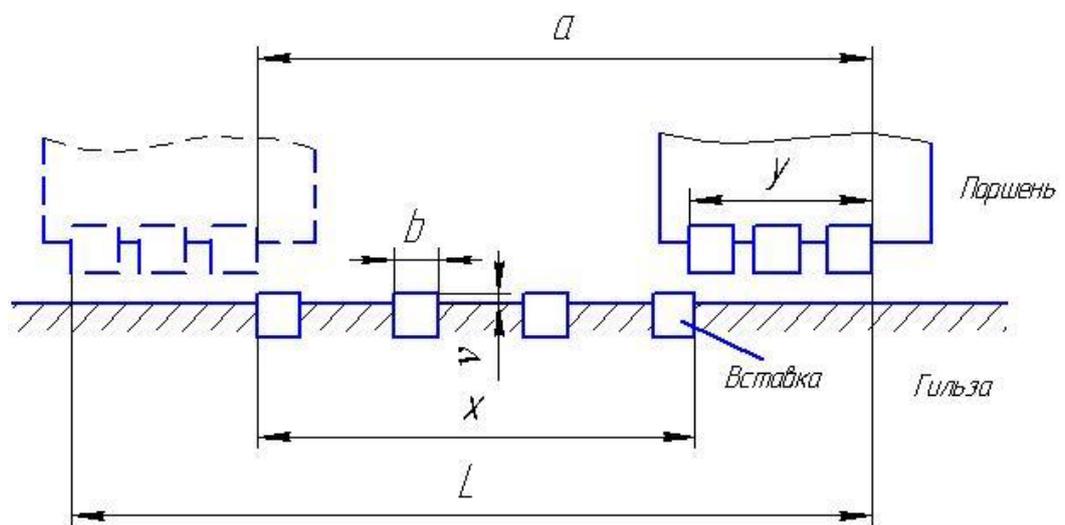


САЛАХУТДИНОВ И.Р., ХОХЛОВ А.Л.

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГИЛЬЗ ЦИ-  
ЛИНДРОВ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БИМЕ-  
ТАЛЛИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕЙ  
ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ**



Ульяновск - 2012

УДК 621.43

С - 16

ББК 40.74

Салахутдинов И.Р., Хохлов А.Л.

Повышение износостойкости гильз цилиндров бензиновых двигателей биметаллизацией рабочей поверхности трения  
Ульяновск, УГСХА, 2012 г. – 207 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 «Электроснабжение и применение электрической энергии в сельском хозяйстве» ФГБОУ ВПО «Башкирский государственный аграрный университет» ГАЛИУЛЛИН Р.Р.

В монографии рассмотрен способ повышения износостойкости биметаллизацией трущейся поверхности гильзы цилиндров.

Теоретически обоснованы форма, геометрические размеры и необходимое количество канавок на рабочей поверхности трения гильз цилиндров, заполненных медью. Разработан технологический процесс изготовления биметаллизированной медью гильзы цилиндров, на рабочей поверхности которой выполняются канавки в виде трех рядов замкнутых колец отдельных друг от друга

Проведены сравнительные лабораторные ускоренные и стендовые испытания штатных и биметаллизированных гильз цилиндров на износостойкость.

Эксплуатационные исследования автомобилей УАЗ-3303 укомплектованных двигателем с биметаллизированными и штатными гильзами цилиндров. Табл. 32. Ил. 86. Библиограф. 175.

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.

ISBN 978-5-902532-91-0

© Салахутдинов И.Р., Хохлов А.Л. 2012

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

## ВВЕДЕНИЕ

Повышение надежности машин и увеличение их ресурса имеют большое значение в современных экономических условиях. Энергетической основой мобильных сельскохозяйственных процессов является двигатель внутреннего сгорания, на долю которого приходится до 36...52% от общего количества отказов [1].

Эффективные показатели работы двигателя тем выше, чем совершеннее теплоиспользование и ниже механические потери и, в частности, потери на трение. Чем меньше потери на трение, тем меньше износ основных трущихся пар, больше срок службы и меньше число неисправностей двигателей в условиях эксплуатации, наибольшие потери вызываются трением между поршнем с кольцами и зеркалом гильзы цилиндра [2]. Следовательно, одним из звеньев, наиболее лимитирующих показатели надежности работы ДВС, являются гильзы цилиндров - одна из основных частей ДВС, которая работает совместно с поршнями и кольцами, образуя объем, в котором тепловая энергия процесса сгорания топлива превращается в механическую энергию [3].

Основными дефектами гильз цилиндров являются: износ зеркала цилиндра; износ, изменение формы и взаимного расположения верхнего и нижнего установочных поясков относительно оси цилиндра; сколы и трещины любого размера и расположения; отложения накипи на поверхности, омываемой водой; отложения накипи на поверхностях посадочных поясков; коробления, отколы, глубокие задиры или потеря натяга вставки гильзы [4].

В настоящее время разработано несколько способов восстановления и упрочнения внутренней поверхности гильз цилиндров автотракторных двигателей, которые по своей технологии делятся на расточку под ремонтный размер и восстановление до номинального размера [5].

Расточка под ремонтный размер влечет за собой снижение твердости внутренней поверхности и необходимость организации производства порш-

ней и поршневых колец ремонтного размера, а также приводит к сокращению ресурса двигателей на 30...50% [6].

Для восстановления гильз цилиндров до номинального размера применяются такие способы: металлизация, гальванические способы, запрессовка износостойких пластин, наплавка на внутреннюю поверхность износостойких порошков, восстановление нагревом и т.д. Но они не нашли широкого применения из-за того, что не соответствуют требованиям стандарта по качеству и имеют высокую себестоимость, кроме того, практически все эти технологические процессы оказывают неблагоприятное влияние на экологию [5].

Поэтому разработка и совершенствование способов восстановления и повышения износостойкости гильз цилиндров, отвечающих требованиям стандартов, являются актуальными и практически значимыми для сельскохозяйственного производства.

Во-первых, гильза должна быть износостойкой и иметь низкий коэффициент трения. Во-вторых, сохранять в процессе работы стабильные размеры и при этом выдерживать высокие давления, механические и тепло-вые нагрузки, а также обладать хорошей теплопроводностью и коррозионной стойкостью в активных средах.

Для обеспечения перечисленных технических требований к качеству гильз цилиндров при формировании поверхностей трения необходимо обеспечивать получение оптимальных триботехнических характеристик сопрягаемых поверхностей, таких как низкий коэффициент трения, высокая износостойкость, оптимальные физико-механические свойства.

Эффективным способом повышения износостойкости гильз цилиндров является биметаллизация рабочей поверхности трения. Для этого на внутренней поверхности гильзы цилиндров выполняют вставки, слои, канавки, пазы, отверстия и прочее из материала с иными физико-механическими свойствами, как правило, в плоскости, непараллельной плоскости трения и направлению движения деталей.

Преимущество данного способа заключается в том, что при возвратно-

поступательном движении поршня кольца, двигаясь по поверхности гильзы, пластическим деформированием снимают слой цветного металла (медь, олово, латунь и др.) с канавок и «намазывают» его по всей поверхности гильзы между НМТ и ВМТ, что приводит к образованию на рабочей поверхности гильзы антифрикционной пленки, которая снижает коэффициент трения поршневых колец о стенку гильзы цилиндра.

Например, канавки, выполненные в виде отдельных замкнутых колец, способствуют точности глубины их нарезки и, следовательно, увеличению равномерности заполнения канавок цветным металлом (медью). Такое конструктивное исполнение рабочей поверхности гильзы цилиндра позволяет повысить качество работы цилиндропоршневой группы и износостойкость гильз цилиндров [3,6-8].

Целью настоящей работы является повышение износостойкости гильз цилиндров бензиновых двигателей биметаллизацией рабочей поверхности трения.

# 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 1.1 Анализ факторов, влияющих на износостойкость гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания

По ГОСТу 27674-88, износостойкость – свойства материала оказывать сопротивление изнашиванию в определённых условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания [9].

Износостойкость изделия характеризуют следующие показатели:

- износ — изменение массы изделий, их размеров, количества металла в масле или изменение параметров изделия, зависящих от износа поверхностей или сопряжений;

- скорость изнашивания — отношение значения износа к интервалу времени, в течение которого он возник (мгновенная — в определённый момент времени, средняя — за определённый интервал времени);

- интенсивность изнашивания (мгновенная, средняя) — отношение значения износа к обусловленному пути, на котором происходит изнашивание, или объёму выполненной работы [9].

Долговечность и эффективность работы автотракторных двигателей в значительной мере определяются износостойкостью деталей цилиндропоршневой группы. Износ деталей ЦПГ приводит к снижению тягово-мощностных показателей работы двигателя, росту расхода топливо-смазочных материалов, загрязнению окружающей среды. Нарушения в работе ЦПГ оказывают влияние на работу других сборочных единиц двигателя, ускоряя их изнашивание. Ресурс капитально отремонтированного двигателя составляет 35...40% от ресурса нового двигателя. Одной из дорогих и быстроизнашивающихся деталей ЦПГ является гильза цилиндра. Интенсивность изнашивания ГЦ после капитального ремонта в 2...3 раза выше, чем у новых гильз. Поэтому разработка и совершенствование способов восстановления и увеличения ресурса гильз цилиндра являются актуальными [1,6, 10-18].

Процесс изнашивания гильзы цилиндра происходит следующим образом: на верхний торец поршневого кольца действует давление газов  $p_{Hr}$ , многим отличающееся от давления в камере сгорания двигателя, прижимающее его к нижнему торцу поршневой канавки (рис. 1.1) [18]. Снизу на кольцо воздействует давление газов  $p_1$ , прошедших через зазоры между кольцом или гильзой, кольцом или нижним торцом канавки. Это давление газов изменяется по ширине кольца и стремится оторвать его от плоскости соединения с канавкой. Однако давление газов на нижний торец значительно меньше, чем на верхний, из-за его дросселирования в зазорах. В результате кольцо прижимается к нижнему торцу канавки разностью давлений, действующих на его верхний и нижний торцы.

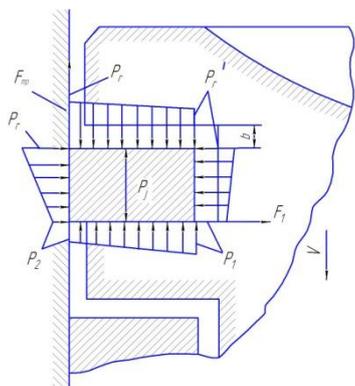


Рисунок 1.1 - Схема сил, действующих на поршневое кольцо

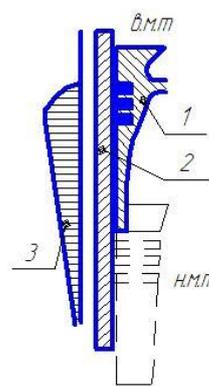


Рисунок 1.2 - Характер износа гильзы цилиндра по высоте  
1 поршень; 2 цилиндр; 3 эпюра износа

Давление газов в канавках значительно увеличивает силу прижатия кольца к поверхности гильзы; при этом выдавливается смазка и возрастает работа трения. Между поверхностью кольца и гильзы при больших давлениях за кольцом возникает граничное трение, в условиях которого наблюдается повышенный износ, особенно верхних колец и верхнего пояса гильз. В бензиновых двигателях работа трения, приходящаяся на компрессионные кольца, распределяется следующим образом: первое кольцо 60%, второе 30% и третье 10% [2].

Между кольцом и поверхностью ГЦ возникает сила трения ( $F_{TP}$ ), значение которой пропорционально давлению кольца на поверхность гильзы

цилиндра, возникающего в результате действия давления газов и силы упругости кольца. Эта переменная по величине сила направлена в сторону, противоположную движению поршня. Работа сил трения вызывает износ гильзы цилиндра и рабочей поверхности кольца. На работу сил трения влияют: соотношение физико-механических свойств материалов кольца и гильзы цилиндра; состояние смазки и наличие в ней абразива; температура соединяемых деталей.

Работа сил трения нижних колец всегда меньше, чем первого, что объясняется, с одной стороны, лучшими условиями смазки, а с другой – более низким давлением газов в лабиринтном уплотнении.

Вблизи верхней мёртвой точки (в.м.т.), на тактах сжатия и рабочего хода, происходит интенсивное изнашивание гильзы цилиндра, усугубляющееся действием высокой температуры газа, которая приводит к выгоранию смазочного материала на поверхности цилиндра. По мере движения поршня вниз работа сил трения колец в соединении уменьшается. Кольца заходят в зону ГЦ, где всегда имеется масло на поверхности, интенсивность изнашивания ГЦ по высоте уменьшается. Эпюра износа цилиндра имеет форму конуса, большее основание которого расположено вблизи в.м.т. (рис. 1.2) [18].

В плоскости качания шатуна износ цилиндра несколько больше из-за действия нормальной силы. Участок гильзы цилиндра, расположенный напротив огневого пояса поршня, при положении его у в.м.т. изнашивается. Интенсивность изнашивания ГЦ, помимо перечисленных факторов, в значительной мере определяется условиями эксплуатации двигателя и совершенством его технического обслуживания.

Неравномерный износ гильз цилиндров по высоте приводит к радиальным перемещениям кольца в канавке. В результате перемещения кольца и действия нормального усилия, прижимающего его к нижнему торцу канавки, между ними возникает сила трения  $F_1$  (см. рис. 1.1). Работа силы трения вызывает износ первого поршневого кольца и канавки поршня, который принято оценивать по увеличению торцового зазора  $b$ . Чрезмерный износ этих де-

талей приводит к тому, что дросселирующее действие кольца ослабевает. Газы свободно проходят в картер, что ускоряет старение масла и изнашивание деталей ЦПГ двигателя [19].

Изучение процессов, происходящих при изнашивании различных пар трения, осуществляется в рамках быстро развивающейся науки - трибологии. Большой вклад в изучение процессов и закономерностей изнашивания деталей двигателя внутреннего сгорания сделали И.В. Крагельский, А.В. Чичинадзе, М.И. Хрущев, Ф.Д. Авдонькин, Б.М. Асташкевич, А.С. Денисов, В.И. Цыпцын, И.Б. Гурвич, М.Н. Ерохин, В.В. Стрельцов, Е.А. Пучин, В.Ф. Карпенков, Д.Н. Ведерников, Н.С. Ждановский, Д.Н. Гаркунов, А.А. Симдянкин и др [20-37].

Исследования показывают, что детали ЦПГ работают при нестационарных тепловых, нагрузочных, скоростных режимах, в условиях воздействия абразивной и газовой сред, которые способствуют разрыву разделяющих пленок и возникновению микросхватывания с различной интенсивностью изнашивания [28-30,38]. При этом процесс изнашивания изменяется с течением времени. Выделяют три этапа этого процесса: приработка, установившийся режим и катастрофический износ:

Первый этап - характеризуется довольно быстрым увеличением износа, так как происходит сглаживание микронеровностей на рабочих поверхностях деталей. Этот период связан с приработкой и происходит при незначительном пробеге двигателя. Окончание этого этапа происходит после обкатки нового двигателя и характеризуется стабилизацией зазора между ними. Этот зазор называется номинальным.

Второй этап - нормальная эксплуатация двигателя. Этот этап характеризуется малой скоростью нарастания износа и значительной продолжительностью по времени. Называется также периодом естественного изнашивания. Увеличение износов зависит от многих параметров. Любое ухудшение условий эксплуатации повышает темп изнашивания. Улучшение условий эксплуатации двигателя уменьшает темп нарастания износов на данном этапе. Но по мере эксплуатации износы нарастают и достигают допустимых вели-

чин. Дальнейшее функционирование сопряжений проходит с худшей смазкой и, следовательно, с повышенной скоростью износа механизмов.

Третий этап - этап аварийного изнашивания. Работа сопряжений на этом этапе может вызвать поломку и требует внимательного контроля. Износ не должен быть больше предельной величины. Численные значения номинального износа (зазора) определяются конструкцией двигателя. Значения допустимого и предельного износа определяются из теории, исходя из условий смазки.

В тракторных и автомобильных двигателях устанавливают гильзы мокрого типа с верхним опорным буртом. ГЦ легкоъемные «мокрого» типа отливаются из специального перлитного серого чугуна с содержанием феррита до 5%. Графит средне- или мелкозернистый прямой или завихренной формы. Твердость 170 ... 241 HV. Для снижения износа в верхнюю часть гильзы запрессована с натягом 0,08 ... 0,14 мм вставка из специального кислотоупорного легированного чугуна аустенитного типа. Твердость материала вставки 74 ... 92 HRC. Структура: аустенит и карбиды в виде отдельных включений или сетки и графита, состоящего из мелких и средних пластин прямой или завихренной формы.

Внутреннюю поверхность гильзы обрабатывают до шероховатости Ra 0,32. Для увеличения маслостойкости рабочей поверхности на части гильз цилиндров внутреннюю поверхность подвергают плосковершинному хонингованию. При такой обработке на поверхности гильз формируется редкая сетка из рисок (глубиной 3 ... 6 мкм и расстоянием между ними 0,3 ... 0,6 мм) и опорных площадок между ними. Риски наклонены к вертикальной оси под углом 45 ... 65°. Суммарная площадь опорных площадок составляет 50 ... 70% площади боковой поверхности цилиндра [22,39-43].

Гильзы цилиндров во время работы воспринимают механические и тепловые нагрузки, а также подвергаются износу. Условия в камере сгорания двигателей обуславливают следующие основные требования, предъявляемые к гильзам цилиндров:

- а) прочность стенок при действии на них сил давления газов;
- б) износостойкость зеркала цилиндра при длительной эксплуатации двигателя;
- в) небольшие потери на трение при перемещении поршня с кольцами в гильзе;
- г) антикоррозионная устойчивость внутренней и наружной поверхностей гильзы;
- д) надежность уплотнения в местах газового стыка и стыков водяного охлаждения;
- е) свободное расширение в осевом направлении для мокрых гильз цилиндров с верхним опорным буртом [19,44-46].

В процессе эксплуатации на износ гильзы влияет множество факторов. К основным факторам относятся скоростной, нагрузочный и тепловой режимы работы двигателя, эффективность очистки от пыли и других механических частиц, поступающих в двигатель воздуха и топлива, эффективность очистки от продуктов изнашивания и механических примесей картерного масла, число холодных пусков и др. При соблюдении установленных заводом правил технического обслуживания и эксплуатации интенсивность изнашивания гильз небольшая и составляет около 0,7 мкм на 1000 км пробега [20, 38-40,44,47].

Во время работы двигателя гильзы цилиндров испытывают значительные переменные механические и тепловые нагрузки, подвергаются воздействию коррозионных веществ, абразивных частиц, высоких температур и давления [48]. В момент вспышки максимальное давление газов в цилиндре бензинового двигателя достигает 2,5...5 МПа, а температура газов в камере сгорания достигает 1800...2000 °С, около нижней мёртвой точки давление снижается до 0,3...0,5 МПа, а температура до 700...900 °С, что вызывает нагревание центра днища поршня – у чугунных поршней 400...500 °С у алюминиевых 200...250 °С у кромки камеры сгорания, 200...220 °С в зоне верхнего компрессионного кольца [39,41,42]. Температура головки цилиндров достигает 400 °С. Температура гильзы цилиндра в зоне верхней мёртвой точки, достигает 250...300 °С и уменьшается вниз по стенке гильзы.

В результате нагрева происходит снижение механических свойств материалов, из которых изготовлены детали ЦПГ. При температуре более 450 °С механические свойства чугуна снижаются настолько, что нормальная длительная работа ГЦ при такой температуре невозможна [20,38,49,50].

Попадание механических твердых частиц в цилиндры двигателя вместе с воздухом и топливом приводит к значительным износам рабочих поверхностей гильз и поршневых колец. Так, специальные испытания показали, что при поступлении в цилиндры двигателя с воздухом всего 7...9 г/ч кварцевой пыли износ гильз увеличивается примерно в 10 раз (такое количество пыли может поступать в двигатель при нарушении периодичности технического обслуживания воздушного фильтра). Если с бензином в двигатель поступает пыли 2 г/ч, за 200 ч работы износ гильз и поршневых колец достигает предельного значения. Существенно увеличивается износ гильз также при попадании пыли или механических твердых частиц в масляный картер [39,44, 51-55].

Значительное влияние на работу двигателя оказывает температура окружающего воздуха, которая определяет температуру жидкости в системе охлаждения двигателя. Если двигатель не охлаждать, то газы, имеющие высокую температуру, сильно нагревают детали двигателя, и они расширяются. Масло на гильзах цилиндров и поршнях выгорает, их трение и износ возрастают, а от чрезмерного расширения деталей происходит заклинивание поршней в цилиндрах двигателя, и двигатель может выйти из строя. Чтобы избежать отрицательных явлений, вызываемых перегревом двигателя, его необходимо охлаждать.

Однако чрезмерное охлаждение двигателя вредно отражается на его работе. При переохлаждении двигателя на стенках цилиндров конденсируются пары топлива (бензина), смывая смазку, разжижают масло в картере. В этих условиях происходит интенсивный износ поршневых колец, поршней, цилиндров и снижается экономичность и мощность двигателя. Нормальная работа системы охлаждения способствует получению наибольшей мощности,

снижению расхода топлива и увеличению срока службы двигателя без ремонта [44,51].

Большое число холодных пусков и прогревов, а также длительная работа двигателя с охлаждающей жидкостью температурой ниже 55 °С значительно увеличивает износ гильз. Анализ имеющихся данных показывает, что при температуре охлаждающей жидкости ниже 55 °С износ гильз увеличивается более чем в 2 раза. Износ гильз и колец в период холодного пуска и прогрева также весьма высок. Сравнение износа гильз за период пуска и прогрева и за тот же отрезок времени при работе при нормальном тепловом режиме показывает, что один пуск и прогрев двигателя по износу равен приблизительно 150 км пробега. Предпусковой прогрев двигателя существенно уменьшает износ гильз [44,51].

На износ деталей ЦПГ влияют взаимное расположение и зазоры деталей кривошипно-шатунного механизма. Непараллельность осей шатунных шеек относительно коренных, неперпендикулярность оси цилиндра к оси коленчатого вала, неточность взаимного расположения осей верхней и нижней головок шатуна приводят к перекосу поршня в цилиндре, что ухудшает приработку поршней, колец и коренных вкладышей коленчатого вала. При перекосе ухудшается контакт колец с цилиндром, повышается расход масла на угар, происходит его быстрое старение и загрязнение продуктами сгорания топлива. Динамические усилия в ЦПГ при «перекладках» поршня в значительной мере зависят от начального зазора в соединении поршень-цилиндр, который существенно влияет на перекося поршня [19,21,44-46,56,57].

Также установлено [31,58], что изнашивание поверхности зеркала ГЦ происходит в результате усталостного разрушения тонких поверхностных слоев и абразивного изнашивания твердыми частицами, попадающими в зону трения из масляного и воздушного трактов двигателя. Поверхностный слой, образующийся на поверхности трения, локализует адгезионные, абразивные повреждения, процессы охрупчивания и разрыхления в минимальных поверхностных объемах. Этот слой должен иметь податливые объемы металла

с минимальным сдвиговым сопротивлением и осуществлять деконцентрацию напряжений на фрикционном контакте. Нижний несущий слой должен обладать большой сопротивляемостью пластическому деформированию, схватыванию, усталостным процессам и абразивным повреждениям. Активные слои в процессе эксплуатации двигателей должны сохранять способность к регенерации и постоянному обновлению [31,58].

Высокое давление и температура приводят к выгоранию и разжижению масляной пленки топливовоздушной смесью и ужесточает условия трения. При положениях поршня в верхней и нижней мертвой точках всегда наблюдается почти полное разрушение масляной пленки и создается полусухое трение. В зоне повышенных скоростей скольжения поршня ближе к средней части гильзы толщина масляной пленки увеличивается, и могут возникнуть условия полужидкостного трения. Увеличение частоты вращения коленчатого вала, температуры, повышение давления на поршневые кольца приводит к распространению зоны полусухого трения [29,35,45,59]. Граничная фаза масляной плёнки, находясь под двусторонним воздействием молекулярных сил, приобретает: квазитвёрдое состояние с расклинивающим давлением, оказывающим сильное сопротивление образованию металлического контакта; скользкое состояние, напоминающее мыло, смоченное водой. Указанные свойства предохраняют трущиеся поверхности от разрушения. [19,26,34,35,59].

Реверсирование в значительной степени влияет на износ деталей в паре трения. По сравнению с однонаправленным скольжением при реверсированном скольжении износ деталей увеличивается в 1,5-2 раза в результате образования зон, где практически отсутствуют внутренние напряжения и понижена микротвердость [28,30,59].

Большое значение для износостойкости пар трения имеют геометрические размеры и твердость деталей пары трения. Сопряжение «гильза-поршень» является обратной парой трения, как по геометрии, так и по материалам. В такой паре трения твердость и площадь подвижной детали меньше

твердости и площади трения неподвижной детали. Исследования показывают, что суммарный износ деталей пары обратной по геометрии и материалам в 3,5 раза выше, чем у прямой пары, имеющей обратное соотношение площади и твердости поверхностей трения [45,46,60].

Гильзы цилиндров ДВС работают в условиях высокотемпературного износа и должны соответствовать целому ряду важных параметров. Во-первых, гильза должна быть износостойкой и иметь низкий коэффициент трения. Во-вторых, сохранять в процессе работы стабильные размеры и при этом выдерживать высокие давления, механические и тепловые нагрузки, а также обладать хорошей теплопроводностью и коррозионной стойкостью в активных средах.

Для обеспечения перечисленных технических требований к качеству гильз цилиндров при формировании поверхностей трения необходимо обеспечивать получение оптимальных триботехнических характеристик сопрягаемых поверхностей, таких как низкий коэффициент трения, высокая износостойкость, оптимальные физико-механические свойства, что требует дополнительных мероприятий по повышению их износостойкости, особенно после ремонта [3].

## **1.2 Анализ существующих способов восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания**

Основным дефектом гильз цилиндров, отработавших межремонтный ресурс, является износ рабочей поверхности трения. Износ рабочей поверхности трения гильзы является сложным трехступенчатым процессом, включающим в себя адгезию, коррозию и абразивный износ. Трещины, сколы, забоины и задиры гильз являются результатом неправильной сборки или разборки двигателей, хранения или транспортировки ремфонда, а также аварийным состоянием ЦПГ. Такие гильзы 100% бракуются. Наибольший износ гильзы, как правило, находится в сечении, соответствующем положению верхнего компрессионного кольца в мертвой точке и является определяющим

с точки зрения ремонтпригодности. [5, 19, 41, 44]. Основные дефекты гильз цилиндров отработавших межремонтный ресурс представлены на рисунке 1.3 [4, 5, 19, 41, 44-46, 61].



Рисунок 1.3 – Основные дефекты гильз цилиндров

В настоящее время разработано несколько способов восстановления и упрочнения рабочей поверхности гильз цилиндров автотракторных двигателей (рис.1.4), которые по своей технологии делятся на расточку под ремонтный размер и восстановление до номинального размера [5, 61].

Наиболее широко распространенным способом восстановления внутренней поверхности гильзы является *обработка под ремонтный размер*. Предприятие-изготовитель двигателя устанавливает ремонтные размеры для гильз цилиндров, как правило, они имеют один ремонтный размер, увеличенный на 0,3 мм; 0,4 мм; 0,5 мм или 0,7 мм (иногда устанавливается и второй ремонтный размер). Изношенные гильзы двигателей УМЗ-417 заменяют новыми: номинального ( $\varnothing 92$ ) или ремонтного размеров (92,5; 93,0 и 93,5 мм). Гильзы дизелей имеют один ремонтный размер, увеличенный на 0,5 или 0,7 мм [19, 61].

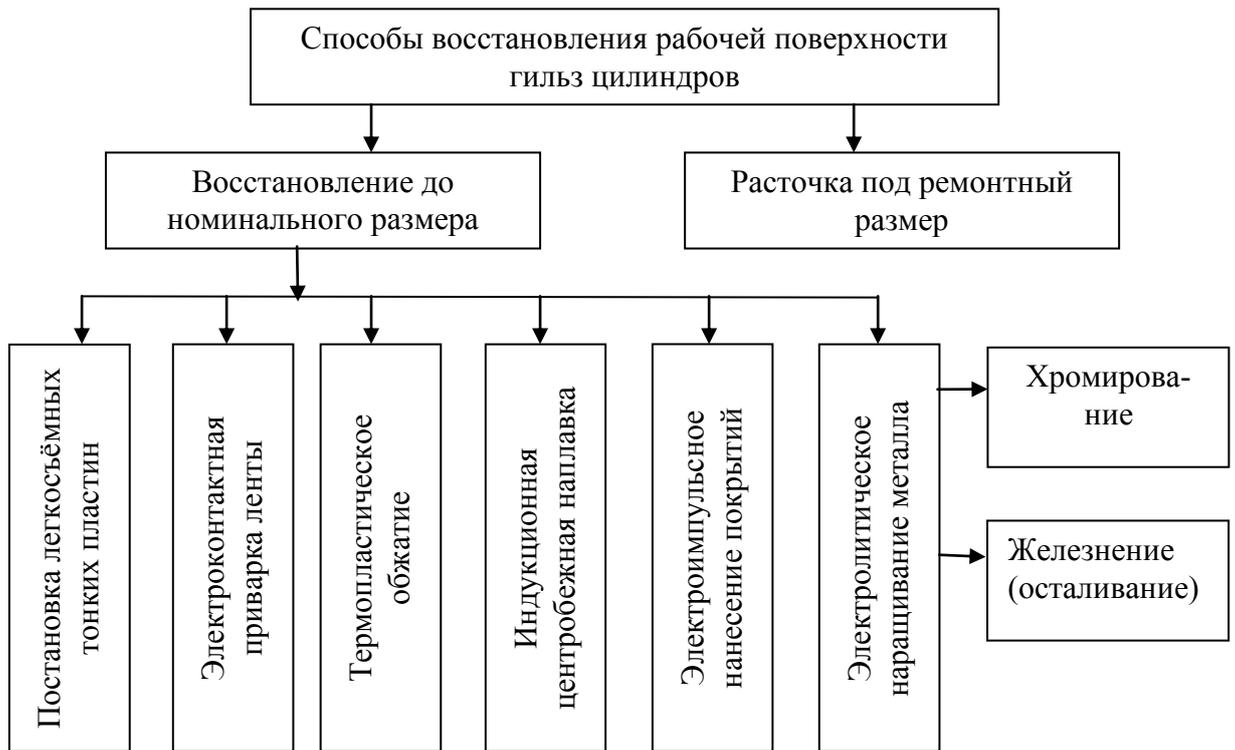


Рисунок 1.4 – Способы восстановления рабочей поверхности гильз цилиндров

Схема маршрутов восстановления гильз методом ремонтных размеров представлена на рисунке 1.5.

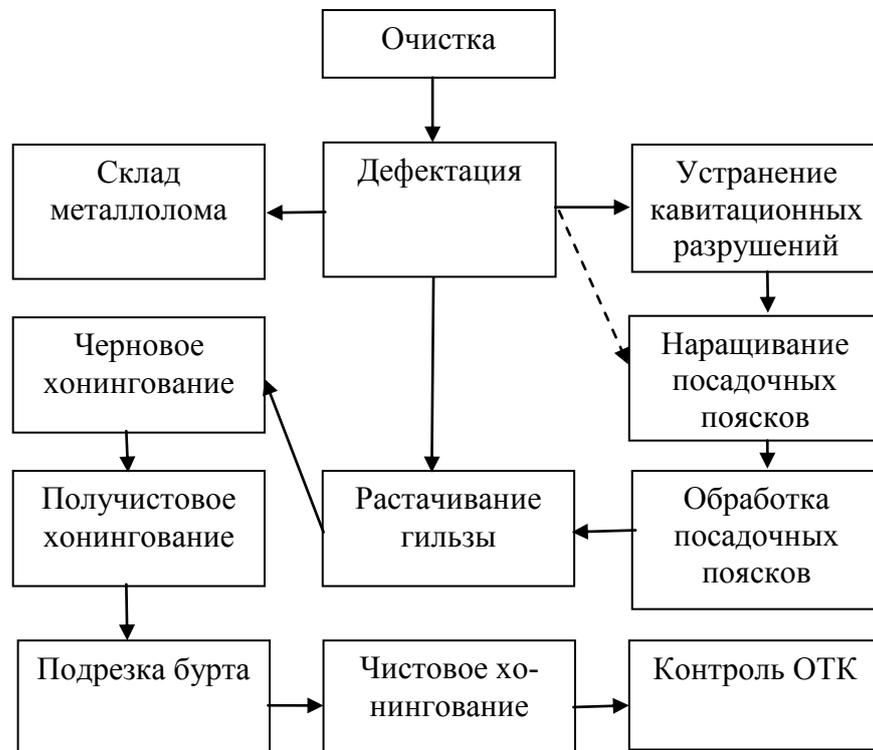


Рисунок 1.5 - Схема маршрутов технологического процесса восстановления гильз цилиндров методом ремонтных размеров

Очистка гильз от накипи и следов коррозии наиболее эффективна металлическим песком в специальной установке. В качестве очищающей среды используют косточковую или пластмассовую крошку, стеклянные шарики и гранулы сухого льда. Косточковая крошка (дробленая скорлупа фруктовых косточек) подается потоком сжатого воздуха, движущегося с высокой скоростью, на поверхность с нагаром под давлением 0,3...0,6 МПа. Частицы, с силой ударяясь о поверхность детали, разрушают и удаляют нагар и другие загрязнения, не нарушая при этом, шероховатости поверхности детали.

Кавитационные повреждения чаще всего устраняют нанесением на предварительно подготовленную и подогретую до температуры 60 °С поверхность композиции на основе эпоксидной смолы. Разработан более простой метод электроконтактной приварки стальной пластины. Пластина из стали 10 или 20 толщиной 0,3 мм должна на 5...10 мм перекрывать повреждённый участок.

Посадочный верхний и нижний пояски восстанавливают электроконтактной приваркой ленты, металлизацией, нанесением полимерных материалов, гальваническим железнением, электроконтактным нанесением (электронатиранием) железцинкового сплава.

Обычно гильзу растачивают и подвергают двух - или трёхкратному хонингованию. Растачивают гильзы на станках модели 278 или 287Н за один проход резцами с пластинками из сплавов ВК2 или ВК3. Многие предприятия вместо растачивания применяют шлифование внутренней поверхности на специальных бесцентрово-шлифовальных станках типа СШ-22, СШ-64 и др. Гильзу устанавливают в приспособление и шлифуют кругами из белого электрокорунда зернистостью 40 среднемягкой твёрдости. Шлифуют гильзы за два перехода: черновое и чистовое шлифование. При чистовом шлифовании в 2 раза уменьшают поперечную и продольную подачи. Затем выполняют зачистные ходы без поперечной подачи.

После растачивания или шлифования гильзы цилиндров двигателя хонингуют на станках 3А83, 3М83. При черновом хонинговании снимают ос-

новную долю припуска и исправляют погрешности геометрической формы отверстия (овальность, конусность и др.) после растачивания или шлифования, а при чистовом – уменьшают шероховатость поверхности [19, 28,46].

Изношенный торец опорного бурта подрезают до выведения следов износа перед последней операцией хонингования [19,46].

После восстановления гильзы контролируют в соответствии с техническими требованиями и сортируют на размерные группы по диаметру внутренней поверхности.

Гильзы цилиндров, вышедшие за ремонтный размер или неимеющие ремонтные размеры, восстанавливают одним из следующих методов [19, 28,46]:

При ремонте *постановкой легкосъёмных тонких пластин* гильзу растачивают и хонингуют под определённый размер. Затем в неё с помощью приспособления запрессовывают стальные вставки, изготовленные из холоднокатаной термообработанной калиброванной тонкой (0,5...1,0 мм) ленты из стали У8А, У10А, 70С2ХА, 40КХНМ, ОХ17Н7ГТ, ОХ17ГТ-ВИ и др. Натяг при запрессовке составляет 0,15...0,18 мм, твёрдость ленты НРС 45...55. После запрессовки пластин гильзы подвергают черновому и чистовому хонингованию. Ресурс таких гильз равен ресурсу новых гильз. При повторном восстановлении изношенные пластины выпрессовывают и заменяют на новые [19,63].

Достоинство восстановления гильз *электроконтактной приваркой ленты* по сравнению с рассмотренным ранее способом заключается в том, что в данном случае используют дешёвую и недефицитную ленту из стали 40,45,50 и др. Высокая твёрдость и износостойкость гильзы обеспечиваются за счёт самозакалки ленты при её приварке. Возможна также приварка порошков [19,45,63,64-66].

Сущность способа восстановления гильз *термопластическим обжатием* состоит в том, что гильзу помещают в охлаждаемую водой матрицу. Внутри гильзы вводят индуктор ТВЧ и нагревают её. При нагреве выше температуры 900°С происходят структурные превращения и необходимый рост

зерна чугуна. Вследствие ограничения матрицей свободного расширения в гильзе нарастают температурные внутренние напряжения и при их определённом значении развиваются пластические деформации в радиальном направлении. В результате этого уменьшается диаметр внутренней поверхности. Износостойкость восстановленных гильз равна износостойкости новых гильз [19,63,67].

Перед *индукционной центробежной наплавкой* гильзу в верхней, наиболее изношенной части (на длине 65...70 мм) растачивают на глубину 0,5 мм. Подготовленную гильзу закрепляют в патроне автоматизированной установки и вращают с частотой 750...950 мин<sup>-1</sup>. В расточку подают шихту, состоящую из флюса и порошка ПГ-ХН80СР4. Под действием центробежных сил шихта равномерно распределяется по поверхности гильзы. Внутри гильзы вводят индуктор ТВЧ и расплавляют шихту. После охлаждения гильзы до температуры 200...300°C останавливают её вращение. Далее проводят высокотемпературный отпуск для снятия внутренних напряжений, расточку и хонингование. Твёрдость наплавленной поверхности составляет HRC 55...58, износостойкость увеличивается в 4...6 раз. При такой технологии ресурс отремонтированных двигателей повышается на 80% [19,68].

*Электроимпульсное нанесение покрытий* основано на импульсном разряде конденсатора через проволоку напыляемого металла. При этом происходит взрывное плавление проволоки и осаждение расплавленных мелких частиц металла на внутренней поверхности гильзы.

Образующиеся при взрывном разряде капли напыляемого металла можно разделить на две группы, к одной из которых относятся частицы размером несколько микрометров, а к другой - размером несколько сотых долей микрометра. Покрытие образуется за счет осаждения на поверхности частиц первой группы, тогда как частицы второй группы улетучиваются, превращаясь в аэрозоли. При недостаточном уровне энергии разряда металлическая проволока расплавляется без взрыва, а при чрезмерном уровне энергии - полностью переходит в газообразное состояние. И в том и в другом случае

напыление невозможно. Своеобразие электроимпульсного нанесения покрытий связано с особо малым размером частиц в мелкораспыленном состоянии напыляемого материала. При температуре распылений, которая, как считают, близка к точке кипения металла проволоки, все частицы в мелкораспыленном состоянии нагреваются равномерно. При столкновении с поверхностью основного материала скорость движения частиц достигает нескольких сотен метров в секунду. Движение частиц к основному материалу происходит за счет резкого расширения газа при взрыве и вытеснения воздуха из зоны взрыва, что почти полностью исключает окисление частиц, и, следовательно, обеспечивает получение плотного покрытия с высокой прочностью сцепления с основным материалом [69,70].

*Электролитическое наращивание металла* на изношенные поверхности деталей основано на образовании в водных растворах солей, кислот и щелочей (электролитов) при пропускании через них постоянного электрического тока заряженных частиц — ионов. При прохождении постоянного тока через электролит положительно заряженные ионы (металлы, водород) движутся к катоду-электроду, соединенному с отрицательным полюсом источника тока, а отрицательно заряженные ионы (кислотный и водный остаток) — к аноду-электроду, соединенному с положительным полюсом источника тока. Достигнув анода или катода, ионы теряют свой электрический заряд и выделяются на них в виде нейтральных атомов, образуя со временем на поверхности детали необходимое покрытие. Обычно катодами являются восстанавливаемые детали, а анодами — различные металлы. В ремонтной практике при электролитическом наращивании используют осадки хрома или железа. Электролитическое наращивание хрома называют хромированием, а железа — железнением или осталиванием.

*Хромирование* применяют в тех случаях, когда от покрытия требуется высокая твердость. Такие покрытия обладают низким коэффициентом трения и большой износостойкостью, в несколько раз превышающей износостойкость стальных нехромированных деталей. Кроме того, хромовое покрытие

прочно соединяется с основным металлом и имеет высокую коррозионную стойкость, а хромирование не вызывает изменения структуры и физико-механических свойств основного металла. Хромирование применяют при восстановлении деталей с небольшим износом, измеряемым десятими и сотыми долями миллиметра. Малая толщина хромового покрытия, редко превышающая 0,3...0,5 мм, объясняется хрупкостью осадков хрома [19,33,71-75].

*Железнение (осталивание)* является одним из способов восстановления чугуновых деталей. При восстановлении гильз цилиндров используют сплавы Fe – P, Fe – Ni – P и др., с помощью которых получают железо-фосфорные покрытия толщиной до 1 мм со скоростью осаждения 0,25...0,35 мм/ч. Содержание фосфора в сплаве составляет 7...10%, микротвёрдость его в исходном состоянии 7000...8000 МПа. Сплавы железа с фосфором применяют для восстановления гильз цилиндров потому, что при нагреве их до температуры более 250°C микротвёрдость покрытий не снижается, а, наоборот, повышается за счёт образования фосфидов железа. В результате этого резко увеличивается износостойкость, а также улучшается сцепляемость с основным металлом. После термообработки таких покрытий при температуре 400°C в течение 1ч их микротвёрдость достигает 16000 МПа, износостойкость более чем в 2 раза превосходит износостойкость закалённой стали 45 и более чем в 10 раз – износостойкость обычного электролитического железа [19,46,69,76-78].

Основными характерными недостатками приведенных выше способов, вследствие которых они не получили широкого распространения в ремонтном производстве, являются:

- обработка под ремонтный размер – резкое (на 20...30%) снижение их ресурса из-за уменьшения твёрдости поверхности;

- постановка легкосъёмных тонких пластин - ухудшает условия теплопередачи через стенку гильзы, что может вызывать нарушение посадки пластин в гильзе, их проворачивание и задир гильзы цилиндров, а также требует строго соблюдения технологического процесса, нарушение которого может

привести к возникновению дефектов вплоть до аварии из-за разрыва гильз, вырывания пластин и обрыва поршней;

- электроконтактная приварка стальной ленты - вызывает повышенный износ поршневых колец и, соответственно, расход масла на угар;

- термопластическое обжатие - требует дополнительных исследований в части управляемости процесса обжатия, получения требуемой усадки за один проход;

- электроимпульсное нанесение покрытий - непригоден для восстановления гильз с большой величиной износа, так как данным способом невозможно получение покрытий большой толщины;

- металлизация – низкая адгезионная прочность, использование дорогих материалов, сложность мехобработки и высокий уровень шума;

- остаивание – низкая износостойкость, сложность мехобработки, высокая трудоемкость;

- хромирование – низкая производительность, высокая стоимость процесса, недостаточная смачиваемость и прирабатываемость поверхности;

- пластинирование – высокая степень точности всех операций, повышенный износ поршневых колец и угар масла, нарушение теплообмена в стенках гильзы;

- центробежное напекание – значительные деформации, высокая стоимость материалов, сложность мехобработки.

Кроме того, практически все эти способы оказывают неблагоприятное влияние на экологию [5].

Из вышеизложенного следует, что методы упрочнения рабочей поверхности гильз цилиндров как широко распространённые, так и альтернативные, должны в результате воздействия на неё устранять недостатки, вызванные литейным процессом и в зависимости от назначения и химического состава, придавать детали качества, необходимые для обеспечения ресурса работы двигателя. Однако, как видно из приведённого обзора, наработки двигателей до отправки в капитальный ремонт, в том числе с указанными ме-

тодами упрочнения, в реальных условиях эксплуатации существенно ниже нормативных.

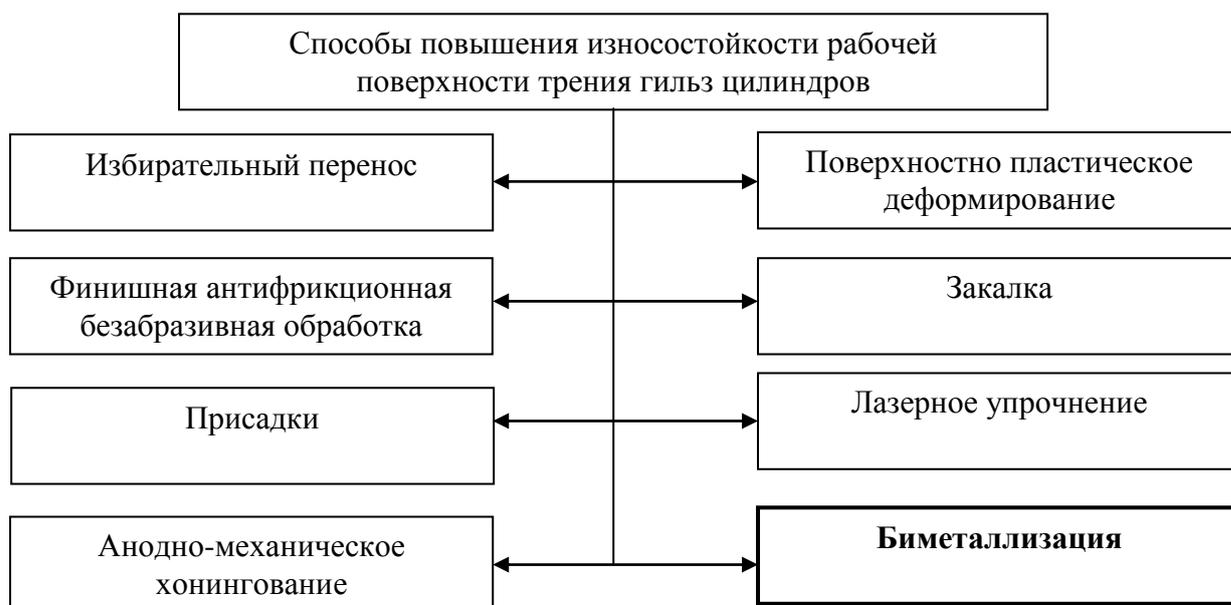
Таким образом, поиск новых способов и методов упрочнения рабочей поверхности гильзы цилиндров для нынешнего состояния автомобильного двигателестроения является объективной необходимостью.

### **1.3 Пути повышения износостойкости гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания**

Проблема износостойкости деталей машин — это проблема их долговечности и надежности. Учет физико-химических процессов, протекающих в поверхностных слоях трущихся тел, приводит к пересмотру традиционных представлений о методах борьбы с износом. Ранее для повышения износостойкости стремились повысить твердость трущихся поверхностей. Этот способ частично обеспечивал выполнение поставленной задачи, однако он не смог удовлетворять всем требованиям из-за небольшой площади фактического контакта поверхностей трения [22, 28-30,34, 43, 79,80,81].

Усилия защитить поверхностный слой от изнашивания разделением трущихся поверхностей слоем смазочного материала, посредством пленок химических соединений (окислов) и увеличением твердости или прочности самого материала оказались недостаточно эффективными. Рассмотрим наиболее широко применяемые (рис. 1.6) пути повышения износостойкости рабочей поверхности трения гильз цилиндров.

Д.Н. Гаркунов и И.В. Крагельский предложили принципиально новый путь борьбы с износом, заключающийся в предельном снижении прочности поверхностного слоя и освобождении его от пленок, мешающих свободному формоизменению. Этот способ получил название эффекта «избирательного переноса» или эффект безызности [28,43].



*Рисунок 1.6 - Способы повышения износостойкости рабочей поверхности трения гильз цилиндров*

*Избирательный перенос* реализуется при трении стали по определенным медным сплавам (например, по некоторым бронзам или латуням) в ряде сред (прежде всего в глицерине, спиртоглицериновых средах, морской воде и т. д.) в определенных интервалах изменения условий работы соединения [82-84]. Под действием глицерина (или другой среды) при трении начинается избирательное анодное растворение легирующих бронзу элементов. Атомы этих элементов уносятся в смазочную среду, а поверхность бронзы обогащается медью. В восстановительной среде, которой является глицерин, эта медь не окисляется и поэтому очень активна. Она легко схватывается со стальной поверхностью, покрывая ее тонким слоем. В этом слое возникает большое количество вакансий, часть которых образует поры, заполняемые молекулами глицерина. В результате образуется так называемая сервовитная пленка толщиной 1...2 мкм, которая имеет низкую прочность на сдвиг и не наклёпывается при трении. Она прекрасно адсорбирует активные компоненты среды, прежде всего комплексные соединения, образуемые растворенными элементами сплава и продуктами механохимических превращений смазочной среды. Кроме того, обладая высокой теплопроводностью, она способствует сни-

жению температуры поверхности трения путем отвода теплоты в глубинные слои материала [26,28-30,81,85-89].

Избирательный перенос, к сожалению, реализуется лишь при определенных сочетаниях материалов трущихся тел и смазочных материалов в определенном, достаточно узком интервале изменения действующих факторов (нагрузочных, скоростных и особенно температурных).

Как известно, износостойкость зависит от окончательной (финишной) технологической обработки поверхностей деталей. К такому способу относится разработанная *финишная антифрикционная безабразивная обработка*. Сущность ФАБО состоит в том, что поверхность трения детали покрывается тонким слоем латуни, бронзы или меди путем использования явления переноса металла при трении. Перед нанесением покрытия обрабатываемую поверхность обезжиривают и покрывают глицерином или смесью, состоящей из двух частей глицерина и одной части 10 %-ного раствора соляной кислоты. В процессе трения окисная пленка на поверхности стали разрыхляется, поверхность медного сплава пластифицируется, и создаются условия для его схватывания со сталью. Толщина перенесенного слоя бронзы или латуни 1-2 мкм. Преимущество ФАБО перед другими финишными операциями состоит в том, что этот метод чрезвычайно прост и не требует сложного оборудования. ФАБО придает стальной или чугунной поверхности высокие антифрикционные свойства. Опыт использования ФАБО для цилиндров двигателей внутреннего сгорания позволяет уменьшить время приработки и увеличить износостойкость гильз цилиндров в 1,6...1,75 раза, а работающих в паре с ними поршневых колец – в 1,35...1,4раза [81,90-93].

Широкое распространение для повышения износостойкости деталей двигателей получили специальные *присадки*, применяемые как на этапе обкатки двигателя, так и в период его эксплуатации.

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

Присадки с использованием ПАВ ( ДФИ – 1; ОГМ – 1, 2, 3 и другие )  
Поверхностно-активные вещества образуют на поверхностях трения прочную адгезионную пленку, которая снижает трение, препятствует повышенным износам при работе с большими нагрузками. Необходимо отметить, что действие ПАВ ухудшается при высоких температурах, что может вызвать снижение противозадирных свойств [94].

Инактивные присадки ( Градис; АЛП – 1,2; Моликот – А; Ресурс; Ремол – 1; Деста – М; Гарант и др. ). Общим недостатком инактивных веществ является то, что они, заполняя впадины микровыступов, не изменяют характер поверхности, поверхность под слоем присадки остается прежней, 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 [95,96].

Химически – активные присадки (ОМ-2; ОКМ; ДК-8 [123,124]) 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.

К присадкам, реализующим эффект избирательного переноса (ИП) – при приработке деталей, относится композиция КТЦМС. 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 [82,83]. Недостаток композиции – трудность приготовления в заводских условиях. Присадка характеризуется общетоксичным действием [97].

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) [98]. В результате действия этой присадки на поверхностях трения образуются плёнки меди, заполняющие микронеровности и препятствующие задирам и схватываниям.

В.В.Сафонов [99] на основе ультрадисперсных порошков разработал прирабочую 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-Г<sub>2</sub>.

Повысить износостойкость гильз цилиндров возможно способом *анодно-механического хонингования* (АМХ) с применением металлических хонинговальных брусков из меди, латуни, стали или чугуна, что позволит использовать не только электрохимическую, но и электроэрозионную составляющие процесса, а, также нанести антифрикционный слой.

При АМО съём металла происходит за счет электроэрозионных и электрохимических явлений. В любом режиме в межэлектродном промежутке протекают соответствующие электрохимические процессы, поскольку рабочей жидкостью является электролит. Электрические разряды, возникающие между электродами и обуславливающие электроэрозию, можно рассматривать как отдельные источники тепла быстро движущиеся по поверхности электрода-заготовки. При этом тепло распространяется вглубь металла по законам теплопроводности. Глубина проникновения тепла будет зависеть от мощности электрического разряда, скорости движения электродов, свойств окружающей среды и т.д. Вокруг быстро движущейся точки образуются температурные зоны сферической формы. В той зоне, где нагрев достигает температуры плавления и выше, металл плавится, частично испаряется и, удаляясь потоком рабочей жидкости и электрод-инструментом, образует лунки. В последующих нижележащих зонах происходит изменение структуры. В зоне,

где температура достигает температуры закалки и выше появляется так называемый «белый» слой, который характеризуется низкой травимостью, высокой твердостью и износостойкостью. Используя эти свойства «белого» слоя, можно повысить ресурс гильз цилиндров.

Однако «белый» слой имеет неравномерную толщину и сплошность, а также изобилует порами и трещинами. Поэтому получение «белого» слоя анодно-механическим методом оказалось нецелесообразно. Обработку гильз цилиндров следует проводить на режимах, допускающих появления «белого» слоя небольшой толщины. Лабораторные и эксплуатационные исследования показали, что износостойкость поверхности гильз цилиндров обработанной АМХ на 20...22% выше износостойкости поверхности после алмазного хонингования. Время приработки поверхности также сократилось [1,100,101].

*Поверхностное пластическое деформирование (ППД)* – эффективный способ повышения износостойкости трущихся поверхностей детали в условиях граничного трения, основанный на использовании пластических свойств материала. В результате такой обработки удаляются риски и микротрещины от предыдущей обработки, увеличиваются твердость, износо- и коррозионостойкость поверхности и её усталостная прочность. Для повышения износостойкости гильз цилиндров применяют обычно раскатку шариками или роликами, как в виде самостоятельной операции, так и совмещенной с операциями расточки, хонингования, доводки [45,46,35,102-108].

Поверхностный слой, раскатанный при оптимальных режимах, имеет повышенную (на 18-27%) микротвердость. Толщина слоя с повышенной микротвердостью колеблется в пределах 0,05-0,5 мм: чем больше диаметр деформирующего элемента, тем толще слой с повышенной микротвердостью. Несомненным положительным моментом следует считать, что ППД является окончательной операцией и возможна как в промышленном, так и в ремонтном производстве.

В результате поверхностного пластического деформирования предел выносливости повышается на 40...100%, период приработки гильз снижается

на 66%, износ за период приработки в 1,1...1,8 раза меньше, чем у гильз без обработки [63,102,103,107].

Существенным недостатком этого метода является малая толщина антифрикционного слоя (до 5 мкм), что в условиях ведущего абразивного изнашивания будет недостаточно и, как следствие, может вызвать другие виды износа, уменьшая ресурс гильзы [103,104].

С целью повышения износостойкости рабочей поверхности гильз в современном автомобильном двигателестроении для большинства гильз цилиндров двигателей, в том числе и зарубежных, применяется её *закалка*. Термообработка закалкой серого чугуна с перлитной структурой позволяет преобразовать его в чугун с мартенситной структурой. Закалка гильз, проводимая токами высокой частоты (ТВЧ), позволяет получить рабочую поверхность, упрочнённую на глубину до 2,5 мм. Её твёрдость после закалки ТВЧ достигает 38...48 HRC в зависимости от различных факторов. Удельный износ таких гильз составляет в зависимости от условий эксплуатации автомобиля 0,5...2,0 мкм/1000 км. Достаточная глубина закалённого слоя позволяет производить перешлифовку гильз под ремонтные размеры, что увеличивает ресурс её работы [79,109-112].

Однако при закалке рабочей поверхности гильз ТВЧ существует большая вероятность геометрической деформации, образования трещин на закаливаемой поверхности, получения неоднородной твёрдости как по окружности, так и по высоте, неоднородности структуры (наличие обособленных микроучастков структурно-свободного феррита в структуре закалённого слоя и т.п.), что является причиной повышенного износа гильз цилиндров. Для предотвращения этих нежелательных дефектов исследователи подбирают оптимальные режимы закалки (время нагрева под закалку, наличие подогрева перед закалкой, интенсивность наружного и (или) внутреннего охлаждения и т.д.) для каждого определённого химического состава чугуна [109-112].

При *лазерном упрочнении* гильзы цилиндров на её внутренней поверхности лазером наносят отдельные равноудаленные полоски под углом 45° к

образующей гильзы так, что полосы образуют на поверхности сетку. Глубина зоны упрочнения составляет 0,5...1,0 мм, толщина дорожки до 0,5 мм, припуск на окончательную механическую обработку составляет 0,1...0,2 мм. В результате обработки наблюдается уменьшение интенсивности изнашивания в 1,3...1,6 раза [63,109,113-116].

Следует отметить, при обработке лазерным излучением графит, находящийся на рабочей поверхности гильзы цилиндра, выгорает под действием высоких температур, что приводит к увеличению шероховатости поверхности и ряду других, отрицательных при работе детали последствий. Также необходимо дорогое оборудование для проведения лазерной закалки, вследствие чего использование лазерной обработки целесообразно при поточном и массовом производстве в случае, когда другие способы упрочнения не дают желаемого результата [64,65,69,77,109,113-119].

В работах [7, 120-131] предложен способ *биметаллизации* поверхности трения путём создания в теле основного материала упорядоченных или неупорядоченных вставок, вкраплений, слоёв и пр. из материала, имеющего отличные от основного физико-механические свойства [131].

При изнашивании поверхности трения с изменёнными физико-механическими характеристиками происходит разрушение основного материала (чугуна гильзы) и более пластичного цветного металла (меди, латуни). Для меди и её сплавов характерны пластические деформации при взаимодействии микронеровностей. Пластичный цветной металл и частицы его износа, находясь непосредственно в зоне трения, взаимодействуют с трущимися микронеровностями, «намазываются» на площадки контакта микронеровностей. Образующаяся между ними плёнка обладает низким сопротивлением сдвигу и удерживается на поверхностях трения за счёт молекулярных («Ван-дер-ваальсовых») сил. Таким образом, снижение износа связано со следующими процессами. Микронеровности, присутствующие на поверхности трения, попадая в зону пластических деформаций (медь, латунь), углубляются на величину, большую, чем это происходит в зоне упругих деформаций. При

выходе из зоны пластических деформаций в зону упругих деформаций микронеровность попадает на режущую кромку упругого слоя и срезается, а клин пластического материала, находящийся перед микронеровностью, разъединяет сопряженные поверхности и увлекается движущейся микронеровностью до ближайшей впадины, заполняя её. Одновременно происходят химические процессы образования шпинели, которая, попадая во впадины поверхности, повышает её сопротивление нормальным нагрузкам [6,131].

Преимущество данного способа заключается в том, что отпадает необходимость в постоянном пополнении, как в случае с микропорошками, запасов меди, участвующей в процессе трения. Кроме того, образовавшаяся в результате химических реакций шпинель  $ZnFe_2O_4$  является высокотемпературным нейтрализатором отработавших газов камеры сгорания [6,131].

В результате исследований авторов [120-131] было использовано несколько вариантов изменения физико-механических характеристик поверхностей деталей путём прослаивания в поперечном направлении цветными металлами и сплавами (медью, латунью, бронзой, медью и цинком). Согласно результатам их исследований установлено, что лучшую износостойкость имеют образцы, прослоенные в поперечном сечении медью, по сравнению со сплошным образцом и образцами, прослоенными другими цветными металлами.

Интенсивность изнашивания образцов зависит также от отношения площади трения поперечного слоя, изменяющего физико-механические свойства поверхности трения, к площади трения образца, которая в исследованиях изменялась в зависимости от угла наклона поперечного слоя к ширине образца  $\alpha$ . Было установлено, что интенсивность изнашивания изменяется в зависимости от угла наклона поперечного слоя к ширине образца. Эта зависимость имеет одинаковый характер для образцов с поперечными слоями из меди и латуни.

Таким образом, на основании приведенных выкладок можно сделать вывод, что способ биметаллизации поверхности трения вставками меди по-

зволит улучшить смазывающие свойства трущейся поверхности и повысить её износостойкость.

Однако в литературных источниках отсутствуют данные по биметаллизации рабочей поверхности трения гильз цилиндров бензиновых двигателей для повышения их износостойкости.

#### **1.4 Выводы**

Литературный и патентный обзор показывает, что повышение износостойкости гильз цилиндров достигается различными способами.

Основными характерными недостатками приведенных выше способов, вследствие которых они не получили широкого распространения в ремонтном производстве, являются: низкая адгезионная прочность, использование дорогих материалов, сложность мехобработки, высокая стоимость процесса и др. Кроме того, практически все эти способы оказывают неблагоприятное влияние на экологию.

Наиболее перспективным способом повышения износостойкости внутренней поверхности гильз цилиндров является биметаллизация рабочей поверхности трения путём создания в теле основного материала упорядоченных или неупорядоченных вставок, вкраплений, слоёв и пр. из материала, имеющего отличные от основного физико-механические свойства.

Одним из преимуществ данного способа является то, что отпадает необходимость в постоянном пополнении микропорошков, запасов меди, участвующей в процессе трения или элементов присадок, действующих на протяжении определенного времени.

На основании вышеизложенного целью работы является повышение износостойкости гильз цилиндров бензиновых двигателей биметаллизацией рабочей поверхности трения.

## 2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА БИМЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРОВ

### 2.1 Теория взаимодействия трущихся поверхностей при внешнем трении

Взаимодействие трущихся поверхностей проявляется в формировании пятен контактов, в котором участвуют не только выступы с покрывающими их пленками, но и прилегающие к этим выступам материалы. В процессе контакта происходит деформирование материала трущихся поверхностей.

Поверхностные слои трущихся материалов изменяются, в основном, под действием значительных деформаций, развивающихся в тонком поверхностном слое. Изменение происходит вследствие физического и химического взаимодействия: адсорбционного понижения прочности; диффузионного насыщения элементов из окружающей среды и от контртела, а также окисления.

Таким образом, в трении участвуют материалы, измененные по сравнению с исходными. В связи с этим трение имеет двойственную молекулярно-механическую природу и обусловлено объемным деформированием материала и преодолением межмолекулярных связей, возникающих между сближенными участками трущихся поверхностей.

Поскольку трущиеся поверхности всегда волнисты, шероховаты и неоднородны по своим механическим свойствам, происходит внедрение более жесткого элемента поверхности в более мягкое контртело. Внедрившийся элемент, перемещаясь в тангенциальном направлении, деформирует нижележащий материал, образуя впереди него полусферический валик. Величина валика зависит от относительного внедрения  $\frac{h}{R}$  (где  $h$  - глубина внедрения, мкм,  $R$  - радиус внедрившейся поверхности, мкм), прочности мостика сварки и прочности адгезионной связи  $\frac{\tau}{\sigma_s}$  (где  $\sigma_s$  - предел текучести материала), возникающей между пленками, покрывающими поверхности трущихся тел.

Таким образом, одной из причин возникновения износа является нарушение условий пластического оттеснения материала одной из трущихся поверхностей. Под воздействием нагрузки увеличивается глубина внедрения микронеровностей поверхности, что приводит к переходу от упругой к пластической деформации и далее к микрорезанию или задиру (переход внешнего трения, при контакте двух тел, во внутреннее). Условие прекращения обтекания, соответствующее переходу внешнего трения во внутреннее, описывается выражением [132, 133]:

$$\frac{h}{R} \geq \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{2\tau}{\sigma_T} \right), \quad (2.1)$$

где  $h$  – глубина внедрения, мкм;  $R$  – радиус сферического индентора (внедрившейся поверхности), мкм;  $\tau$  – прочность на срез адгезионной связи, МПа;  $\sigma_T$  – предел текучести материала, МПа.

Как видно из соотношений, для осуществления внешнего трения необходимо, чтобы прочность на сдвиг тонкого поверхностного слоя была бы меньше прочности основного материала. Чем она меньше, тем далее отодвигается порог внешнего трения. Важным фактором, влияющим на данный процесс, является различие между прочностью адгезионной связи и прочностью нижележащих слоев. Если адгезионная связь менее прочна, чем нижележащий слой, то имеет место положительный градиент механических свойств по глубине, т.е. [132, 136]:

$$\frac{d\sigma_x}{dz} > 0, \quad (2.2)$$

где  $\sigma_x$  – разрушающее напряжение в направлении плоскости касания, МПа;  $z$  – координата, перпендикулярная к плоскости касания, мкм.

При этом условии имеет место внешнее трение. Таким образом, для снижения износа и образования положительного градиента, необходимо уменьшить прочность тонкого поверхностного слоя. Это можно сделать следующими методами:

- адсорбционным или хемосорбционным уменьшением прочности на сдвиг тонкого поверхностного слоя;

- введением тонкого слоя постороннего вещества, имеющего меньшее сопротивление на сдвиг, чем основное тело, т.е. смазку;

- введением металлов, имеющих низкое сопротивление на сдвиг.

При этом желательно, чтобы пониженная прочность этого слоя сохранялась в широком диапазоне температур и давлений.

Наиболее перспективным направлением является биметаллизация трущихся поверхностей цветными металлами. При трении пленка биметаллизированного покрытия, вступая в адгезионное взаимодействие, защищает от схватывания лежащую под ней поверхность. Для биметаллизации поверхностей трибоузлов используют медь, латунь, олово и другие сплавы, обладающие более низкой прочностью на сдвиг, чем сталь и чугун.

## **2.2 Теоретическое обоснование применения различных цветных металлов для снижения износа деталей ЦПГ**

Площадь контакта трущихся поверхностей может быть представлена как номинальная  $S_H$  (геометрическая) площадь контакта (рис. 2.1) – геометрическое место всех возможных фактических площадок контакта; контурная площадь касания  $S_K$ , образованная объемным смятием тел (площадь расположения фактических площадей контакта); фактическая (физическая) площадь контакта  $S_\phi$  – представляющая собой сумму фактических малых площадок контактов тел.

Процесс работы трибоузла происходит следующим образом. Под влиянием приложенной нагрузки отдельные контактирующие неровности сжимаются, через них передается нагрузка на волнистое основание поверхности. Две поверхности сближаются, и в соприкосновение входит все большее количество отдельных выступов. Одновременно увеличивается площадь смятия вершин волн. Таким образом, происходит изменение фактической площади касания.

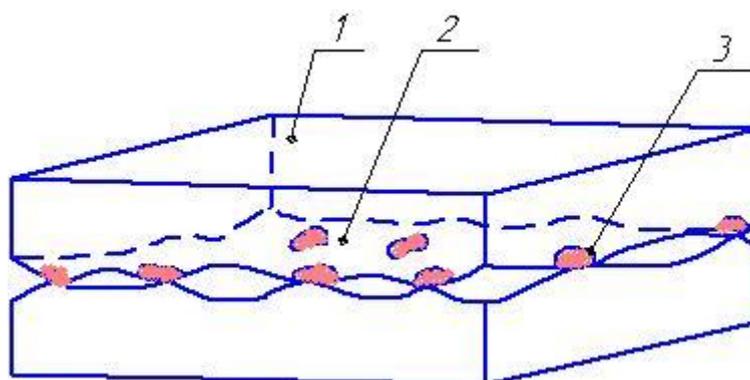


Рисунок 2.1 - Схема контакта поверхностей: 1 – номинальная площадь контакта; 2 – контурная площадь контакта; 3 – фактическая площадь контакта

Для расчета площади контакта используются следующие расчетные модели:

- упругое контактирование в виде набора сфер;
- контактирование единичных неровностей;
- упруго-пластическое контактирование с жесткой плоскостью.

Проведя анализ существующих расчетных моделей, можно заключить, что определение площади контакта может быть проведено по формуле [132]:

$$S_K = 3,4 \left[ \frac{P_C}{E} \left( \frac{R_B^{\frac{1}{2}}}{h_{\max}^{\frac{1}{2}}} \right) \right]^{\frac{10}{11}}, \quad (2.3)$$

где  $P_C$  – контурное давление, МПа;  $E$  – модуль упругости, МПа;  $R_B$  – радиус выступов, мкм;  $h_{\max}$  – высота выступов, мкм.

Как видно, площадь касания зависит от нагрузки в трибоузле, расположением неровностей по высоте, их геометрическим очертанием и механических свойств, из которых наиболее существенным является модуль упругости. Таким образом, для снижения износа (предотвращения образования локальных мест деформации материала трущихся поверхностей) необходимо увеличить площадь контакта. Это возможно за счет увеличения чистоты обработки трущихся поверхностей при их изготовлении. Однако в настоящее время это практически не возможно. Поэтому решение данной проблемы возможно использованием биметаллизации трущихся поверхностей цветны-

ми металлами. При покрытии трущейся поверхности более мягкими металлами, в процессе приработки, происходит заполнение впадин и выравнивание общей поверхности, что позволяет увеличить площадь контакта. Кроме того, эти металлы имеют меньшую прочность на сдвиг, чем основной материал, что позволяет реализовать положительный градиент механических свойств по глубине (2.2) и предотвратить переход внешнего трения во внутреннее.

Эффективность использования для биметаллизации различных металлов может быть оценена по величине коэффициента трения [133]:

$$f = f_{адз} + f_{деф} = \frac{\tau}{P_c} + \beta + K \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (2.4)$$

где  $f_{адз}$  - адгезионный коэффициент трения;  $f_{деф}$  - деформационный коэффициент трения;  $\beta$  - коэффициент, зависящий от геометрических параметров поверхности;  $K$  - количество выступов на трущейся поверхности.

Поскольку деформационная составляющая не велика, ею можно пренебречь

$$f = f_{адз} = \left(\frac{R}{h}\right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau}{P_c^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta. \quad (2.5)$$

Как видно, адгезионная составляющая определяется отношением тангенциальной прочности адгезионной связи к модулю упругости и гладкостью поверхности.

Исходя из этого, для биметаллизации трущихся поверхностей необходимо выбирать металл, имеющий минимальную тангенциальную прочность и наибольший модуль упругости. Из существующих цветных металлов, доступных для широкого использования, наиболее всех подходит медь, имеющая  $E = 12,3 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , в то время как латунь  $9,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ , а бронза –  $10,8 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ .

Причина переноса металла на поверхность заключается в том, что поверхностная энергия твердых тел различна [134]. Поэтому контактное тело с меньшей поверхностной энергией стремится намазаться на тело с большей поверхностной энергией, при этом необходимо условие, что намазывающее -

ся тело должно быть пластичным.

Таблица 2.1 - Данные поверхностной энергии металлов

Металл	Свинец	Олово	Алюминий	Медь	Латунь	Сталь
Энергия, эрг/мм <sup>2</sup>	900	1200	1800	2200	2600	3000

Поэтому для биметаллизации поверхностей предлагается использовать медь.

### 2.3 Теоретическое обоснование снижения износа за счет вставок из цветного металла

В настоящее время метод биметаллизации поверхностей трибоузлов является дорогостоящим и трудоемким. Поэтому более доступным и экономически целесообразным является метод введения в трущиеся поверхности металлизированных вставок. Вставки имеют определенную ширину, глубину и угол наклона к направлению относительной скорости перемещения трущихся поверхностей. Для осуществления данного метода и определения его эффективности по снижению трения необходимо установить количество вводимого металла и угол наклона вставки к направлению вектора относительной скорости перемещения поверхностей. Если количество металла (весовое или процентное) можно рассчитать, то вопрос по определению угла наклона биметаллизированной вставки остается открытым [135].

В практике износ определяется по одной из следующих характеристик: удельный линейный износ  $I_h$ , весовой  $I_g$  или энергетический  $I_w$ .

Для узлов трения, где важно наличие минимального трения, целесообразно пользоваться линейной интенсивностью износа.

Линейная характеристика износа представляет собой высоту изношенного слоя, который приходится на единицу пути трения

$$I_h = \frac{V}{LS_H}, \quad (2.6)$$

где  $L$  – путь трения, мм;  $V$  – изношенный объем материала, мм<sup>3</sup>.

Весовая характеристика износа представляет собой вес вещества, кото -

рый удаляется с единицы номинальной площади контакта за единицу пути трения

$$I_g = \frac{g}{LS_H}, \quad (2.7)$$

где  $g$  - вес изношенного вещества, мг.

Соотношение между линейной и весовой характеристиками износа определяется следующим соотношением

$$I_g = gI_h. \quad (2.8)$$

Соответственно удельный линейный износ будет равен объему отделяемого материала  $V_M$  при перемещении на расстояние, равное суммарной толщине колец  $\sum \delta_i$ , приходящемуся на единицу фактической площади контакта  $S_\phi$ :

$$I_h = \frac{V_M}{S_\phi \sum \delta_i}. \quad (2.9)$$

Выразив величину отделяемого объема через геометрические характеристики, определим минимальную величину участвующего в деформации объема

$$V = \int_0^\varepsilon \lambda \varepsilon^{\nu+1} d\varepsilon = \frac{1}{\nu+1} \lambda \varepsilon^{\nu+1}, \quad (2.10)$$

где  $\lambda$  и  $\nu$  - параметры опорной поверхности;  $\varepsilon$  - деформация сжатия.

Тогда абсолютное значение деформируемого объема

$$V = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{\nu+1} \sum \delta_i S_\phi. \quad (2.11)$$

Поскольку величина объема, отделяемого за один цикл

$$V_M = \frac{V}{n}, \quad (2.12)$$

где  $n$  - число воздействий, приводящих к отделению материала.

Тогда

$$V_M = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1)n} \sum \delta_i S_\phi. \quad (2.13)$$

Подставив значение  $V_M$  в формулу (2.9), получим удельный линейный износ по длине  $L$ :

$$I_h = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1)n}, \quad (2.14)$$

и удельный весовой износ:

$$I_g = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1)n} g. \quad (2.15)$$

Учитывая давления в зоне контакта  $P_a$  и нормальное давление  $P_H$ , получим:

$$I_h = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1)n} \frac{P_a}{P_H}, \quad (2.16)$$

$$I_g = \frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{(\nu+1)n} \frac{P_a}{P_H} g. \quad (2.17)$$

На основании имеющихся исследований [132], аналитическое выражение физико-механических характеристик соприкасающихся тел и внешних параметров процесса определяется как

$$\frac{\lambda \varepsilon^{\nu+1}}{\nu+1} \approx 0,15 \dots 0,21 \sqrt{\frac{h}{R}}. \quad (2.18)$$

Приняв минимальное значение и преобразовав (2.14) с учетом положительного механического градиента, обеспечивающего внешнее трение в контакте, получим

$$I_h = \frac{0,15}{n} \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{S_\phi}{S_H}, \quad (2.19)$$

$$I_g = \frac{0,15g}{n} \sqrt{\frac{h}{R}} \frac{S_\phi}{S_H}. \quad (2.20)$$

Таким образом, из анализа полученных формул видно, что линейный износ определяется относительной глубиной внедрения  $h$ , числом циклов  $n$  и отношением фактической площади контакта  $S_\phi$  к номинальной  $S_H$ . На основании этого можно сделать заключение, что расчет износа сводится к аналитическому выражению этих величин через физико-механические характери-

стики трущихся поверхностей и внешние параметры процесса (нагрузка, скорость, температура).

Введение вставок цветного металла в трущиеся поверхности изменят соотношение площади контакта.

Для определения количества вставок смоделируем поверхность гильзы набором вставок из цветного металла. В этом случае сечение плоскости гильзы будет иметь слой длиной  $dL$ , который будет содержать некоторое количество торцов вставок (рис. 2.2). Это число, пропорциональное длине слоя  $dL$ , является функцией высоты сечения (длине хода поршня)  $L$ , то есть может быть выражено в виде:

$$dn = N\varphi(L)dL, \quad (2.21)$$

где  $N$  - число вставок модели.

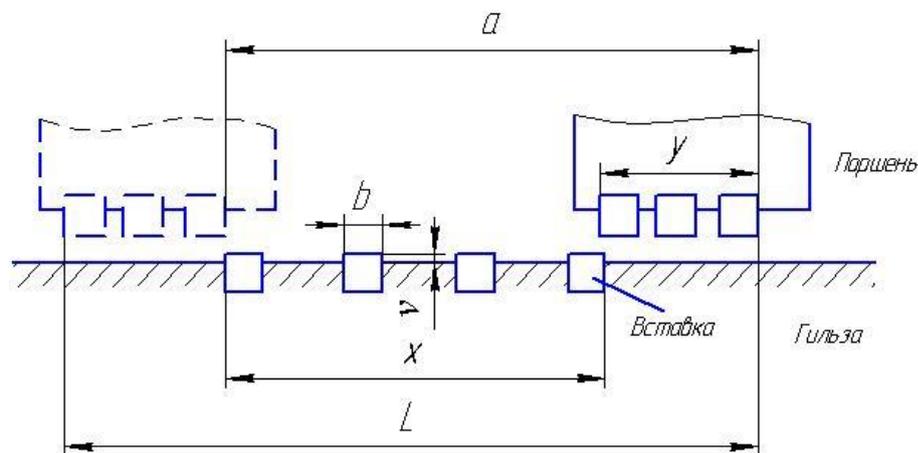


Рисунок 2.2 - Схема контакта поршневых колец с вставками

В данном случае  $\varphi(L)$  будет являться функцией распределения вставок. Поскольку вставки должны располагаться по длине хода поршня, то общее число вставок выражается величиной

$$n_1(x) = N \int_0^x \varphi(L)dL. \quad (2.22)$$

Примем, что количество вставок на поверхности длиной  $x$  гильзы цилиндра  $n_1 = \varphi_1(x)$ ,  $dn_1 = \varphi_1'(x)dx$ , а количество поршневых колец по длине  $y$ , вступающих в контакт с вставками -  $n_2 = \varphi_2(y)$ ,  $dn_2 = \varphi_2'(y)dy$ .

Число контактов при движении поршня представляет собой произведение вероятностей встречи поршневых колец на число вставок металла в гильзе цилиндров:

$$\frac{dn_2}{N} dn_1 = \frac{1}{N} \varphi'_2(y) \varphi'_1(x) dy dx. \quad (2.23)$$

При движении поршня на величину  $x$  (рис. 2.2) число контактов, образовавшихся от соприкосновения поршневых колец с вставками гильзы цилиндров, будет:

$$m_1 = \frac{1}{N} \int_0^x \varphi'_2(y) \varphi'_1(x) dy dx. \quad (2.24)$$

Тогда для всех поршневых колец при перемещении поршня на величину  $x$ , получим:

$$m = \frac{1}{N} \int_0^y dy \int_0^x \varphi'_2(y) \varphi'_1(x) dx. \quad (2.25)$$

Подставив контурную площадь касания вставок  $S_K$  с поршневыми кольцами, получим фактическую площадь касания:

$$S_\phi = S_K \int_0^y dy \int_0^x \varphi'_2(y) \varphi'_1(x) dx. \quad (2.26)$$

Если принять, что нагрузка на одну вставку прямо пропорциональна его деформации, величина нормального давления  $P_H$  в контакте будет выражаться как:

$$P_H = S_K \gamma_1 \gamma_2 k \int_0^a dy \int_0^x \left| ax - \frac{x^2}{2} - xy \right|_0^{a-y}, \quad (2.27)$$

где  $k$  - коэффициент пропорциональности;  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  - коэффициенты, зависящие от материала поршневых колец и вставки металла;  $a$  - длина перемещения поршня, мм.

$$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}, \quad (2.28)$$

где  $k_1$  и  $k_2$  - коэффициенты пропорциональности вставки металла и поршневых колец.

Проинтегрировав выражение (2.26), получим:

$$P_H = S_K \gamma_1 \gamma_2 \frac{ka^3}{6}. \quad (2.29)$$

Тогда площадь фактического контакта может быть определена как:

$$S_\phi = \frac{1,65 S_K \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}}}{k^{\frac{2}{3}}} P_H^{\frac{2}{3}}. \quad (2.30)$$

Коэффициент пропорциональности вставки в поверхность гильзы [133, 137]:

$$k = \frac{E_1}{2b(1 - \mu_1^2)}, \quad (2.31)$$

где  $b$  – ширина вставки металла, мм;  $\mu_1$  - коэффициент Пуассона материала вставки;  $E_1$  – модуль упругости материала вставки, МПа.

Таким образом, зависимость фактической площади контакта от механических свойств материала вставки и геометрических параметров вставки в поверхность гильзы будет выражаться следующей формулой:

$$S_\phi = 1,65 \frac{S_K \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} (E_1 + E_2)^{\frac{2}{3}} \left[ 2b(1 - \mu_1^2) \right]^{\frac{2}{3}}}{(E_1 E_2)^{\frac{2}{3}}} P_H^{\frac{2}{3}}. \quad (2.32)$$

Подставив полученную площадь контакта в формулы (2.18, 2.19) и проведя преобразования, получим зависимость износа от механических свойств материала вставки и геометрических параметров вставки в поверхность гильзы, логично, что относительное внедрение  $\frac{h}{R}$  будет соответствовать высоте вставки над поверхностью гильзы  $\nu$ , то есть:

$$\nu = \sqrt{\frac{h}{R}}, \quad (2.33)$$

тогда:

$$I_h = \frac{0,247\nu S_{\kappa} \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} (E_1 + E_2)^{\frac{2}{3}} \left[ 2b(1 - \mu_1^2) \right]^{\frac{2}{3}} P_H^{\frac{2}{3}}}{n S_H (E_1 E_2)^{\frac{2}{3}} L}, \quad (2.34)$$

$$I_q = \frac{0,247\nu S_{\kappa} \gamma_1^{\frac{1}{3}} \gamma_2^{\frac{1}{3}} (E_1 + E_2)^{\frac{2}{3}} \left[ 2b(1 - \mu_1^2) \right]^{\frac{2}{3}} P_H^{\frac{2}{3}}}{n S_H (E_1 E_2)^{\frac{2}{3}} g L}. \quad (2.35)$$

Таким образом, чем больше площадь контакта вставок цветного металла и поршневых колец, а также модуль упругости материала вставок, тем меньше износ трущихся поверхностей.

#### 2.4 Теоретическое обоснование формы, геометрических размеров и количества кольцевых канавок на рабочей поверхности трения гильзы цилиндров

Повышение износостойкости гильз цилиндров достигается за счет биметаллизации поверхности трения. Для этого в теле детали могут быть выполнены вставки, слои, канавки, пазы и прочее из материала с иными физико-механическими свойствами, как правило, в плоскости, непараллельной плоскости трения и направлению движения деталей (рис. 2.3).

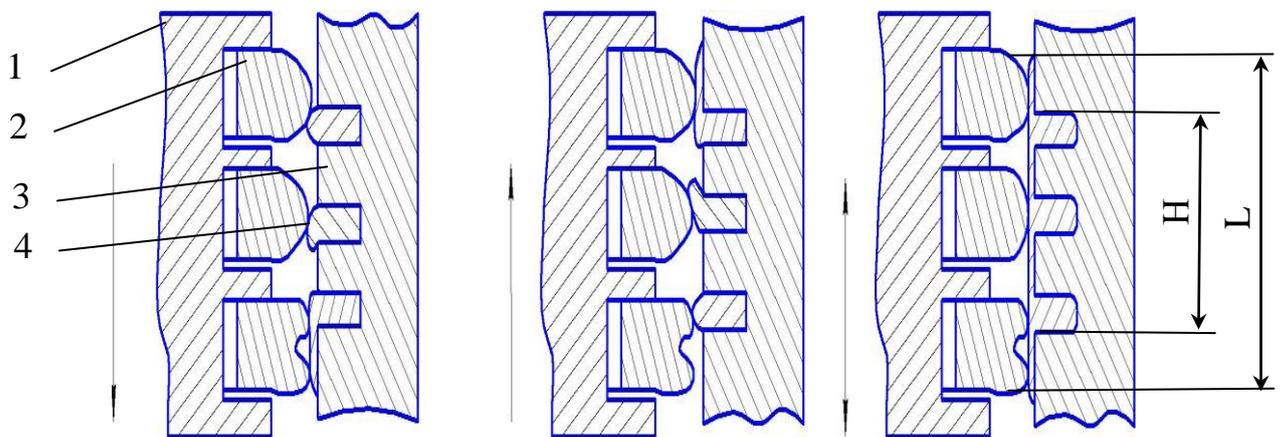


Рисунок 2.3 - Схема образования плёнки на поверхности гильзы цилиндров:  
1-поршень; 2-поршневое кольцо; 3-гильза цилиндров; 4-вставка

В предлагаемом способе на внутренней поверхности гильзы выполняются канавки, состоящие из двух встречных винтовых линий с правой и левой резьбой, соответственно. Величина шага  $H$  не должна превышать расстояния между верхним компрессионным и нижним маслосъёмным кольцом  $L$ . Для обеспечения наибольшей износостойкости поперечные слои должны

быть расположены, по возможности, ближе к месту наибольшего износа, но не снижать прочность стенки гильзы цилиндров и не располагаться в зоне высоких температур.

Кольцевые канавки заполняются цветным металлом (сплавом). Угол подъема кольцевых канавок должен учитывать взаимодействие поршневых колец с рабочей поверхностью гильзы: при угле подъема менее  $15^\circ$  поршневые кольца будут проходить зону канавок с ударом, а при угле подъема более  $60^\circ$  увеличится заброс масла в камеру сгорания.

Работа гильзы с измененными физико-механическими характеристиками поверхности трения осуществляется следующим образом. Кольца, двигаясь по поверхности гильзы, пластическим деформированием снимают часть цветного металла с канавок и «намазывают» его по всей поверхности гильзы между н.м.т. и в.м.т. Этот процесс происходит непрерывно в течение всех четырёх тактов двигателя. Однако следует подчеркнуть, что интенсивный съём цветного металла продолжается короткое время. Он замедляется после образования на поверхности гильзы слоя цветного металла, имеющего определённую толщину.

В результате коэффициент трения рабочих поверхностей колец и гильзы снижается, и кольца перестают снимать слой цветного металла с канавок.

При уменьшении слоя цветного металла на поверхности гильзы коэффициент трения возрастает, и интенсивность его снятия с поверхности канавки кольцами повышается. Таким образом, устройство имеет функцию саморегулирования. Слой цветного металла, снятый с канавки гильзы, перемещается в процессе трения с маслом и поэтому требует поддержания постоянного уровня. Однако имеющийся источник (канавки) пополняют его запас в процессе трения. Процесс нанесения слоя цветного металла на рабочие поверхности колец и гильзы сопровождает весь период эксплуатации ЦПГ двигателя.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что толщина слоя цветного металла, образующего на поверхности гильзы, составляет ве-

личину порядка 2-3 мкм, а присутствие некоторых цветных металлов, например, меди или латуни, непосредственно в камере сгорания приводит к уменьшению токсичности выхлопных газов двигателя.

Технико-экономическим преимуществом гильзы с применением плавких вставок является повышение долговечности цилиндропоршневой группы путём снижения коэффициента трения её сопряжённых деталей без добавления, например, дорогостоящих антифрикционных присадок в смазочное масло, которые необходимо вносить при каждой замене масла. Простота же конструкции модернизированной гильзы позволяет производить её на любом ремонтном заводе, даже в условиях неспециализированного производства.

Реализация метода биметаллизации поверхности гильзы в настоящее время является довольно сложной задачей. Наиболее целесообразным будет не покрытие всей поверхности цветным металлом, а использование вставок металлов. Однако в данном случае возникает вопрос, как должны располагаться вставки в поверхности гильзы цилиндров. Для этого необходимо обосновать геометрические параметры гильзы со вставками.

Как видно из анализа формулы (2.34), одним из параметров обеспечения снижения износа является отношение площади вставок цветного материала к площади гильзы цилиндров, однако важно знать и угол наклона вставки. Проведя анализ различных источников, было выявлено, что при линейном движении трущихся поверхностей процесс износа зависит от угла атаки контртела по отношению к поверхности. В нашем случае необходимо рассмотреть вопрос снятия металла вставки и распределение его по поверхности гильзы цилиндров. Необходимость рассмотрения данного вопроса вызвана тем, что от угла наклона вставки зависит, каким образом будет происходить деформация материала вставки – упруго или пластично.

В этом случае коэффициент трения может быть выражен формулой:

$$f = \frac{\tau_c}{HB} + \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.36)$$

где  $\tau_c$  - среднее сопротивление срезу;  $\alpha$  - угол, составляемый фактической площадью контакта с направлением силы трения,  $HB$  – твердость материала вставки.

Действующая деформация растяжения материала  $\varepsilon$ , при скольжении внедрившейся поверхности, будет пропорциональна коэффициенту трения и тангенсу угла наклона вставки:

$$\varepsilon = c \cdot f \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.37)$$

где  $c$  – коэффициент формы вставки.

Подставив в (2.37) значение коэффициента трения (2.5), получим:

$$\varepsilon = c \left( \left( \frac{R}{h} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau_c}{P_c^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta \right) \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.38)$$

При линейном напряжении, характеризующем работу цилиндрической поршневой группы, значение деформации соответствует пределу текучести материала, то есть  $\varepsilon = \sigma_T$  и при достижении критического значения  $\varepsilon > \sigma_T$ , деформация перейдет из упругой в пластическую. Это приведет к нарушению режима покрытия трущейся поверхности металлом вставки. Таким образом, для обеспечения режима покрытия внутренней поверхности гильзы цилиндров цветным металлом необходимо выполнение условия  $\varepsilon \leq \sigma_T$ .

То есть:

$$\varepsilon = c \left( \left( \frac{R}{h} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau_c}{P_c^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta \right) \operatorname{tg} \alpha \leq \sigma_T. \quad (2.39)$$

При контакте поршневых колец со вставкой контактное давление будет определяться [137]:

$$P_K = 0,918 \sqrt[3]{\frac{P_c E_1}{S_{нк} (1 - \mu_1^2)}}, \quad (2.40)$$

где  $S_{нк}$  – площадь контакта поршневого кольца с вставкой,  $\text{мм}^2$ .

Деформация сжатия материала вставки:

$$\varepsilon_c = 1,04 \sqrt[3]{\frac{P_K (1 - \mu_1^2)}{S_{нк} E_1}}. \quad (2.41)$$

Пренебрегая  $\mu_1$ , как величиной меньшей единицы, получим:

$$\varepsilon_c = 2,4 S_{нк} \left( \frac{P_K}{E_1} \right)^2. \quad (2.42)$$

Тогда угол наклона вставки будет определяться как:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\varepsilon}{c \left( \left( \frac{R}{h} \right)^{\frac{3}{7}} \frac{3\tau_c}{P_c^{\frac{1}{7}} E^{\frac{6}{7}}} + \beta \right)}. \quad (2.43)$$

Как видно из формулы, чем меньше деформация растяжения металла, давление в контакте, тем меньше угол наклона.

Необходимо отметить, что угол наклона вставки будет ограничиваться геометрическими параметрами гильзы и величиной хода поршня. Поэтому необходимо учитывать данные параметры.

Зная угол наклона вставки, проведем расчет геометрических параметров канавки и объем необходимого металла для обеспечения снижения износа (рис. 2.4).

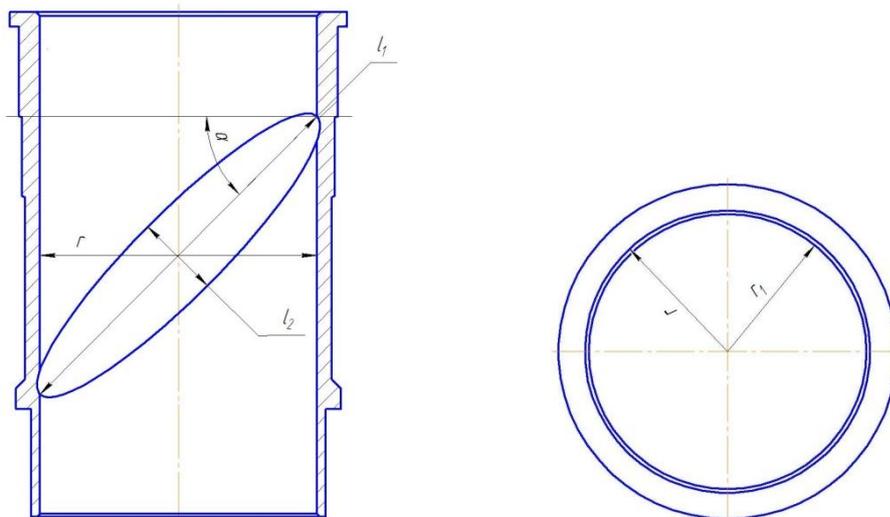


Рисунок 2.4 - Схема расчета геометрических параметров вставки

Поскольку канавки имеют эллипсоидную форму, длина большой полуоси определяется:

$$l_1 = \frac{r}{\cos \alpha}, \quad (2.44)$$

где  $r$  – радиус гильзы цилиндров, мм;  $\alpha$  – угол наклона вставки, град.

Объем кольцевой канавки вставки меди

$$V_B = PS_B, \quad (2.45)$$

где  $P$  – периметр канавки, мм;  $S_B$  – площадь канавки, мм<sup>2</sup>.

Периметр кольцевой канавки

$$P = 4 \frac{\pi l_1 l_2 + (l_1 - l_2)^2}{l_1 + l_2}, \quad (2.46)$$

где  $l_1$  – длина большой полуоси канавки, мм;  $l_2$  – длина малой полуоси канавки, мм.

Подставив значение периметра в (2.45), получим:

$$V_B = 4S_B \frac{\pi l_1 l_2 + (l_1 - l_2)^2}{l_1 + l_2}. \quad (2.47)$$

Исходя из условия покрытия всей трущейся поверхности гильзы цилиндров металлом, и соблюдая требования положительного механического градиента, определим объем металла в вставках. Это может быть осуществлено только в том случае, если глубина внедрения поршневых колец не превышает толщины покрытия поверхности гильзы металлом вставки. Исходя из этого и зная высоту неровностей поверхности гильзы цилиндров, определим объем металла, необходимый для покрытия трущейся поверхности гильзы.

$$V_m = \pi (r^2 - r_1^2) L, \quad (2.48)$$

где  $r$  – радиус гильзы, мм,  $r_1$  – радиус покрытия гильзы металлом, мм;  $L$  – ход поршня, мм.

При этом необходимо выполнение условия

$$r^2 - r_1^2 \succ h_{\max}, \quad (2.49)$$

где  $h_{\max}$  – максимальная высота неровностей поверхности гильзы цилиндра, мм.

Для расчета количества вставок в гильзе цилиндров и уточнения их геометрических параметров необходимо рассчитать количество металла, снимаемого с одной вставки поршневыми кольцами.

Объем снимаемого металла:

$$V_c = hS_B, \quad (2.50)$$

где  $h$  – глубина внедрения поршневого кольца в вставку металла, мм.

Необходимо отметить, что в реальных условиях работы цилиндропоршневой группы глубина внедрения поршневых колец в вставку металла будет уменьшаться с каждым возвратно-поступательным циклом, и достигнет нулевого значения при выравнивании поверхности трения (равномерного покрытия поверхности гильзы цилиндра слоем цветного металла). При снижении слоя цветного металла (износе пленки металла) на трущейся поверхности гильзы, возникнет разность высот слоя металла в зоне вставки и трущейся поверхности гильзы, что повлечет за собой увеличение глубины внедрения и снятие очередного слоя металла вставки с последующим его «намазыванием» на поверхность трения гильзы. Таким образом, цикл повторяется, что является залогом биметаллизации трущейся поверхности гильзы цилиндра.

Зная объем слоя цветного металла  $V_c$ , снимаемого с вставки поршневым кольцом, рассчитаем количество вставок:

$$N = \frac{V_M}{V_c}. \quad (2.51)$$

Проведем расчет угла наклона канавок вставки к поверхности гильзы цилиндра по формуле (2.43):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{1,1 \cdot 1011}{1,3 \left( \left( \frac{0,000001}{0,0000008} \right)^{0,42} \frac{3 \cdot 250}{3,5^{0,14} \cdot (12,3 \cdot 10^{10})^{0,85}} + 7,33 \right)} = 86,67$$

то есть угол наклона канавок вставки  $\alpha = \operatorname{arctg} (86,67) = 17,2^\circ$

Исходя из значения полученного угла наклона вставки, рассчитаем геометрические параметры канавки. Определим параметры эллипсной канавки. Длина большой полуоси вставки:

$$l_1 = \frac{46}{\cos 17,2^\circ} = 48,4 \text{ мм.}$$

Длина малой полуоси вставки будет равна радиусу гильзы цилиндра  $l_2 = r = 46$  мм.

Определим периметр канавки (2.41)

$$P = 4 \frac{3,14 \cdot 48,4 \cdot 46 + (48,4 - 46)^2}{48,4 + 46} = 296,4 \text{ мм.}$$

В условиях пластического контакта внешнее трение возможно лишь при незначительном внедрении контактирующих поверхностей, поэтому ширина металла канавки меди не должна превышать толщины поршневого кольца 2 мм. А, исходя из технологического процесса изготовления канавок и параметров режущего инструмента, принимаем ширину канавки  $b = 1,5$  мм. Учитывая, что гильза цилиндров двигателя УМЗ имеет три ремонтных размера, чередующихся через 0,5 мм, глубину канавки принимаем 1,5 мм.

Определим площадь вставки

$$S_B = Pb = 296,4 \cdot 1,5 = 444,6 \text{ мм}^2.$$

Проведем расчет количества цветного металла, необходимого для покрытия трущейся поверхности гильзы цилиндра для обеспечения положительного механического градиента. Исходя из условия (2.43), толщина слоя цветного металла должна составлять не менее 3 мкм. Тогда

$$V_m = 3,14 \cdot 0,003 \cdot 110 = 1,03 \text{ мм}^3.$$

Количество цветного металла, снимаемого с кольцевых канавок за один проход, составит:

$$V_c = hS_B = 0,001 \cdot 444,6 = 0,44 \text{ мм}^3.$$

Определим количество вставок в гильзу цилиндров:

$$N = \frac{1,03}{0,44} = 2,3.$$

В соответствии с исследованиями Д. Арчарда [138] о том, что износ одного контакта должен быть пропорционален квадрату их количества, количество канавок определяется:

$$N = N^2 = 2,3^2 = 5,29 \approx 6.$$

Таким образом, на основании проведенных расчетов количество кольцевых канавок, расположенных на рабочей поверхности трения гильзы цилиндров, составит 6 штук.

Тогда соотношение площади кольцевых канавок, заполненных медью, к рабочей поверхности трения гильзы цилиндров составит:

$$\Delta = \frac{S_B}{S_T} \cdot 100\%, \quad (2.52)$$

где  $S_T$  - площадь рабочей поверхности трения гильзы цилиндров, мм<sup>2</sup>.

$$\Delta = \frac{2667,6}{31776} \cdot 100 = 8,3\%.$$

Следовательно, площадь гильзы с биметаллизированной медью поверхностью равной не менее 8,3 %, обеспечит образование антифрикционной пленки толщиной 2...3 мкм на всей рабочей поверхности трения гильзы цилиндров и снижение ее износа.

На основании полученных геометрических параметров кольцевых канавок, заполненных медью, определим линейный износ типовой и биметаллизированной гильз цилиндров (2.34):

$$I_h^T = \frac{0,247 \cdot 0,5 \cdot 222,3 \cdot 1,3^{\frac{1}{3}} \cdot 1,8^{\frac{1}{3}} (1,6 \cdot 10^5 + 1,6 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} \left[ 2 \cdot 110 (1 - 0,22^2) \right]^{\frac{2}{3}} 0,2^{\frac{2}{3}}}{1 \cdot 1461732,8 (1,6 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} 110} =$$

$$= 1,5 \cdot 10^{-9} \text{ мм / мм.}$$

$$I_h^B = \frac{0,247 \cdot 0,2 \cdot 222,3 \cdot 1,3^{\frac{1}{3}} \cdot 0,8^{\frac{1}{3}} (1,2 \cdot 10^5 + 1,6 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} \left[ 2 \cdot 110 (1 - 0,32^2) \right]^{\frac{2}{3}} 0,2^{\frac{2}{3}}}{1 \cdot 1461732,8 (1,2 \cdot 10^5 \cdot 1,6 \cdot 10^5)^{\frac{2}{3}} 110} =$$

$$= 4,9 \cdot 10^{-10} \text{ мм / мм.}$$

Как видно из проведенных расчетов, линейный износ биметаллизированной гильзы цилиндров в 3,1 раза ниже, чем у типовой гильзы. Таким образом, проведенные расчеты позволяют сделать вывод, что биметаллизация поверхности гильзы цилиндров кольцевыми замкнутыми канавками, заполненными медью, позволит снизить износ трущейся поверхности гильзы.

## Выводы

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

2 Рассмотрено влияние различных цветных металлов на износ поверхности трения с учетом их поверхностной активности. Обосновано применение цветных металлов при биметаллизации гильзы цилиндров, заключающееся в создании между трущимися поверхностями пленки, способной уменьшить фрикционное взаимодействие твердых тел и характеризующейся малым сопротивлением сдвигу. На основании проведенных исследований в виде материала вставки выбрана медь.

3 Теоретически обоснованы форма, геометрические размеры и необходимое количество канавок, заполненных цветным металлом медью. Угол наклона канавок вставки к диаметральной плоскости гильзы цилиндров  $\alpha = 17,2^\circ$ , ширина канавки  $b = 1,5$  мм. Учитывая, что гильза цилиндров двигателя УМЗ имеет три ремонтных размера, чередующихся через 0,5мм, глубину канавки принимаем 1,5мм. Поддержание слоя меди на поверхности трения гильзы толщиной 2...3 мкм обеспечивается 6 кольцевыми канавками, что соответствует 8,3 % по отношению к рабочей поверхности трения гильзы цилиндров. В соответствии с проведенными расчетами линейный износ биметаллизированной гильзы цилиндров в 3,1 раза ниже, чем у типовой гильзы.

### 3 КОНСТРУКТИВНЫЙ ВАРИАНТ ИСПОЛНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ МЕДЬЮ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРОВ

#### 3.1 Конструкция биметаллизированной гильзы цилиндров и работы пары трения «поршневое кольцо-гильза»

Повышение износостойкости гильз цилиндров достигается за счет биметаллизации поверхности трения. Для этого в теле детали могут быть выполнены вставки, слои, канавки, пазы и прочее из материала с иными физико-механическими свойствами, как правило, в плоскости, непараллельной плоскости трения и направлению движения деталей [6,131].

На внутренней поверхности гильзы выполняются канавки в виде замкнутых колец, отдельных друг от друга, с углами подъема  $15^{\circ}\dots 20^{\circ}$  к диаметральной плоскости гильзы (рис. 3.1) [3,8,48,].

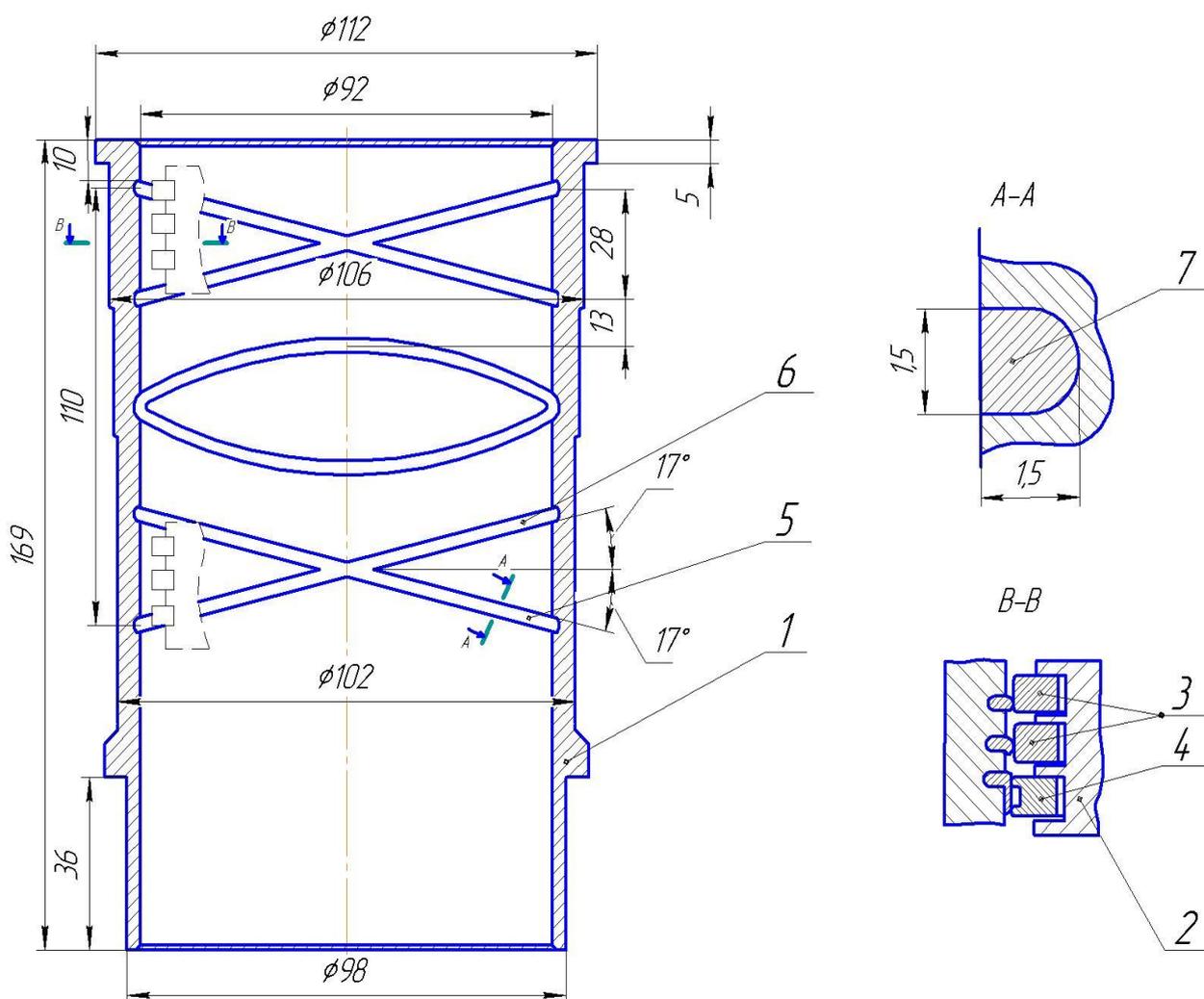


Рисунок 3.1 – Общий вид биметаллизированной гильзы цилиндров двигателя УМЗ-417

Цилиндропоршневая группа содержит гильзу 1, поршень 2, компрессионные 3 и маслосъемное 4 поршневые кольца. На рабочей поверхности гильзы 1 встречно выполнены канавки с левым 5 и правым 6 углами подъема. Канавки 5 и 6 выполнены в виде замкнутых колец отдельных друг от друга. Канавки 5 и 6 заполнены цветным металлом – медью 7. Угол подъема  $\alpha$  канавок 17 градусов к диаметральной плоскости гильзы 1. Канавки 5 и 6 в продольном сечении имеют торообразную форму. Величина максимального расстояния между первой и последующей канавками 5 и 6 не превышает расстояния между верхним компрессионным и нижним маслосъемным поршневыми кольцами [3,8,139].

Цилиндропоршневая группа работает следующим образом. В процессе работы двигателя внутреннего сгорания поршень 2 с кольцами 3 и 4 совершает возвратно поступательное движение вверх-вниз. При этом кольца 3 и 4, двигаясь по рабочей поверхности гильзы 1, пластической деформацией снимают часть цветного металла 7 с канавок 5 и 6 и «размазывают» его по рабочей поверхности гильзы 1 от верхней мертвой точки до нижней мертвой точки. Этот процесс происходит в течение всех тактов двигателя и продолжается до тех пор, пока на рабочей поверхности гильзы 1 не образуется слой цветного металла 7 определенной толщины. В результате этого процесса коэффициент трения рабочих поверхностей поршневых колец 3 и 4 и рабочей поверхности гильзы 1 снижается, а кольца 3 и 4 перестают снимать цветной металл 7 с канавок 5 и 6. По мере уменьшения толщины «размазанного» цветного металла 7 с поверхности гильзы 1, коэффициент трения между рабочими поверхностями поршневых колец 3 и 4 и рабочей поверхностью гильзы 1 несколько увеличивается. Одновременно начинает повышаться и интенсивность снятия поршневыми кольцами 3 и 4 цветного металла 7 с канавок 5 и 6, и процесс «размазывания» цветного металла 7 по рабочей поверхности гильзы 1 повторяется [3,8,139].

Таким образом, процесс нанесения слоя цветного металла 7 на рабочую поверхность гильзы 1 сопровождает весь период эксплуатации цилиндра-

поршневой группы ДВС.

Выполнение угла подъема канавок в пределах  $15^{\circ} \dots 20^{\circ}$  к диаметральной плоскости гильзы, заполненных цветным металлом (медью), будет способствовать образованию на рабочей поверхности гильзы защитной пленки, за счет возвратно-поступательного движения поршня в гильзе цилиндра, и снижению коэффициента трения поршневых колец о стенку гильзы цилиндра [3,8,139].

Кроме того, выполнение канавок в виде отдельных замкнутых колец способствует точности глубины их нарезки, и, соответственно, увеличивает равномерность заполнения канавок цветным металлом (медью). Такое конструктивное исполнение рабочей поверхности гильзы цилиндра позволит повысить качество работы цилиндропоршневой группы, снизить коэффициент трения между рабочими поверхностями поршневых колец и гильзы [139].

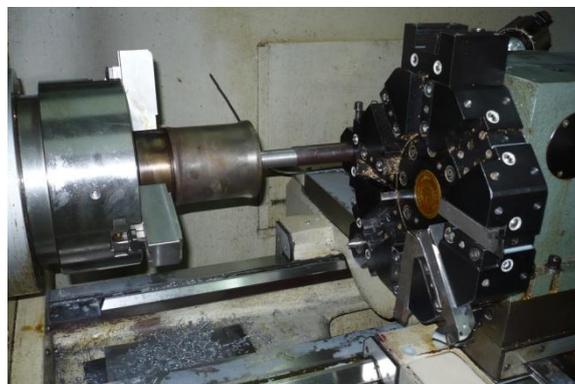
### **3.2 Технологический процесс изготовления биметаллизированной медью гильзы цилиндров**

Предлагаемый технологический процесс изготовления биметаллизованных гильз цилиндров включает операции очистки гильз цилиндров, их дефектацию, устранение кавитационных разрушений, наращивание посадочных поясков и их обработки, подрезки опорного бурта, нарезание кольцевых канавок и их наплавки, зачистки внутренней поверхности после наплавки, шлифование внутренней поверхности, её хонингования, контроля, консервации и упаковки. В отличие от *существующего* технологического процесса предлагаемый содержит операции биметаллизации рабочей поверхности трения: нарезание кольцевых канавок, их наплавка, зачистка внутренней поверхности после наплавки. Из-за возможности поломки резца расточной головки и сколов металла на границе кольцевых канавок вместо операции растачивания было применено черновое и чистовое шлифование внутренней поверхности гильзы на бесцентрово - шлифовальных или внутришлифовальных станках.

Нарезание кольцевых канавок выполняется на центровочном токарном станке (рис. 3.2) с системой ЧПУ, например, Т-500 (производство Болгария). Гильза цилиндров во время обработки закрепляется в трехкулачковом патроне.



а)



б)



в)



г)

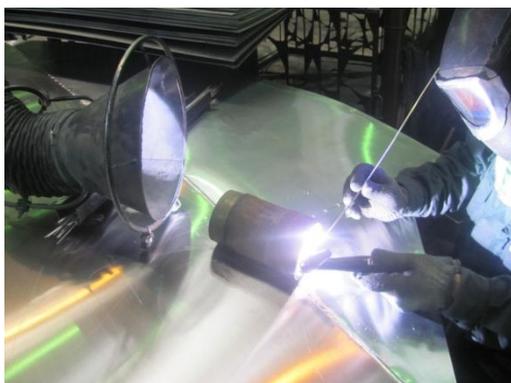
*Рисунок 3.2 – Нарезание кольцевых канавок: а)общий вид центровочно-токарного станка Т-500; б)трёхкулачковый патрон; в)резец ВК8; г)гильза с кольцевыми канавками*

Установка гильз проводится с выверкой их положения в горизонтальной и вертикальной плоскости и биения с точностью 0,03...0,05 мм. Обработка ведется резцом, оснащённым пластинами из твердого сплава ВК8, выбранного с учетом обрабатываемого материала, вида припуска и рекомендуемой глубины резания. При обработке применяется смазочно-охлаждающая жидкость СОЖ Универсал. Сечение кольцевых канавок обеспечивается соответствующей заточкой резца, шаг кольцевым массивам задаётся за счёт настройки станка и соответствует 13 мм. Режимы обработки указаны в программе, представленной в Приложении 1.1.

Глубина резания и подача определены с учетом твердости обрабатываемого материала, вида операции, инструментального материала, типа резца, способа крепления заготовки, применения смазочно-охлаждающей жидкости. Основное время на точение кольцевых канавок - 11,4 мин, норма времени - 15,9 мин.

Для нарезания кольцевых канавок может применяться вертикально-фрезерный обрабатывающий центр с системой ЧПУ, например, модели М-450, оснащенный универсальным поворотным столом. Гильза цилиндров во время обработки закрепляется в трехкулачковом патроне, установленном на универсальном поворотном столе, который в своё время устанавливается и крепится на столе станка с углом  $17^{\circ}$ . Установка гильзы производится с выверкой её положения в горизонтальной и вертикальной плоскостях и биения с точностью 0,03...0,05 мм. Обработка ведется дисковыми фасонными фрезами с мелким зубом из быстрорежущей стали Р6М5. Трапециевидное сечение кольцевых канавок обеспечивается соответствующей заточкой зубьев фрезы. Необходимый шаг и направление кольцевых массивов обеспечивается за счет вертикальной подачи станка и вращения гильзы на поворотном столе. Режимы обработки устанавливаются программой ЧПУ. Глубина резания и подача определены с учетом твердости обрабатываемого материала, вида операции, инструментального материала, типа фрезы, способа её крепления. Основное время на нарезание винтовых канавок - 27 мин, норма времени - 29,5 мин [141,142].

Заполнение кольцевых канавок осуществляется ручной аргонодуговой наплавкой (рис. 3.3 а). Для наплавки кольцевых канавок применяется проволока диаметром 0,8...1,0 мм, материал – медь М1 ГОСТ 859-78. Материал для наплавки был выбран с учетом литературных источников [6,7,120,125,126,130,131] на основании теоретических расчетов, проведенных во 2-й главе пункте 2.2. С учётом размеров гильзы цилиндров наплавка выполняется аргонодуговой горелкой АРГ-250 с вольфрамовым электродом с подачей присадочного металла в виде проволоки непосредственно в зону



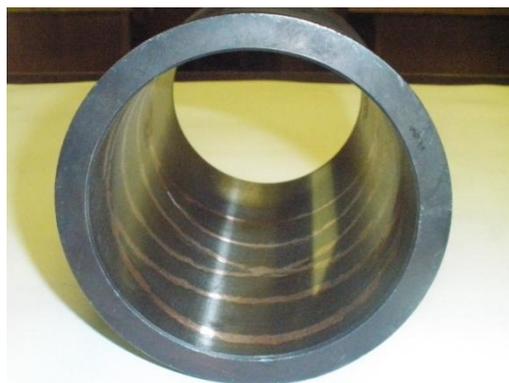
а)



б)



в)



г)

*Рисунок 3.3 – Технология обработки биметаллизированной гильзы цилиндров: а)наплавка канавок медью М1; б)зачистка внутренней поверхности; в)операция шлифования; г)биметаллизированная гильза цилиндров дуги, узкой профилированной проставки. В качестве защитных газов используется аргон сорта высший по ГОСТ 10157—79, гелий высшей категории качества марок А и Б по ТУ 51-940—80, а также их смеси в соотношении по объему 50...75 % аргона. Мощность горелки обеспечивает наплавление кольцевых канавок и небольшую зону термического влияния. Предварительно внутренняя поверхность гильзы цилиндров зачищается и обезжиривается. Затем гильза цилиндров помещается в термопечь и подогревается до 300...400 °С. После установки в оправку начинается оплавка меди, для предотвращения коробления гильзы цилиндров по диагонали делаются прихваты в начале и конце всех кольцевых канавок. Повторно подогревается гильза цилиндров до 300...400 °С и обваривается с центра напротив прихватов, электрод располагается строго в плоскости стыка, наклон электрода 60...80° «углом назад».*

Режимы наплавки: напряжение дуги – 60 В, сила тока – 90 А, давление газа – 0,05 МПа. Норма времени на наплавку кольцевых канавок – 33,5 мин [140].

Для удаления шлака и наплывов металла после наплавки винтовых канавок выполняется зачистка внутренней поверхности на токарно-винторезном станке, например, 16К20 (рис. 3.3 б). При зачистке внутренней поверхности резец должен проходить по возможности ближе к внутренней поверхности гильзы, удаляя шлак и наплывы металла в зоне наплавки, но не касаясь её. Гильза цилиндров во время обработки закрепляется в трехкулачковом патроне и на неподвижном люнете. Установка гильз проводится с выверкой их положения в горизонтальной и вертикальной плоскостях и биения с точностью 0,03-0,05 мм. Обработка ведется резцами, оснащенными пластинами из твердого сплава ВК6, выбранного с учетом обрабатываемого материала, вида припуска и рекомендуемой глубины резания. Обработка ведется с применением смазочно-охлаждающей жидкости - 3%-ного Укринола-1 ТУ 38-101197-76 [141,142].

С учетом твердости обрабатываемого материала, марки твердого сплава, размеров резца, жесткости детали и применения смазочно-охлаждающей жидкости теоретическая скорость резания  $v=87$  м/мин, расчетная частота вращения детали  $n_p=213$  мин<sup>-1</sup>, продольная подача - 0,5 мм/об. Согласно паспорту станка, принимается частота вращения детали  $n=200$  мин<sup>-1</sup>, скорость резания  $v=S2$  м/мин. Длина обработки с учетом длины врезания и перебега - 110 мм, припуск на обработку - 2 мм, глубина резания - 0,5 мм, количество проходов - 4. Глубина резания и подача определены с учетом твердости обрабатываемого материала, вида операции, инструментального материала, типа резца, способа крепления заготовки, применения смазочно-охлаждающей жидкости. Норма времени на зачистку внутренней поверхности - 9 мин [141,142].

Возможность поломки резца расточной головки на границе металлов не позволяет применять операцию растачивания для обработки гильзы цилиндров с кольцевыми канавками, заполненными медью. Поэтому для обра-

ботки внутренней поверхности гильзы под номинальный размер операция растачивания была заменена операциями её чернового и чистового шлифования (рис. 3.3 в).

Шлифование может выполняться на хонинговальных станках ЗГ833, ЗА83С – 33, и ЗУ142ВМ. При обработке на станках гильза закрепляется в трехкулачковом патроне и на неподвижном люнете. Опорной поверхностью для люнета служит поверхность нижнего посадочного пояса гильзы. Установка гильз проводится с выверкой их положения в горизонтальной и вертикальной плоскостях и биения с точностью не более 0,01 мм. Черновое хонингование производят брусками КЗ 1 ОСТ 1 К или алмазными брусками АС6М1 100%-ной концентрации с содержанием алмазов в бруске 3,5 карата. Чистовое хонингование ведут брусками КЗМ20СМ1К или алмазными брусками АСМ20М1 100%-ной концентрации. Материал и твердость круга, вид связки, выбраны с учетом одновременной обработки чугуна и медных сплавов высокой твердости. Размеры кругов: наружный диаметр - 80 мм, ширина круга - 63 мм, диаметр посадочного отверстия - 20 мм. Хонингование ведут при режимах: окружная скорость – 60...80 м/мин; возвратно-поступательная скорость – 15...25 м/мин; давление на бруски – 0,5...1,0 МПа (черновое хонингование) и 0,4...0,6 МПа (чистовое); СОЖ – керосин; припуск на черновое хонингование – 0,05...0,07 мм, а на чистовое – 0,01...0,03 мм. Режимы обработки выбраны с учетом необходимой точности и шероховатости поверхности, твердости обрабатываемого материала, материала абразивного круга, способа крепления заготовки, применения смазочно-охлаждающей жидкости. Норма времени на обработку- 17 мин [141,142].

Описанный технологический процесс изготовления биметаллизированных гильз цилиндров прошел производственную проверку в условиях ОАО «Ульяновский моторный завод». Операционная карта представлена в Приложение 1.2.

## **Выводы**

1. Для повышения износостойкости гильз цилиндров разработан технологический процесс изготовления биметаллизированной медью гильзы цилиндров, на рабочей поверхности которой выполняются канавки в виде трех рядов замкнутых колец отдельных друг от друга, с углами подъема  $17^\circ$  к диаметральной плоскости гильзы и шагом 13 мм.

2. Технологический процесс изготовления биметаллизированных медью гильз цилиндров включает операции: очистку гильз цилиндров; их дефектацию; устранение кавитационных разрушений; наращивание посадочных поясков и их обработку; подрезку опорного бурта; точение кольцевых канавок и их наплавку; зачистку внутренней поверхности после наплавки; шлифование и хонингование внутренней поверхности; контроль, консервацию и упаковку.

## 4 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 4.1 Программа экспериментальных исследований

Программа экспериментальных исследований включала следующие этапы:

- **лабораторные исследования** опытных образцов по оптимизации угла наклона (от 0 ° до 45 °) вставок, заполненных медью, с учётом параметров: температуры поверхности трения образцов и масла; момента силы трения; коэффициента трения; шероховатости рабочих поверхностей; износ образцов весовым методом; элементного состава поверхности трения образцов;

- **сравнительные ускоренные лабораторные испытания биметаллизированных гильз цилиндров** на износостойкость типовой и биметаллизированной медью гильз цилиндров по высоте;

- **сравнительные стендовые исследования** двигателя УМЗ-417 в штатной (типовые гильзы цилиндров) и экспериментальной (биметаллизированные медью гильзы цилиндров) комплектации на различных нагрузочно-скоростных режимах по показателям износа гильз цилиндров (весовым и линейным способом); мощностным, топливно-экономическим и экологическим показателям;

- **сравнительные эксплуатационные исследования** автомобилей УАЗ-3303, укомплектованных двигателями в штатной (типовые гильзы цилиндров) и экспериментальной (биметаллизированные медью гильзы цилиндров) комплектации по технико-эксплуатационным показателям.

### 4.2 Методика лабораторных исследований

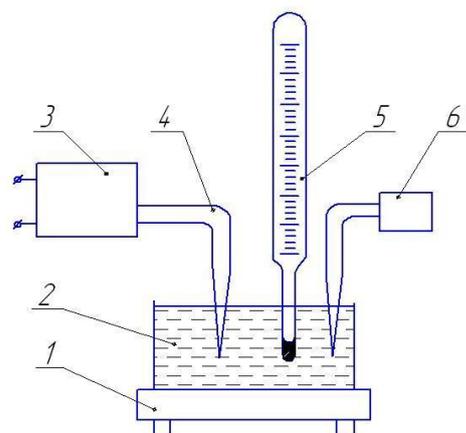
#### 4.2.1 Методика определения температуры поверхностей трения и смазочного материала

Температуру масла в испытательной камере контролировали с помощью термопары “хромель-копель” с предельной погрешностью 0,87%. Тер-

мопару подключали к потенциометру КСП-4. Перед проведением испытаний проводили тарировку термопары (рис. 4.1).



а)



б)

*Рисунок 4.1 - Тарировка термопары «хромель-копель» а) общий вид; б) схема тарировки: 1 - нагреватель; 2 – емкость с глицерином; 3 – потенциометр КСП-4; 4 – термопара; 5 – термометр; 6 – цифровой мультиметр М 890G*

Для этого ёмкость с глицерином устанавливали на нагреватель 1, в него опускали две термопары, одну подсоединяли к потенциометру КСП-4, вторую к цифровому мультиметру М 890G. Температуру разогреваемого состава фиксировали термометром с пределами измерения от 273 до 573 К и одновременно делали отметки на шкале потенциометра через каждые 10 К.

Температура колодки, то есть в зоне трения трибосопряжения контролировалась с помощью встроенной, предварительно протарированной термопары и цифрового мультиметра М 890G с погрешностью 0,75%. Для этого в колодке высверливали отверстие диаметром 2 мм на расстоянии 1 мм от рабочей поверхности, для крепления термопары. Данные тарировки и тарировочные графики приведены в приложении 2.1.

#### **4.2.2 Методика исследования износа рабочей поверхности образцов на машине трения СМТ-1**

Для изучения антифрикционных и противоизносных свойств материалов канавок, прослоенных в поперечном направлении медью марки М1

ГОСТ 859-78, были проведены сравнительные лабораторные испытания на машине трения 2070 СМТ-1 (рис.4.2 и 4.3) по стандартной методике [143,144].



Рисунок 4.2 - Общий вид машины трения 2070 СМТ-1

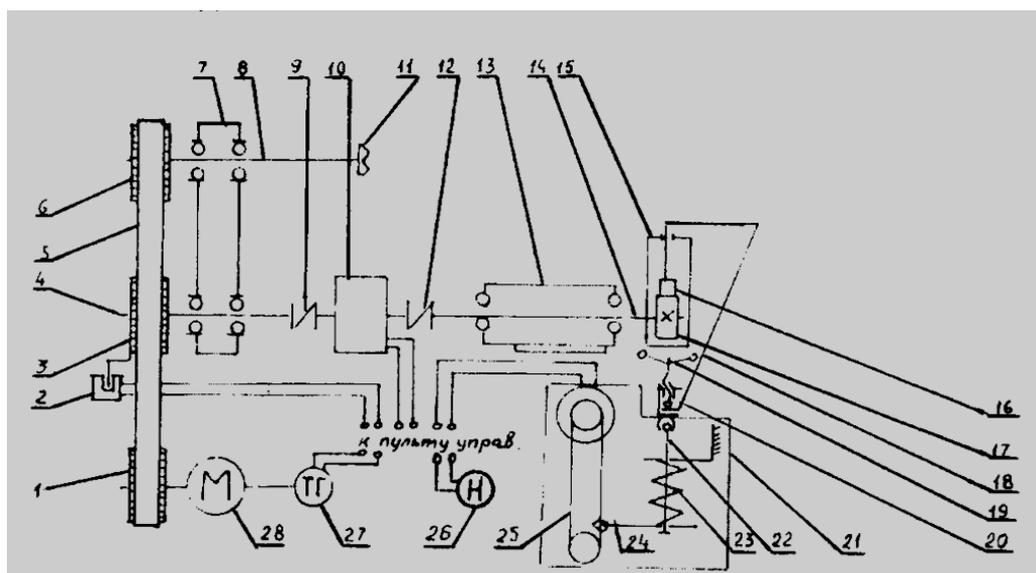


Рисунок 4.3 - Схема машины трения 2070 СМТ-1 для трибологических испытаний: 1, 6 – шкив сменный; 2 – датчик числа циклов; 3 – шкив; 4 – вал; 5 – ремень зубчатый; 7 – корпус; 8 – вал; 9, 12 – муфта; 10 – датчик момента; 11 – муфта кулачковая; 13 – шпиндель сменный; 14 – вал бабки; 15 – камера испытательная; 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

Трибологические исследования проводили по схеме «ролик-колодка» (рис.4.4).

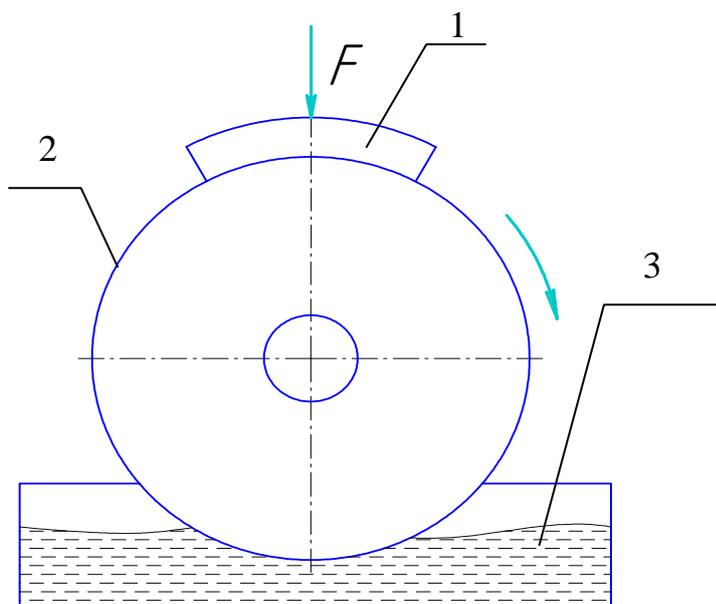


Рисунок 4.4 - Схема испытаний на машине трения 2070 СМТ-1:  
1 – колодка, 2 – ролик, 3 – масляная ванна

При испытании колодка удерживалась при помощи шарика, что позволяло ей самоустанавливаться относительно ролика (рис.4.5). Такое крепление обеспечивает хорошую воспроизводимость результатов при повторных опытах.



Рисунок 4.5 - Общий вид колодки и ролика

Во время проведения испытаний изучали изнашивание материалов:

- сталь 40X ГОСТ 4543-71;

- сталь 40X ГОСТ 4543-71 с канавками, заполненными медью МІ ГОСТ 859-78, с углом наклона канавки меди 0°, 5°, 10°, 15°; 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° (рис. 4.6).

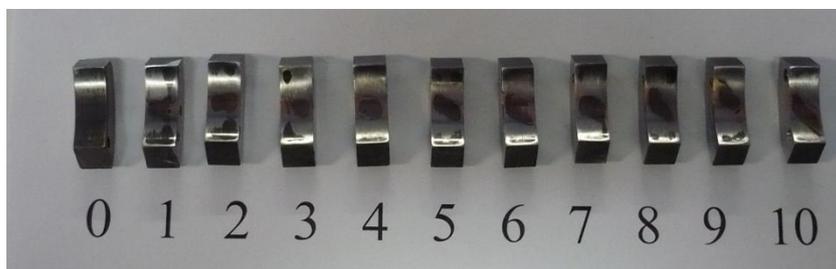


Рисунок 4.6 – Опытные образцы со вставками цветного металла

Таблица 4.1 - Данные номеров опытных образцов по наклону биметаллической вставки

Номер образца	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Угол наклона биметаллической вставки	Без вставки	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°

Колодка изготовлена из кольца с наружным диаметром  $d_k=70$ мм, внутренний диаметр шлифован под размер ролика. На трущейся поверхности колодки вырезана канавка глубиной 2,0 мм овального сечения с наклоном к ширине образца. Исследовались образцы с углом наклона канавки к широкой стороне образца 0°, 5°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, которые были наплавлены с помощью ручной аргодуговой пайкой медью марки МІ ГОСТ 859-78. Режимы наплавки: напряжение дуги -60 В, сила сварочного тока - 60А, диаметр проволоки — 1,5 мм, подача проволоки - ручная. После наплавки поверхность трения колодки обрабатывалась шлифованием. Размеры колодки: радиус вогнутой поверхности - 25 мм, радиус выпуклой поверхности - 35 мм, ширина - 10 мм, длина –  $24,5\pm 1$  мм, (рис.4.7).

Контртелом во время испытаний служили ролики, изготовленные из чугуна СЧ 24-44 ГОСТ 1412-85. Размеры роликов: наружный диаметр - 50

мм, внутренний диаметр - 16 мм, ширина - 12 мм. Чугунные образцы имели твердость HB= 240 ед. по Бринеллю, что соответствует твердости зеркала

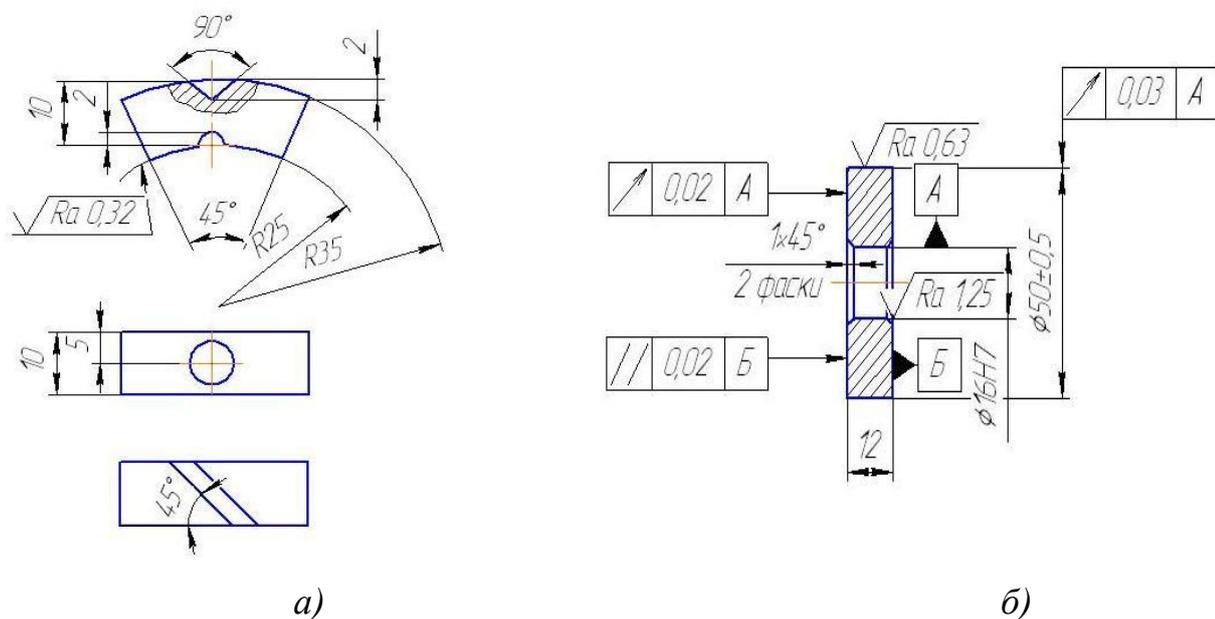


Рисунок 4.7- Геометрические размеры колодки (а) и ролика (б)

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. Для определения нагрузки и момента трения во время испытаний в статическом режиме определялась зависимость нагрузки от величины линейного сжатия пружины и зависимость перемещения пера графопостроителя от момента трения. Жесткость пружины нагрузки определялась на приборе КИ-040-ГОСНИТИ. Перед экспериментами проводили тарировку машины трения СМТ-1 (приложение 2.2) по нагрузке и моменту трения в статическом режиме, согласно инструкции по эксплуатации [144].

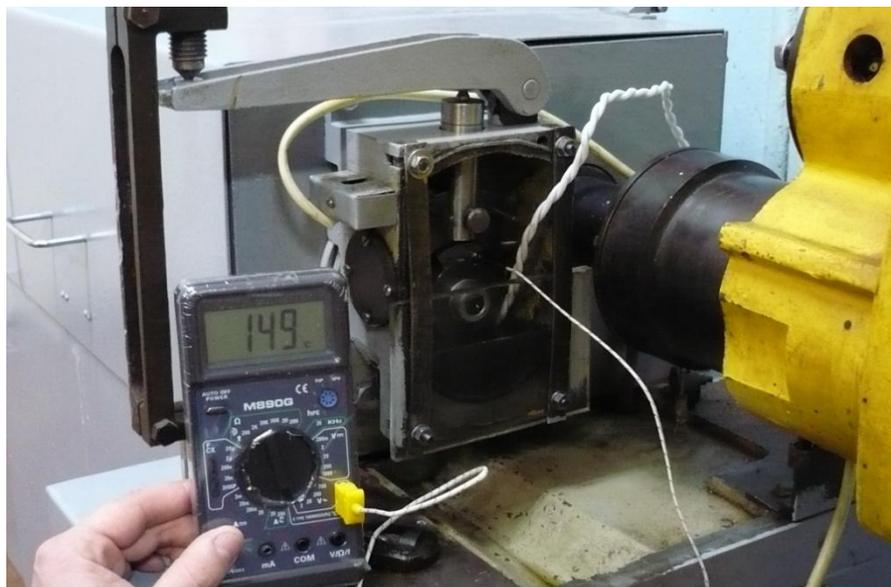
Трибологические испытания образцов для определения момента силы трения и периода его стабилизации проводили на следующих режимах:

- частота вращения ролика –  $191 \text{ мин}^{-1}$ ;
- нагрузка в зоне трения – 150 Н;
- время испытания – 60 мин.

Показания момента силы трения, температуры поверхности трения, и масла контролировали через каждую минуту, и их среднее значение заносили в сводную таблицу.

В течение приработки образцов происходило изменение момента силы трения. За время приработки образцов принимаем средние значения времени стабилизации момента силы трения и температуры поверхности трения образцов.

Испытания для определения силы момента трения с увеличением нагрузки до задира проводились в течение 3 ч при частоте вращения ролика  $n=420 \text{ мин}^{-1}$ . (рис.4.8) Ролик устанавливали на вал машины трения. На ролик устанавливалась взвешенная колодка из испытываемого материала, которая прижималась к ролику кареткой машины трения. Смазка пары трения осуществлялась погружением ролика в масляную ванну объемом  $60 \text{ см}^3$  на глубину 3 мм. Для смазки использовали масла марки M-8B SAE 20W-20, API CB/SD TУ-0253-052-04001396-02. Образцы испытывались с нагрузкой 815 Н, которую прикладывали ступенями по 135 Н в течение 0,5 ч.



*Рисунок 4.8 - Испытательная камера машины трения 2070 СМТ-1*

Антифрикционные свойства материалов оценивали по величине момента трения, который определялся по диаграмме, вычерчиваемой графопо-

строителем машины трения. Изменение температуры масла во время испытаний регистрировали цифровым мультиметром (тестер) М-890 G, результаты измерений заносили в сводную таблицу.

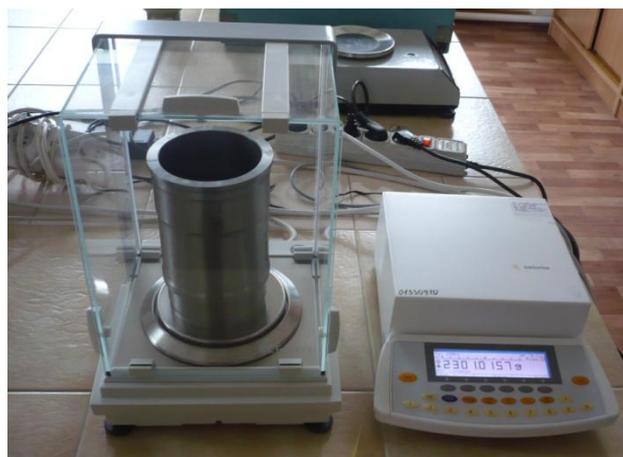
#### 4.2.3 Методика определения износа опытных образцов и гильзы цилиндра весовым методом

Для определения степени износа испытуемых образцов и гильз цилиндров использовали весовой метод.

Взвешивание исследуемых колодок проводили на весах WA-31 производства Польши «Zaktady Mechaniki Precyzyjnej» [145] (рис. 4.9 а) с точностью измерения  $0,1 \times 10^{-3}$  г. Взвешивание исследуемых гильз цилиндров проводили на весах Sartorius CPA 224S производства Германия (рис. 4.9 б) с точностью измерения  $0,1 \times 10^{-3}$  г.



а)



б)

Рисунок 4.9 – Общий вид весов:  
а) WA-31; б) Sartorius CPA 224S

Методика определения степени износа заключалась в определении веса образцов перед исследованием на машине трения и после исследований и гильз цилиндров перед моторными исследованиями и после исследований.

Перед взвешиванием образцы и гильзы цилиндров промывали в автомобильном бензине Б-70 ГОСТ 2084-77, высушивали в вытяжном шкафу и взвешивали, причём взвешивание происходило в стеклянном шкафу для исключения атмосферных воздействий [148]. После этого определяли средний

износ по трём взвешиваниям каждого образца и гильзы, результаты взвешивания заносили в сводную таблицу. Определение среднего износа рассчитывали по формуле:

$$G_{CP} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3}, \quad (4.1)$$

где  $G_1, G_2, G_3$  – вес образца и гильзы при трехкратном взвешивании, мг.

#### 4.2.4 Методика определения элементного состава поверхности трения опытных образцов

Определение элементного состава поверхности трения опытных образцов, проводили с помощью бездифракционного анализатора рентгеновского спектрального БАРС-3 [146] (рис. 4.10).



Рисунок 4.10 – Прибор БАРС-3

Принцип работы прибора БАРС-3 основан на считывание проходящих через фильтр ионов металлов (количество импульсов), образующихся при бомбардировке поверхности образцов  $\alpha, \beta, \gamma$  излучениями.

Для определения количества  $Fe$  и  $Si$  образец без вставки цветного металла помещали в камеру и считывали количество импульсов. Затем подвергали анализу образцы с вставками меди М-1, с разным углом наклона. Сначала снимали показания по каналу  $Fe$ , а потом импульсов по каналу  $Si$ . Для сравнительных исследований закрывали вставки исследуемых образцов, по-

вторно снимали количество импульсов по каналу  $Cu$ , и проводили расчёт количества металла, перенесенного со вставки на трущуюся поверхность образца. После проведения исследований образцов на машине трения проводили повторный анализ поверхности трения на количество перенесённого металла [151].

Количество выдаваемых импульсов фона по каналу  $Fe$  рассчитывали по формуле:

$$C_{Fe} = C_{Э} - C_K, \quad (4.2)$$

где  $C_{Э}$  – количество импульсов эталона  $Fe$ ;

$C_K$  – количество импульсов исследуемого образца  $Fe$ .

Для определения количества перенесённого металла  $Cu$  на поверхность трения образцов проводили тарировку прибора по образцам колодок с известным содержанием металлов  $Fe$  и  $Cu$ .

По разработанной методике измеряли количество импульсов по каналам  $Fe$ . Замеры каждого образца проводили не менее пяти раз.

Количество металла вставки, покрывшей поверхность трения образца, определяли по формуле:

$$C_{Cu} = C_{КО} - C_{КЗ}, \quad (4.3)$$

где  $C_{КО}$  – количество импульсов исследуемого образца;

$C_{КЗ}$  – количество импульсов образца с закрытой вставкой;

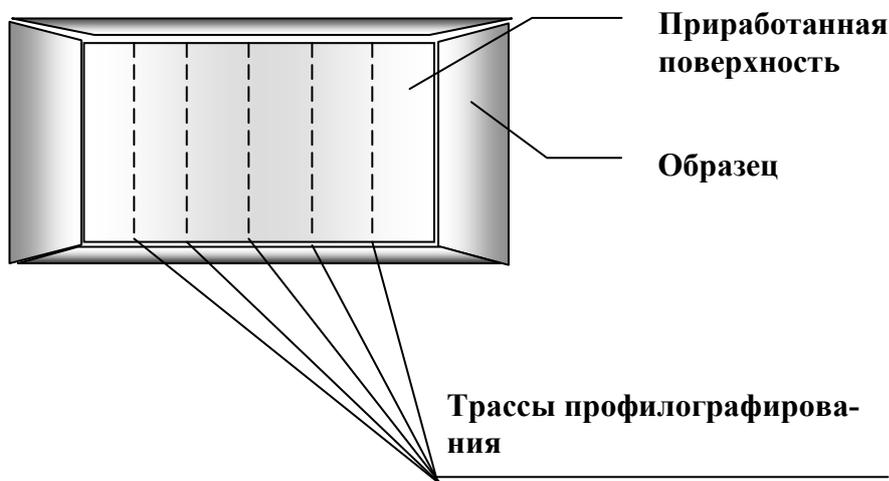
На основании проведенных исследований определили процентное содержание  $Cu$  перенесённого на трущуюся поверхность исследуемого образца.

Для определения количества перенесенного металла на трущуюся поверхность проводили тарировку прибора по количеству импульсов и весу металла. Данные тарировок представлены в приложении 2.3.

#### 4.2.5 Методика определения шероховатости опытных 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 4.11.



*Рисунок 4.11 - Схема профилографирования опытных образцов*

Оценку шероховатости выполняли стандартным методом профилографирования (ГОСТ 2789-73) при помощи профилометра, модель ПРОФИ-130 [147,150] (рис. 4.12). Запись профилограмм проводили с увеличением по вертикали 4000 раз, по горизонтали 20 раз с выводом результатов на монитор.



*Рисунок 4.12 - Профилограф-профилометр модель 130*

#### **4.2.6 Методика микрометража гильзы цилиндров**

Все гильзы цилиндров комплекта должны быть одной размерной группы. Размерная группа обозначается буквой, которая выбита на верхнем торце гильзы. Соответственно на такие же группы разбиваются и поршни. Если ме-

ток нет, то индикатором измеряют внутренний диаметр гильзы и относят её к соответствующей размерной группе. Необходимый инструмент для проведения микрометража гильзы цилиндра представлен на рисунке 4.13.



а)



б)



в)

*Рисунок 4.13 - Инструмент для проведения микрометража гильзы цилиндра: а) вид общий; б) измерение внутреннего диаметра гильзы для подбора сменной вставки; в) измерение внутреннего диаметра гильзы индикаторным нутромером*

Размерные группы гильз цилиндров должны удовлетворять следующим техническим условиям:

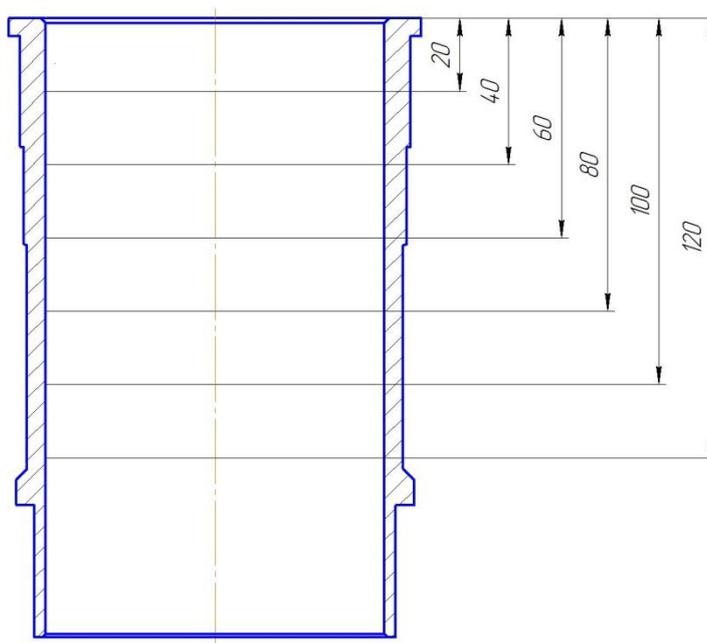
- 1) внутренняя поверхность гильзы чистая без риски, задиров;
- 2) овальность и конусность допускается до 0,05 мм на длине не более 15 мм от верхнего торца и не более 60 мм от нижнего торца гильзы;
- 3) при гидравлическом испытании гильзы под давлением 0,4 МПа в течение 2 мин течь воды и потение стенок гильзы не допускаются;
- 4) биение посадочных поясов относительно внутренней поверхности не должно превышать 0,1 мм;
- 5) гильзы заменяют, если износ их рабочей поверхности превышает 0,2 мм по диаметру.

Внутренний диаметр гильзы измеряли при помощи индикаторного нутромера в следующей последовательности [165]:

- 1) перед снятием гильзы с двигателя краской или мелом отмечали на ней плоскость, параллельную оси коленчатого вала;
- 2) тщательно протирали зеркало цилиндра;
- 3) измеряли линейкой длину цилиндра и наметили мелом сечения, в которых нужно проводить замеры;

4) при дефектовке цилиндра внутренний диаметр измеряли в двух взаимно перпендикулярных плоскостях и трех сечениях. Измерения в крайних сечениях проводили на расстоянии 15...20 мм от краёв гильзы;

5) при определении характера износа цилиндра первый замер проводили в сечении, отстоящем от верхнего края гильзы на 15...20 мм, а остальные по всей длине цилиндра с интервалом в 20 мм (рис. 4.14). В каждом сечении замер проводили в двух взаимно перпендикулярных плоскостях (параллельной оси коленчатого вала и перпендикулярной к ней).



*Рисунок 4.14 – Схема микрометража гильзы цилиндра*

- б) подготавливали индикаторный нутромер к работе:
- а) подбирали сменную вставку в соответствии с диаметром цилиндра, навёртывали на неё контргайку и завёртывали в нутромер;
  - б) устанавливали микрометр на размер, равный диаметру цилиндра, (измеренного штангельциркулем), и закрепляли его шпindelю стопорной гайкой;
  - в) устанавливали измеряющие штифты нутромера между пяткой и шпindelем микрометра и поворачивали сменную вставку вокруг своей оси до тех пор, пока стрелка индикатора не переместится на 1...2 оборота. После

этого закрепляли сменную вставку контргайкой и подводили ноль шкалы к стрелке индикатора;

7) измеряли цилиндры в плоскости, параллельной оси коленчатого вала;

8) подсчитывали диаметр ( $D$ ) цилиндра и износ ( $I$ ) по сечению по следующим формулам:

$$D = D_I - C_{MM}, \quad (4.4)$$

где  $D$  – диаметр в данной плоскости и сечении, мм;

$D_I$  – диаметр, на который был установлен нутромер, мм;

$C_{MM}$  – отклонения стрелки, мм.

$$I = D_H - D_H, \quad (4.5)$$

где  $I$  соответственно износы в плоскостях  $A^{-A}$  и  $B^{-B}$ , мкм;

9) подсчитывали наибольшую конусность ( $K$ ) и овальность ( $O$ ) по формулам:

$$K_{НАИБ} = D_{НАИБ} - D_{НАИМ}, \quad (4.6)$$

где  $K_{НАИБ}$  – наибольшая конусность, мкм;

$D_{НАИБ}$ ,  $D_{НАИМ}$  – наибольший и наименьший диаметры цилиндра в одной плоскости, но в разных сечениях, мм.

$$O_{НАИБ} = D'_{НАИБ} - D'_{НАИМ}, \quad (4.7)$$

где  $O_{НАИБ}$  – наибольшая овальность, мкм;

$D'_{НАИБ}$ ,  $D'_{НАИМ}$  – соответственно наибольший и наименьший диаметры цилиндра в одном сечении, но в разных плоскостях, мм.

Геометрические размеры гильз цилиндров представлены в приложении 2.4.

#### **4.2.7 Методика ускоренных лабораторных испытаний гильз цилиндров на износостойкость**

Для исследования противоизносных и антифрикционных свойств материалов поперечных слоев, рабочей поверхности трения гильзы цилиндров двигателя внутреннего сгорания была разработана установка, изображенная на рисунке 4.15 [148].

Установка для испытаний с возвратно-поступательным движением поршня состоит из сварной рамы 1, на которой установлены электродвигатель 2 и редуктор 3. Сверху на раме установлены кривошипно-шатунный механизм 4, обеспечивающий возвратно-поступательное движение поршня 6 и

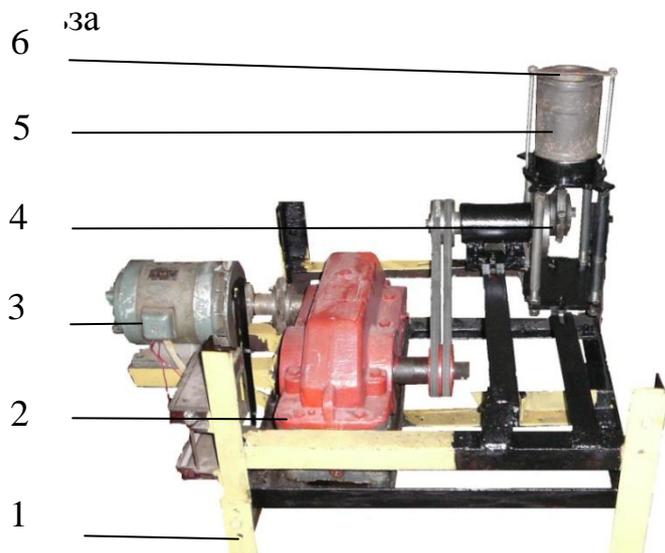


Рисунок 4.15 – Установка для ускоренных испытаний на износостойкость гильзы цилиндра

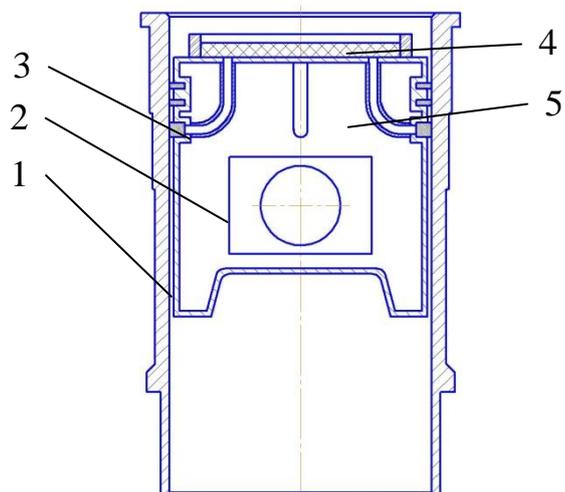


Рисунок 4.16 – Схема смазывания рабочей поверхности гильзы цилиндра

цилиндра 5. Кинематическая схема установки представлена на рисунке 4.17.

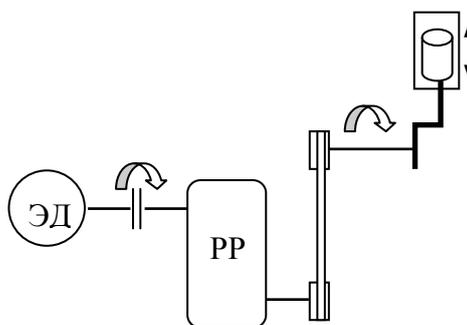


Рисунок 4.17 – Кинематическая схема установки для ускоренных испытаний гильзы цилиндра на износостойкость

Установка приводится в движение электродвигателем с числом оборотов  $n=1450 \text{ мин}^{-1}$ ,  $U=220 \text{ В}$   $N=0,25 \text{ кВт}$ . Через соединительную муфту вращательное движение передается на редуктор РЦД-250-20 с передаточным отношением  $i=2$ . Затем посредством клиноременной передачи приводится в движение вал-эксцентрик, который установлен в корпусе на подшипниках. С

вала крутящий момент передается на шатун, с помощью которого приводится в возвратно-поступательное движение поршень в неподвижно закрепленной, с помощью кронштейнов, гильзе. Частоту ходов поршня можно регулировать с помощью набора сменных шкивов.

Для ускорения процесса изнашивания в смазочное масло М-8В<sub>1</sub> добавляли микрошлифпорошок М5 по ГОСТ 3647-80 с величиной зерна 3...5 мкм из расчета 0,15 г на 1 кг масла. Масло к рабочей поверхности гильзы 1 подавалось из накопителя 4, установленного на днище поршня 2, по масляным каналам 5 в зону маслосъемного кольца 3 (рис. 4.16). Испытания продолжительностью 20 ч проводили при частоте вращения коленчатого вала 2000 мин<sup>-1</sup> [152,153].

Износ образцов гильз по высоте определяли по стандартной методике [165] нутромером по индикатору с цифровым отсчетным устройством типа ИЧЦ 12,5 и ценой деления 0,001 мм.

## **4.3 МЕТОДИКА СТЕНДОВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

### **4.3.1 Оборудование и приборное обеспечение**

Предметом сравнительных стендовых экспериментальных исследований являлся бензиновый двигатель УМЗ-417 в штатной ( типовые гильзы цилиндров) и экспериментальной (биметаллизированные гильзы цилиндров) комплектации. Все системы и механизмы двигателя были проверены и отрегулированы в соответствии с инструкцией по эксплуатации автомобилей УАЗ [154,155].

Моторная установка для исследования работы двигателя включала (рис.4.18): бензиновый двигатель УМЗ-417 с системой отвода отработавших газов, стенд тормозной КИ-5543 ГОСНИТИ со штатными контрольно-измерительными приборами (весовое устройство тормоза, тахометр, датчик давления масла), а также скомплектованный измерительно-регистрирующий комплекс (ИРК).

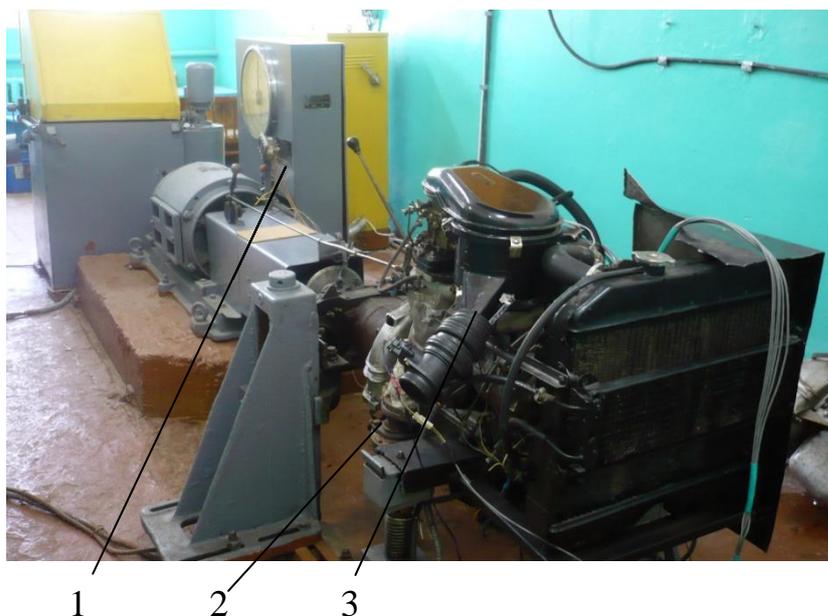


Рисунок 4.18 – Общий вид экспериментальной моторной установки:  
 1 – стенд тормозной КИ-5543; 2 - система отвода отработавших газов; 3 – двигатель УМЗ-417

Схема процесса определения параметров ЦПГ представлена на рисунке 4.19.

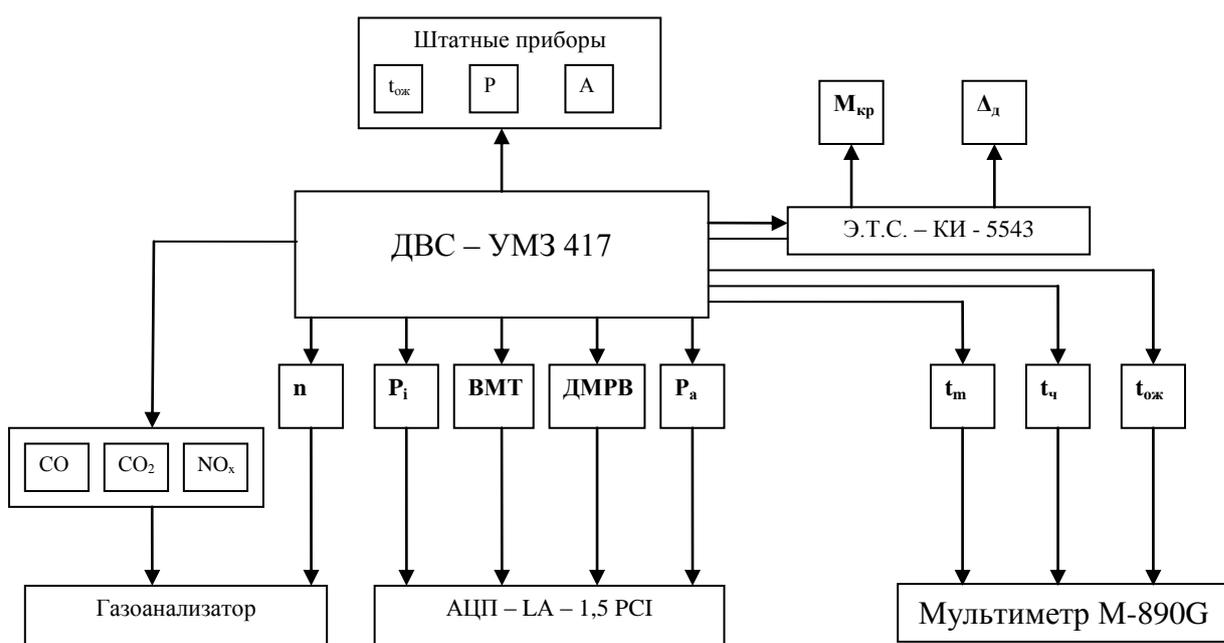


Рисунок 4.19 – Схема процесса определения параметров ЦПГ:  
 газоанализатор Инфракар М1-01;  $P_i$  – датчик давления газов УДПС-001;  $n$  – датчик частоты вращения; ВМТ – датчик положения поршня; ДМРВ – датчик массового расхода воздуха (BOSH 0280218037);  $P_a$  – датчик абсолютного давления;  $t_m$ ,  $t_{\text{ч}}$ ,  $t_{\text{ож}}$  – термодатчики; Электрический тормозной стенд КИ-5543;  $\Delta_d$  – расходомер топлива (весового типа); штатные приборы; Аналога – цифровой преобразователь

В состав ИРК входили (рис. 4.20): измерители температуры (тестер - мультиметр М 890 С) окружающего воздуха и эксплуатационных материалов

(охлаждающей жидкости, моторного масла в главной масляной магистрали, температуру выхлопных газов с помощью термопары ТХК,), расходомер топлива, датчики (ВМТ, отметок зубьев маховика, давления, массового расхода воздуха, разрежения, температуры охлаждающей жидкости и масла), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ЛА-1,5РСІ, персональный компьютер на базе Pentium-III с монитором «SAMSUNG», стабилизирующий блок питания, газоанализатор Инфракар М1-01.

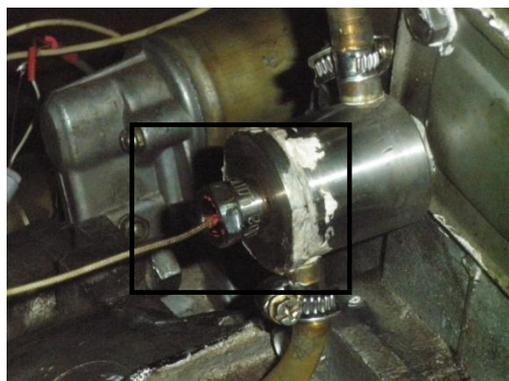


*Рисунок 4.20 – Измерительно-регистрационный комплекс:  
1 – блок питания; 2 – системный блок с монитором; 3 – АЦП;  
4 – газоанализатор Инфракар М1-0*

Измерение давления газов при индицировании четвёртого цилиндра двигателя (как наиболее теплонапряжённого) осуществлялось охлаждаемым пьезоэлектрическим датчиком давления газов УДПС - 001 (рис. 4.21). Датчик устанавливался в специальный переходник, вворачиваемый в головку цилиндров, и соединялся каналом с центральной частью камеры сгорания. Подвод охлаждающей жидкости к датчику осуществлялся от водопроводной сети. Для преобразования сигнала использовался АЦП ЛА-1,5РСІ, который устанавливался в цепь между датчиком и компьютером.



*а)*



*б)*

*Рисунок 4.21 – Пьезоэлектрический датчик давления газов УДПС-001:  
а) общий вид; б) место установки*

Температура охлаждающей жидкости в системе охлаждения, моторного масла в главной масляной магистрали, выхлопных газов контролировали с помощью термодатчиков (термопар типа ТХК), установленных в места замера температуры (рис. 4.22).



*а)*



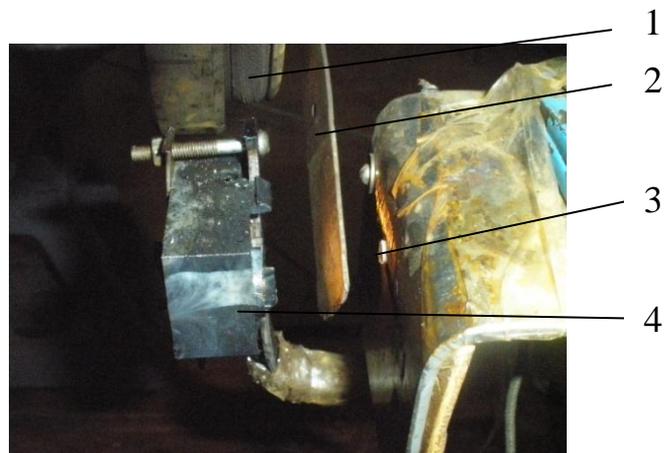
*б)*



*в)*

*Рисунок 4.22 – Места установки термодатчиков: а) температуры выхлопных газов; б) температуры охлаждающей жидкости; в) температуры моторного масла*

Датчик ВМТ (рис. 4.23) фотоэлектрического типа включал фотодиод 3 и лампу накаливания 4, световой поток которой в момент нахождения четвертого цилиндра в ВМТ перекрывался флажком 2, закрепленным на шкиве 1 привода вентилятора. Исследуемые аналоговые сигналы от датчиков подавались на входы каналов устройства LA-1,5PCI, которое осуществляет преобразование входных аналоговых сигналов в цифровую форму, для последующей обработки компьютером.



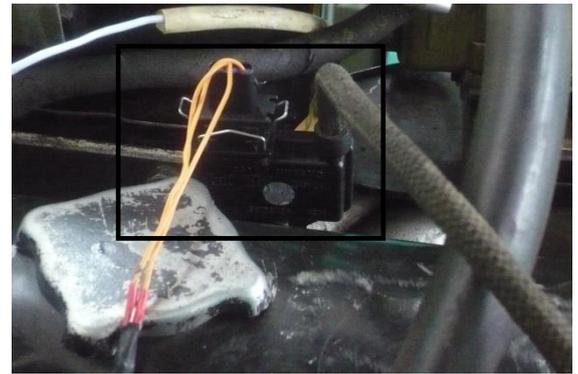
*Рисунок 4.23 – Датчик ВМТ фотоэлектрического типа (место установки): 1 – шкив; 2 – флажок; 3 – фотодиод; 4 – лампа накаливания*

Обмен данными аналого-цифрового преобразования между компьютером и устройством осуществляется через интерфейс USB компьютера [156-158]. Компьютер при помощи специальной программы, входящей в комплект (ADCLab), осуществляет обработку поступающих от устройства данных аналого-цифрового преобразования и управления устройством через интерфейс USB. При записи индикаторных диаграмм работы двигателя требуемая длина кадра устанавливалась при помощи программы ADCLab в соответствующей системе координат, обеспечивающей запись 4-х и более индикаторных диаграмм в зависимости от степени сжатия по оси ординат.

Контроль расхода объема воздуха осуществлялся посредством датчика массового расхода воздуха BOSCH 0 280 218 037, который устанавливался непосредственно на входной патрубок воздушного фильтра и датчика разряжения воздуха BOSCH 4513829, установленный посредством тройника в трубопровод, соединяющий карбюратор с распределителем (рис. 4.24). Способы тарировки представлены на рисунке 4.25, а данные тарировки в приложении 2.5.

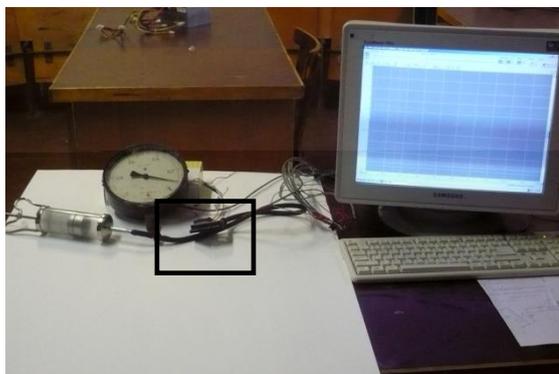


а)



б)

*Рисунок 4.24 – Места установки датчиков контроля расхода объема воздуха: а) датчик массового расхода воздуха; б) датчик разряжения*



а)



б)

*Рисунок 4.25 – Способы тарировки: а) датчик разряжения BOSCH 4513829; б) датчик массового расхода воздуха BOSCH 0 280 218 037*

Для преобразования сигнала использовался АЦП LA-1,5PCI, который устанавливался в цепь между датчиком и компьютером.

Визуальный контроль за наличием сигналов исследуемых процессов и их формой осуществлялся по изображению на дисплее компьютера. Синхронная запись всех регистрируемых параметров и отметок времени производилась на жесткий носитель компьютера посредством программы-драйвера LA-1,5PCI.

Для определения концентрации в отработавших газах углеводородов (СН, %) и оксида углерода (СО, %) использовался газоанализатор Инфракар М1-01.

Статическая тарировка каналов регистрации давления газов в цилиндре двигателя проводили на приборе с поршневым манометром сквозным методом (приложение 2.6), т.е. находилась взаимосвязь между точными значениями параметров, измеренных образцовым манометром и соответствующим

им ординатам диаграммы давления, отображаемой на дисплее компьютера (рис. 4.26).



*Рисунок 4.26 – Тарировка каналов регистрации давления газов*

Динамическая тарировка канала регистрации давления газов в цилиндре осуществлялась методом прокрутки двигателя на динамометрической машине КИ-5543 с записью сигнала давления газов в цилиндре двигателя и отметок ВМТ на дисплей компьютера в интервале от максимальной до минимально устойчивой частоты вращения к.в. на холостом ходу. Сравнение величин давления сжатия, полученных при статической и динамической тарировках на постоянной частоте вращения, позволили определить ошибку измерения давлений.

#### **4.3.2 Методика измерения токсичности отработавших газов бензинового двигателя**

Измерения объёмной доли оксида углерода (СО), углеводородов (в пересчёте на гексан), диоксида углерода (СО<sub>2</sub>), кислорода (О<sub>2</sub>) в отработавших газах бензинового двигателя проводили с помощью газоанализатора Инфро-

кар М1 01, в котором имеется тахометр, предназначенный для измерения и отображения в цифровом виде частоты вращения коленчатого вала двигателя (рис. 4.27).



а)



б)

Рисунок 4.27 – Прибор Инфракар М1 – 01: а) вид спереди; б) вид сзади

Прибор состоит из системы пробоотбора и пробоподготовки, блока измерительного и блока электронного.

Система пробоотбора и пробоподготовки газоанализатора включает газозаборный зонд, пробоотборный шланг, бензиновый фильтр, тройник, пневмосопротивление, 2 насоса, каплеотбойник, фильтр тонкой очистки. Каплеотбойник в нижней части соединён со штуцером **СЛИВ** для автоматического слива конденсата побудителем расхода. Принцип действия датчиков объёмной доли (CO, CO<sub>2</sub>, углеводородов) оптико – абсорбционный. Принцип действия датчика измерения концентрации кислорода – электрохимический. Принцип действия датчика частоты вращения коленчатого вала основан на индуктивном методе определения частоты импульсов тока в системе зажигания.

Блок измерительный содержит оптический блок, в котором имеются излучатель, измерительная кювета, 4 пироэлектрических приёмника излучения, перед которыми размешены 4 интерференционных фильтра. Излучения модулируются обтюратором. В измерительном блоке также размещён электрохимический датчик кислорода.

Блок электронный предназначен для измерения выходных сигналов первичных преобразователей газоанализаторов Инфракар М, обработки и представления результатов измерения.

Газоанализатор Инфракар М1 - 01 содержит:

- комбинированный блок питания от постоянного тока напряжением (12+2,8 – 1,2) В и переменного тока напряжением (220+22/-33) В, частотой (50±1) Гц;
- блок предварительного усиления сигнала пироэлектрических приёмников;
- микропроцессорный контролер, в том числе выполняющий функцию измерения частоты вращения коленчатого вала двигателя;
- 6 светодиодных индикаторов;
- клавиатуру;
- датчик температуры;
- цифровой выход для связи с компьютером через разъём RS 232.

Подготовка и порядок работы прибора. Установили прибор на горизонтальной поверхности. Подключили кабель питания 220 В. К штуцеру **СЛИВ** подсоединили трубку для сброса конденсата. К штуцеру **ВХОД** подсоединили через короткую трубку из ПВХ бензиновый фильтр, к нему подсоединили проботборный шланг с зондом газозаборным. К гнезду на задней панели подключили кабель с датчиком тахометра, датчик подсоединили к высоковольтному проводу 1-й свечи. Установили пробозаборник прибора в выхлопную трубу автомобиля на глубину не менее 300 мм от среза (до упора) и зафиксировали его зажимом. Произвели настройку нулей всех каналов нажатием кнопки ►0◀. Обеспечили поступление чистого воздуха, не загрязнённого выбросами CO<sub>2</sub>, СО, СН. Газоанализатор готов к работе.

Автоматическая подстройка нуля производится через 30 мин время подстройки – 30 с. В процессе измерения (при нажатой кнопке **Насос (Выход)**) автоподстройка не происходит.

Показания фиксировали через 40...60 с после начала измерения.

### **4.3.3 Методика стендовых исследований бензинового двигателя при работе с типовой и биметаллизированной гильзой цилиндров**

Стендовые исследования бензинового двигателя по мощностным, экономическим и экологическим показателям проводились по ГОСТу 14846-81 [165], при этом определяли скоростные характеристики, устанавливающие зависимость показателей двигателя от частоты вращения коленчатого вала и нагрузочные характеристики, устанавливающие зависимость показателей двигателя от его нагрузки при постоянной частоте вращения коленчатого вала.

**Условия снятия скоростной характеристики бензинового двигателя:**

- основные регулировки двигателя нормативные (паспортные), в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя;
- температурный режим двигателя нормальный (температура охлаждающей жидкости  $t_{ж} = 75-85$  °С, моторного масла  $t_{м} = 80-100$  °С)
- рычаг управления дроссельной заслонкой карбюратора установлена на максимум подачи топлива и закреплён;
- изменяется нагрузка на тормозе и частота вращения коленчатого вала.
- оптимальный угол опережения для заданной частоты вращения коленчатого вала устанавливают в процессе испытаний опытным путём, изменяя положение диска прерывателя и наблюдая за показаниями тахометра.

**Последовательность снятия скоростной характеристики бензинового двигателя:**

1) первый опыт проводят при минимально устойчивой частоте вращения коленчатого вала двигателя, которую задают увеличением нагрузки тормоза. Измерения производят после стабилизации минимальной частоты вращения ( $700 \dots 800$  мин<sup>-1</sup>). Во время опыта измеряют тормозной момент, частоту вращения вала тормоза, расход топлива за опыт, продолжительность опыта, расход воздуха и температуру охлаждающей жидкости, масла в картере и отработавших газов.

2) во втором опыте нагрузку тормоза постепенно уменьшают и увеличивают частоту вращения коленчатого вала двигателя на  $100 \dots 200 \text{ мин}^{-1}$ .

При необходимости корректируется оптимальный угол опережения зажигания. После достижения устойчивого скоростного режима производят те же измерения, что и в первом опыте.

3) в третьем и последующих опытах нагрузку тормоза уменьшают, частоту вращения коленчатого вала двигателя увеличивают. Интервал изменения частоты вращения в каждом опыте примерно одинаковый. В зоне максимальных значений эффективной мощности интервалы скоростных режимов между опытами сокращают, что позволяет чётко выделить экстремальные значения показателей на скоростной характеристике.

4) последний опыт выполняют при минимальной нагрузке и частоте вращения коленчатого вала на  $10 \dots 15 \%$  большей, чем номинальная. После завершения последнего опыта скоростную характеристику снимают в обратном порядке. В протоколе испытаний делают пометки возможного детонационного сгорания топлива на соответствующих скоростных режимах.

#### **Условия снятия нагрузочной (дрессельной) характеристики бензинового двигателя:**

- основные регулировки двигателя нормативные (паспортные), в соответствии с рекомендациями завода-изготовителя;
- температурный режим двигателя нормальный (температура охлаждающей жидкости  $t_{\text{ж}} = 75\text{--}85 \text{ }^\circ\text{C}$ , моторного масла  $t_{\text{м}} = 80\text{--}100 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- рычаг управления дроссельной заслонкой карбюратора установлен на наибольшее прикрытие дроссельной заслонки и закреплён;
- неизменной остаётся частота вращения коленчатого вала при различных степенях открытия дроссельной заслонки;
- для выявления момента и характера включения экономайзера в работу, а также часового расхода топлива, соответствующего наименьшему удельному расходу топлива, большее число опытов проводят в зоне действия экономайзера.

### **Последовательность снятия нагрузочной характеристики бензинового двигателя:**

1) первый опыт проводят при наибольшем прикрытии дроссельной заслонки, обеспечивающей устойчивую работу двигателя в режиме холостого хода на заданной частоте вращения коленчатого вала. Через 2...3 мин после того, как стабилизируется скоростной режим, снимают показания и заносят в журнал испытаний следующие показатели: нагрузку на тормозе, частоту вращения вала тормоза, расход топлива, расход воздуха, температуру масла, охлаждающей жидкости, отработавших газов, угол опережения зажигания, степень открытия дроссельной заслонки, время продолжительности опыта.

2) во втором опыте дроссельную заслонку несколько приоткрывают и увеличением нагрузки тормоза восстанавливают заданную частоту вращения. Производят те же измерения, что и в первом опыте.

3) третий и последующий опыты проводят аналогичным образом, увеличивая каждый раз на одинаковую величину степень открытия дроссельной заслонки и поддерживая регулированием нагрузки тормоза постоянную частоту вращения.

4) последний опыт проводят при полностью открытой дроссельной заслонке. Для повышения достоверности результатов испытаний нагрузочную характеристику карбюраторного двигателя снимают еще раз в обратном порядке, прикрывая дроссельную заслонку в каждом последующем опыте примерно на одну и ту же величину [159-161,165].

#### **4.3.4 Обработка результатов стендовых исследований**

Крутящий момент двигателя  $M_K$ , рассчитывали по формуле: [165]

$$M_K = P_{ПИУ} I., \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.8)$$

где  $P_{ПИУ}$  – показания измерительного устройства тормоза, Н;

$I$  – плечо весового устройства тормоза, м.

Эффективную мощность двигателя  $N_e$ , рассчитывали по формуле:

$$N_e = \frac{M_K n}{9550}, \text{ кВт}, \quad (4.9)$$

где  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ .

Расход жидкого топлива  $G_T$  кг/ч определяли весовым способом и рассчитывали по формуле:

$$G_T = \frac{3,6 G}{\tau}, \quad (4.10)$$

где  $G$  – масса дозы топлива, израсходованная за время измерения, г.

$\tau$  – продолжительность измерения расхода топлива, с;

Удельный расход топлива  $g_e$ , г/(кВт·ч) рассчитывали по формуле:

$$g_e = \frac{G_T}{N_e} 10^3, \quad (4.11)$$

где  $N_e$  – мощность, определённая при испытаниях, кВт.

Определение расхода воздуха  $Q_B$ ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ , рассчитывали по формуле [159-161, 165]:

$$Q_B = 3600 \frac{\Delta V_{II}}{\tau_{II}}, \quad (4.12)$$

где  $\Delta V_{II}$  – измеренный объём воздуха,  $\text{м}^3$ ;

$\tau_{II}$  – продолжительность измерения расхода воздуха, с.

#### **4.4 Методика эксплуатационных исследований автомобилей, оснащённых двигателями с типовыми и биметаллизированными гильзами цилиндров**

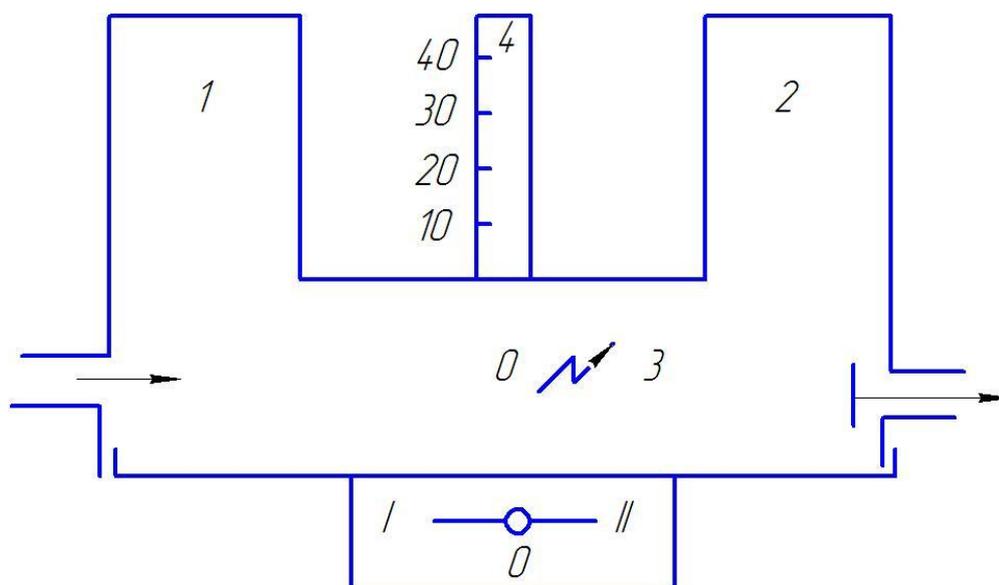
Для оценки технико-эксплуатационных показателей двигателя УМЗ-417 (износ гильз цилиндров, путевой расход топлива, компрессия в цилиндрах двигателя) на эксплуатационные испытания были направлены два капитально отремонтированных бензиновых двигателя. На первом двигателе УМЗ-417 были установлены гильзы цилиндров, обработанные под номинальный размер согласно технологии, предусматривающей биметаллизацию поверхности трения. На втором двигателе были установлены типовые гильзы номинального размера. Перед установкой на автомобиль двигателя проходи-

ли технологическую обкатку на режимах согласно техническим требованиям на капитальный ремонт [162-164]. Автомобили использовались на различных сельскохозяйственных и транспортных работах в условиях рядовой эксплуатации ООО «Приморье» Мелекесского района Ульяновской области.

Для определения износа гильз цилиндров выполнялся их микрометраж по стандартной методике (см. гл. 4 п. 4.2.6) [165] нутромером по индикатору с цифровым отсчетным устройством типа ИЧЦ 12,5 и ценой деления 0,001 мм. Измерения проводили с интервалом пробега через каждые 3200 км, соответствующему ТО-1. Интервал замеров выбирался в соответствии с условиями эксплуатации автомобилей в Ульяновской области (II категория дорог), и соответствующей ей периодичности обслуживаний.

Проверка компрессии (давления) в цилиндрах в конце такта сжатия проводили компрессиметром G-324. Перед измерением регулировали тепловой зазор в клапанах. Компрессию в цилиндрах замеряли на прогретом до 70...85° С двигателе при полностью открытой дроссельной заслонке карбюратора и вывернутых свечах, карбюратор при этом должен быть без топлива. Резиновый наконечник компрессометра вставляли в отверстие свечи первого цилиндра, обеспечивая уплотнение по кромке отверстия, и коленчатый вал двигателя прокручивали стартером до тех пор, пока давление в цилиндре не переставало увеличиваться (но не более 10...15 с). Аккумуляторная батарея была исправной и полностью заряженной.

Замер расхода топлива проводили с помощью прибора с мерным сосудом. При пересечении границы мерного участка питание двигателя переключали с топливного бака на прибор и одновременно включали секундомер для контроля действительной скорости автомобиля. Перед началом замера и после остановки автомобиля записывали положения уровней топлива по мерной линейке прибора и вычисляли объём израсходованного топлива, схема подключения прибора для замера топлива показана на рисунке 4.28 [161].



направление движения топлива из бака  $\longrightarrow$  ;  
 направление движения топлива из мерного устройства  $\longleftarrow$  .

Рисунок 4.28 - Схема подключения прибора для замера расхода топлива

Контрольный расход топлива автомобиля определяли на четвёртой передаче, при различных скоростных режимах с интервалом в 10 км/ч, начиная с 50 км/ч и заканчивая на скорости 100 км/ч. Заезды проводили на мерном участке протяжённостью 1 км в двух противоположных направлениях. Требуемую скорость в заезде устанавливали и поддерживали осторожным воздействием на педаль подачи топлива. В каждом опыте измеряли время прохождения мерного участка и количество израсходованного топлива [161].

### Выводы

1. Разработана общая программа исследований, которая включает лабораторные исследования опытных образцов, ускоренные лабораторные испытания биметаллизированных медью гильз цилиндров на интенсивность изнашивания по высоте, стендовые исследования бензинового двигателя УМЗ-417 и эксплуатационные исследования автомобиля для сравнительной оценки работы бензинового двигателя в штатной комплектации ( типовые гильзы цилиндров) и в экспериментальной комплектации (биметаллизированные медью гильзы цилиндров).

2. Лабораторные исследования проводились для оптимизации угла наклона медной вставки опытных образцов и определения элементного состава

поверхности трения. При этом использовали машину трения СМТ-1, весы аналитические WA-31, бездифракционный анализатор рентгеновский спектральный БАРС-3, профилометр ПРОФИ-130.

3. Для исследования противоизносных и антифрикционных свойств материалов поперечных слоев, рабочей поверхности трения гильзы цилиндров была разработана лабораторная установка для проведения ускоренных лабораторных испытаний на интенсивность изнашивания гильз цилиндров по высоте.

4. Сравнительные стендовые исследования бензинового двигателя в штатной комплектации и оснащённого биметаллизированными медью гильзами цилиндров проводились на тормозном стенде КИ-5543 ГОСНИТИ со штатными контрольно-измерительными приборами, а также скомплектованного измерительно-регистрирующего комплекса, в состав которого входили измерители температуры (тестер - мультиметр М 890 С) окружающего воздуха, выхлопных газов и эксплуатационных материалов (охлаждающей жидкости, моторного масла в главной масляной магистрали) с помощью термопар типа ТХК, расходомер топлива, датчики (ВМТ, отметок зубьев маховика, давления, массового расхода воздуха, разряжения, температуры охлаждающей жидкости и масла), аналого-цифровой преобразователь (АЦП) ЛА-1,5РСІ, персональный компьютер на базе Pentium-III с монитором «SAMSUNG», стабилизирующий блок питания, газоанализатор Инфракар М1-01.

5. Сравнительные эксплуатационные исследования автомобиля УАЗ 3303 проводились для определения технико-эксплуатационных показателей при работе автомобиля с двигателем в штатной ( типовые гильзы цилиндров) и экспериментальной (биметаллизированные гильзы цилиндров) комплектации.

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИ- МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ

### 5.1 Результаты лабораторных исследований биметаллизированных поверхностей трения

Согласно методике, описанной в разделе 4.2.2, были проведены сравнительные исследования образцов материалов с биметаллизацией поверхности трения.

Во время исследований на начальном этапе наблюдается повышение момента трения практически у всех образцов. Это объясняется тем, что сопряжённые детали изнашиваются весьма быстро, так как происходит приработка трущихся поверхностей. В этот период нагрузка воспринимается преимущественно выступами, причём удельные давления достигают максимальных значений. В результате нарушаются гидродинамические условия смазки.

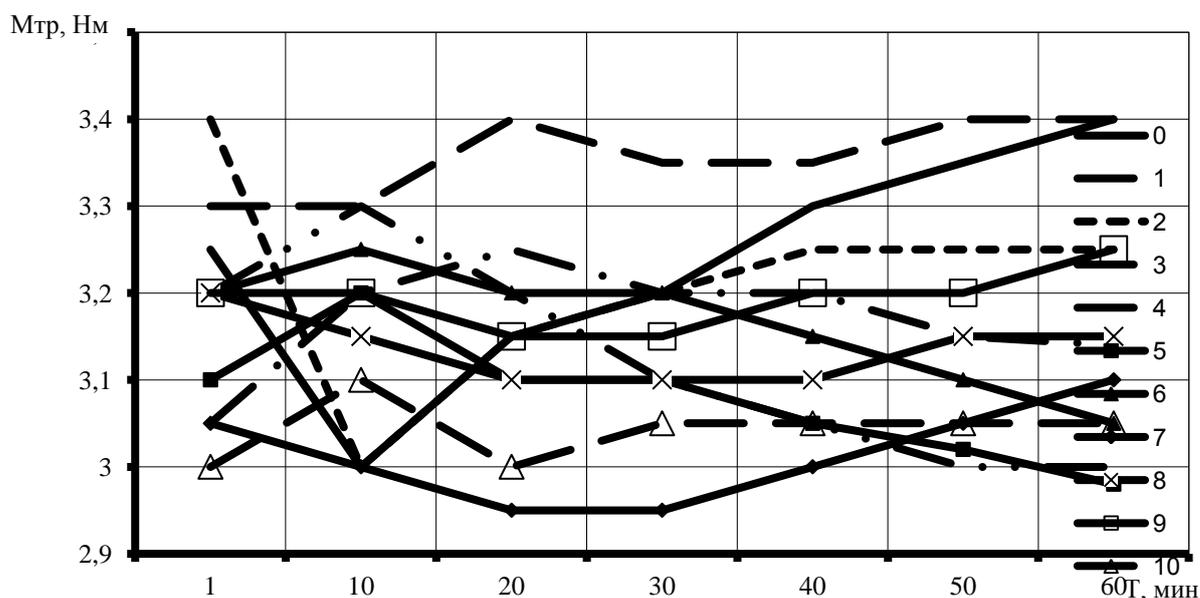


Рисунок 5.1 - Зависимость момента трения ( $M_{тр}$ ) от времени работы ( $T$ )

После приработки сопряжённых поверхностей скорость их изнашивания стабилизируется или возрастает незначительно вследствие сглаживания неровностей на трущихся поверхностях и снижения удельных давлений (см. приложение 3.1) (рис. 5.1).

Наилучшие показатели момента трения наблюдаются у образцов 4, 5, 6, имеющих угол  $15^\circ$ ,  $20^\circ$  и  $25^\circ$ . У этих образцов раньше других заканчивается период приработки, стабилизация происходит через 20 минут после начала лабораторных исследований. У сплошного образца 0 момент трения в течение всего времени эксперимента повышается. Эти же показатели подтверждаются зависимостью температуры колодки от времени работы (рис. 5.2).

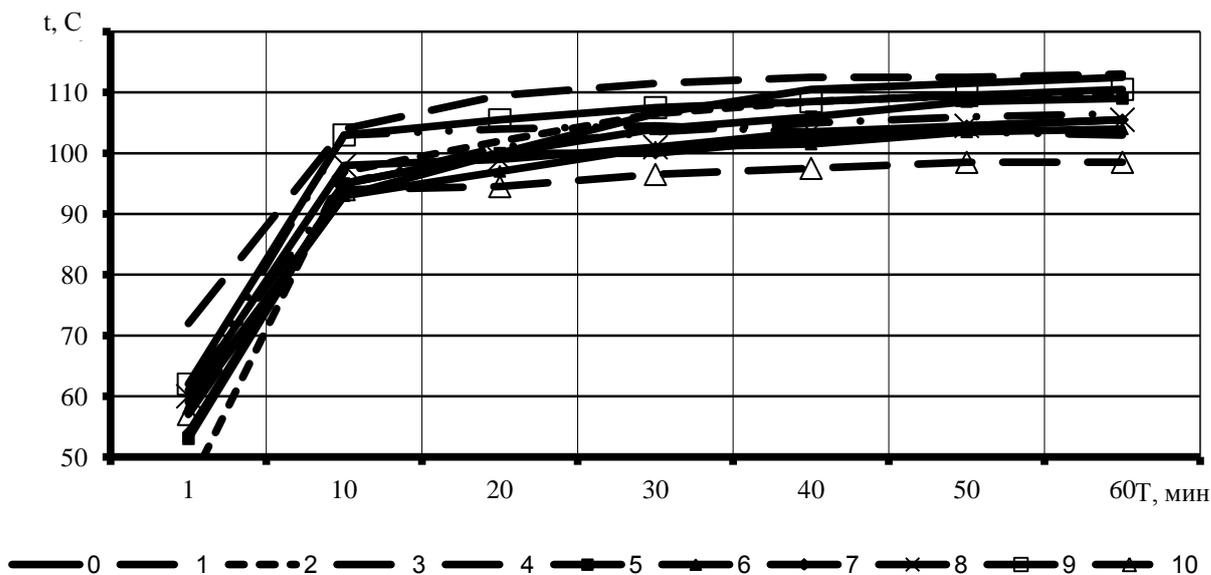


Рисунок 5.2 - Зависимость температуры колодки ( $t$ ) от времени работы ( $T$ )

Износ испытываемых образцов определяли весовым методом (рис. 5.3) и

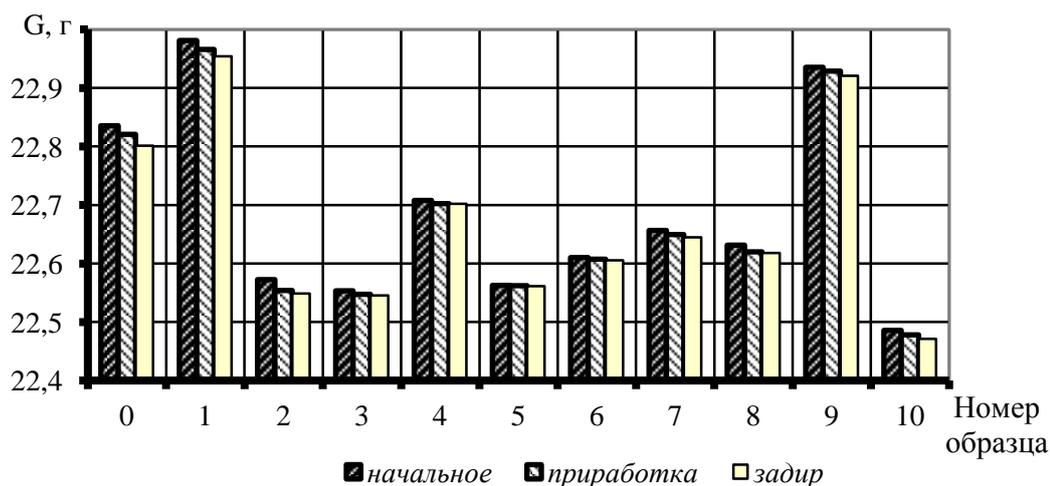


Рисунок 5.3 – Результаты взвешивания опытных образцов

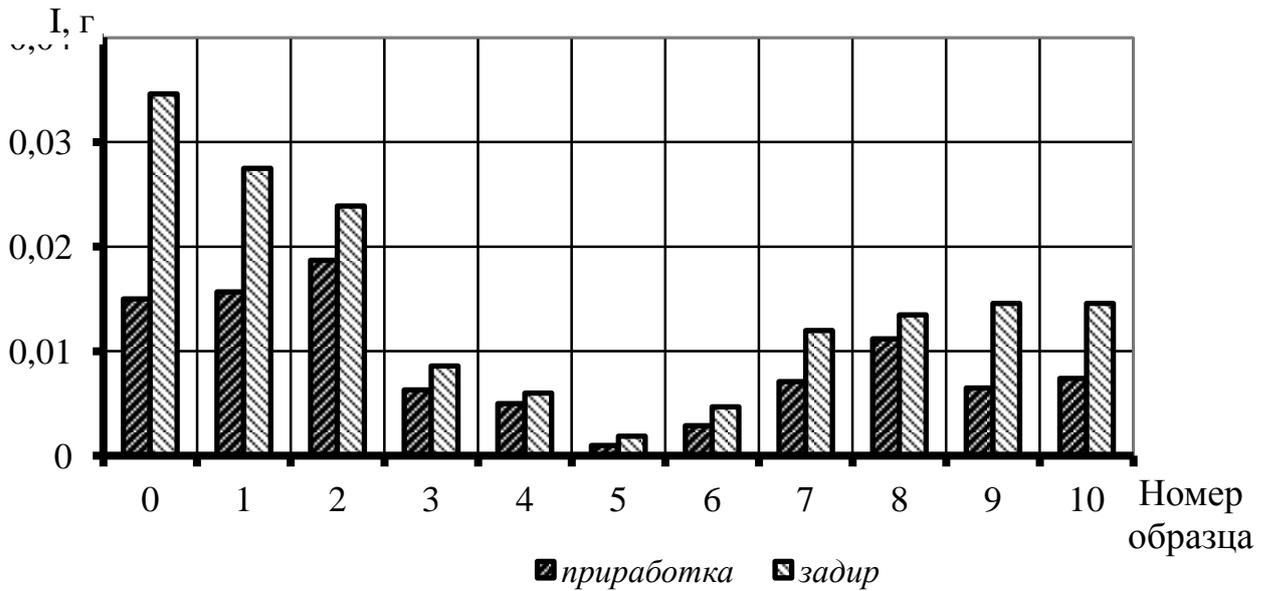


Рисунок 5.4 - Средний износ образцов ( $I$ ) в период приработки и задир

Интенсивность изнашивания изменяется в зависимости от угла наклона вставки к ширине образца (приложение 3.3) (рис. 5.5).

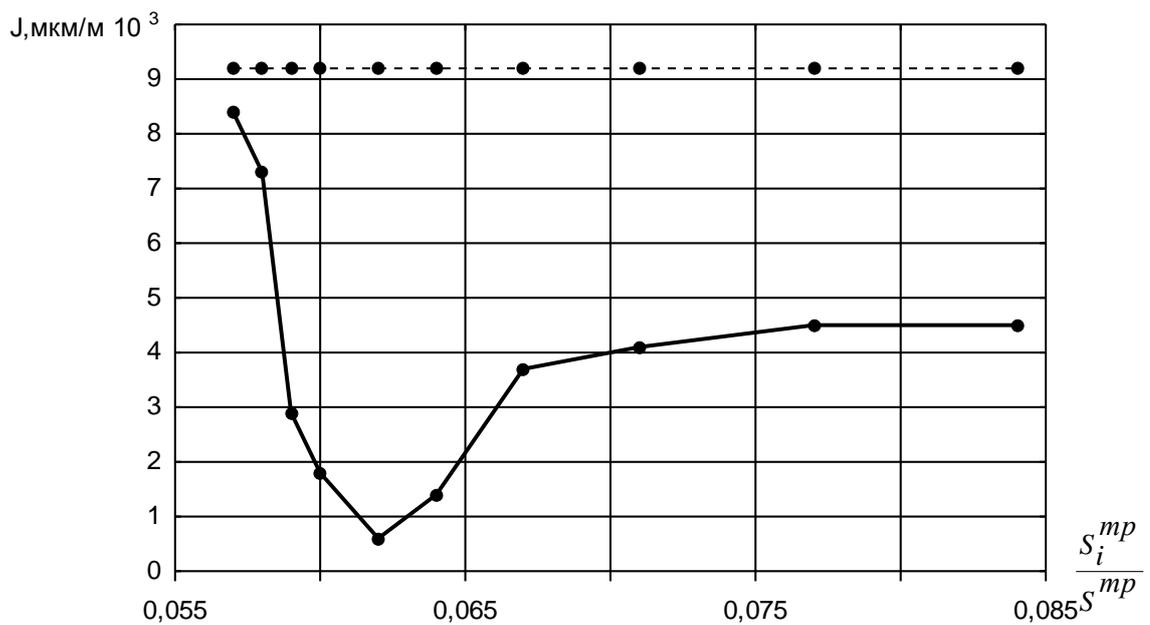


Рисунок 5.5 – Интенсивность изнашивания ( $J$ ) опытных образцов

На основании результатов исследований получено уравнение регрессии (см. приложение 3.4):

$$I = 9,8769 - 0,0119 \cdot \alpha - 5 \cdot P + 0,0002 \cdot \alpha^2 - 7 \alpha P - 8 \cdot P^2, \quad (5.1)$$

где  $I$  – износ образцов, мг;  $\alpha$  – угол наклона вставки, град.;  $P$  – нагрузка в трибоузле, Н.

Результаты исследований показали, что образцы с биметаллизированной поверхностью трения, имеют меньший износ, чем сплошной образец (рис. 5.6 а). Интенсивность изнашивания изменяется в зависимости от угла наклона канавки к ширине образца.

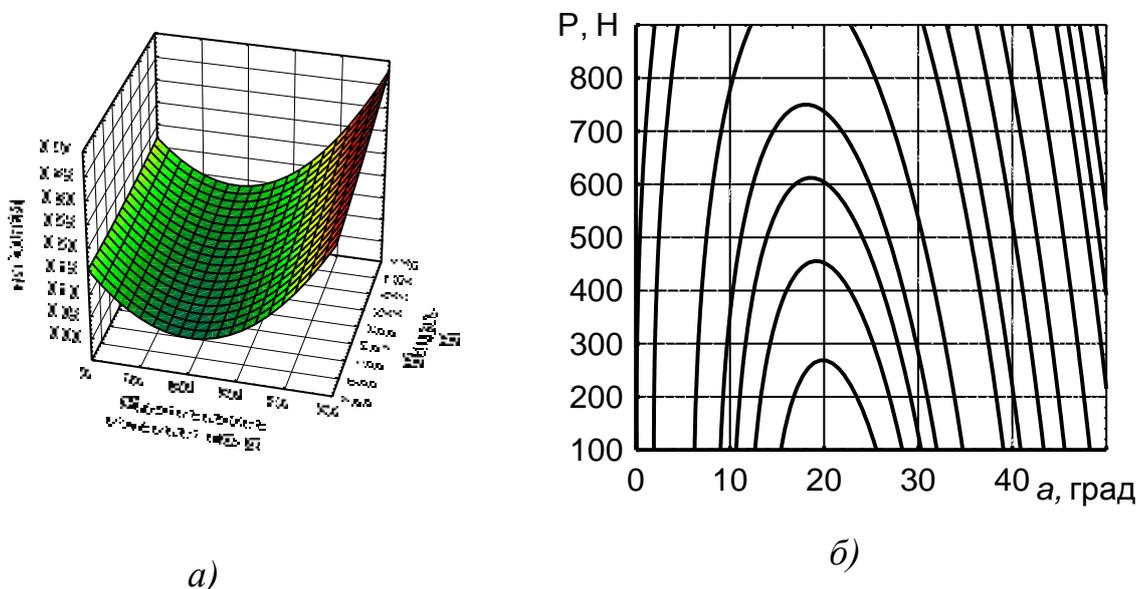


Рисунок 5.6 – Поверхность отклика: а) поверхность отклика, характеризующая износ образцов ( $I$ ) от угла наклона вставки ( $\alpha$ ) и давления ( $P$ ) в трибоузле; б) двухмерное сечение взаимодействия угла наклона вставки ( $\alpha$ ) и нагрузки в трибоузле ( $P$ )

Наименьшую интенсивность изнашивания имеют образцы с углом наклона от  $15^\circ$  до  $25^\circ$  (рис. 5.6 б). Максимальное значение интенсивности изнашивания наблюдается у образцов с углом наклона вставки  $0^\circ$  и  $5^\circ$ .

Результаты проведенных испытаний свидетельствуют о том, что для гильз цилиндров, при угле подъема вставки из меди менее  $15^\circ$ , поршневые кольца будут проходить зону канавок с ударом, а при угле подъема более  $45^\circ$  увеличится заброс масла в камеру сгорания двигателя. Таким образом, рациональный угол наклона вставки из меди находится в интервале  $15^\circ \dots 20^\circ$ , что обеспечивает снижение износа в среднем в 2,7 раза, интенсивность изнашивания на 48...83 %, момента трения на 14,7 % [166-168,170].

В процессе трения ролика по поверхностям образцов на поверхности последних образовался слой неизвестного состава. Для его выявления, поверхность трения образцов была исследована с помощью анализатора БАРС-

3. На основании проведенных исследований, согласно методике изложенной в разделе 4.2.4, определили процентное содержание ( $Cu$ ), перенесённой на трущуюся поверхность исследуемого образца, результаты замеров представлены в приложении 3.5.

В ходе проведённых исследований получили следующие результаты (рис. 5.7; 5.8).

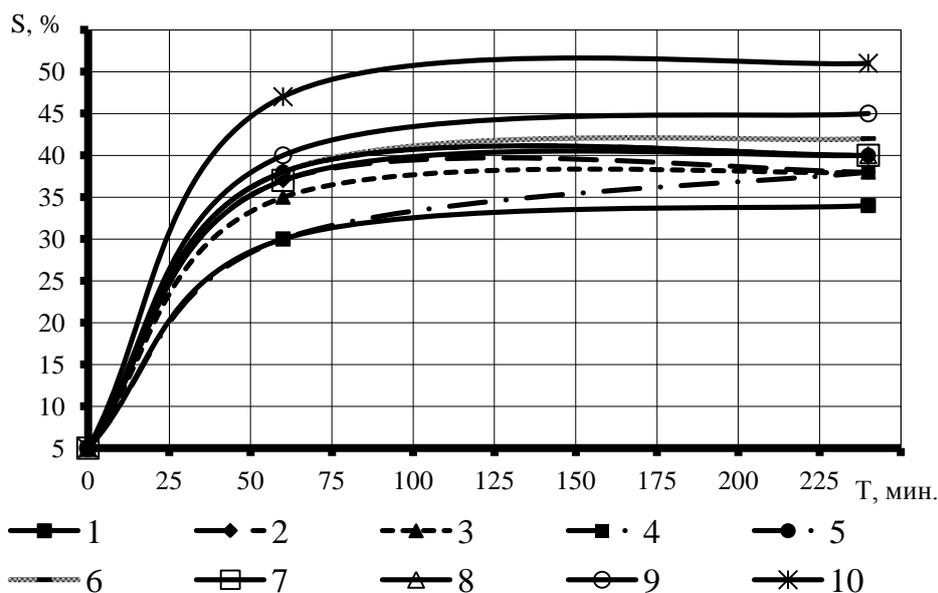


Рисунок 5.7 - График зависимости переноса (%) меди от времени работы (T)

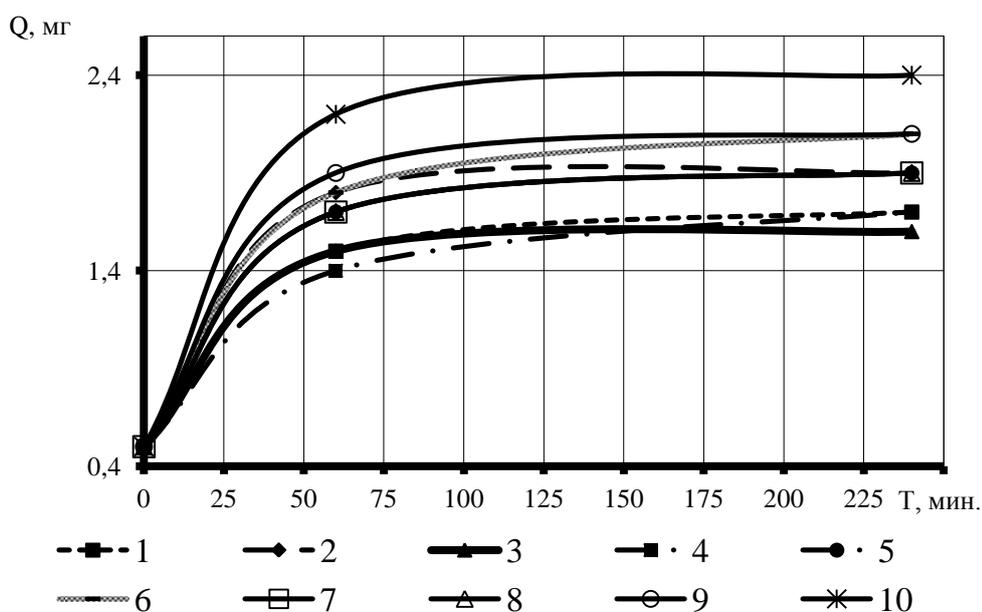


Рисунок 5.8 - График зависимости переноса меди (мг) от времени работы (T)

Анализ графиков (рис. 5.7, 5.8) показывает, что у образцов 4,5,6, наблюдается постепенное и постоянное нарастание количества переноса ( $Cu$ ).

На остальных образцах перенос ( $Cu$ ) происходит первые два часа работы, а затем наблюдается стабилизация или уменьшение содержания ( $Cu$ ). Следствием этого явилось покрытие трущейся поверхности металлом вставки (рис. 5.9).

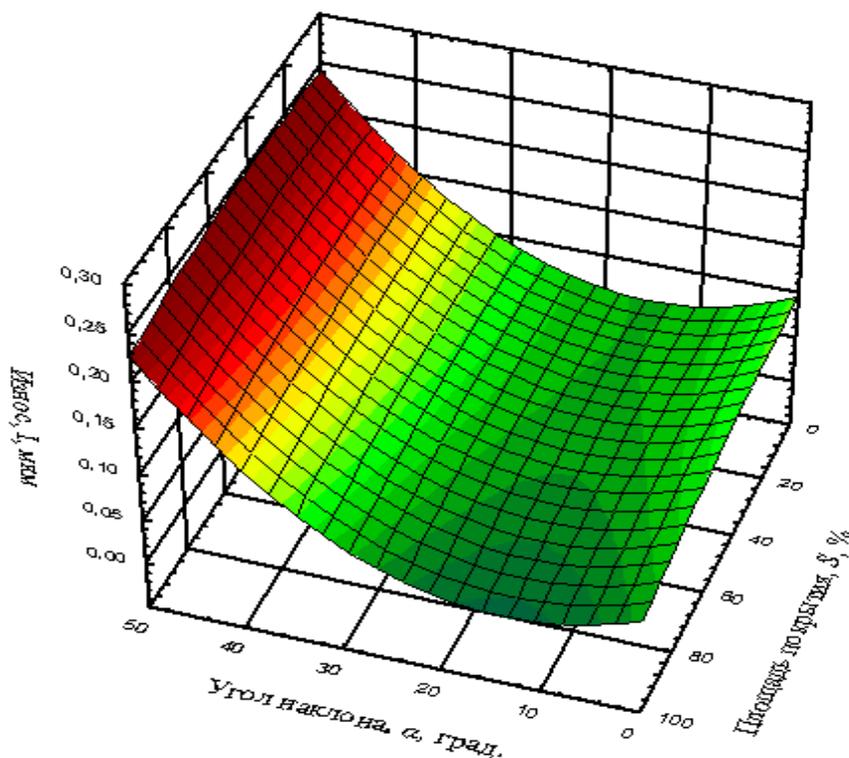


Рисунок 5.9 - Поверхность отклика характеризующая износ опытных образцов ( $I$ ) от угла наклона вставки ( $\alpha$ ) и площади покрытия медью ( $S$ ) трущейся поверхности

На основании результатов исследований получено уравнение регрессии:

$$I = 25,068 - 0,0136 \cdot \alpha - 0,0016 \cdot S + 0,0003 \cdot \alpha^2 - 5 \cdot \alpha \cdot S - 6 \cdot S^2, \quad (5.2)$$

где  $I$  – износ образцов, мг;  $\alpha$  – угол наклона вставки, град.;  $S$  – площадь покрытия, %.

Результаты исследований показывают, что наименьший износ трущихся поверхностей соответствует максимальной площади покрытия трущейся поверхности металлом вставки. Также было установлено, что наибольшая площадь покрытия трущейся поверхности происходит при угле наклона вставки в пределах  $10 \dots 20^\circ$  (рис. 5.10).

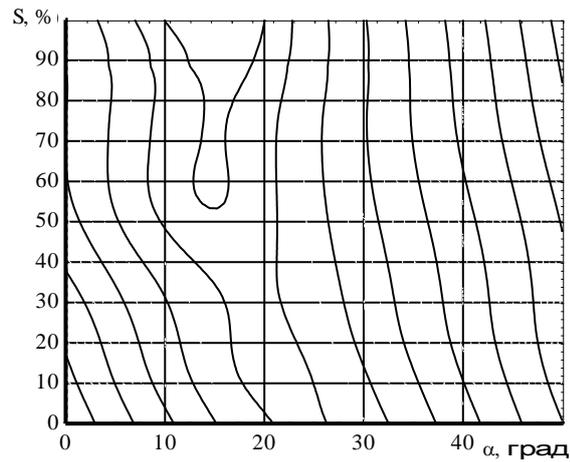


Рисунок 5.10 - Двухмерное сечение взаимодействия наклона вставки ( $\alpha$ ) и площади покрытия ( $S$ )

Таким образом, на основании результатов проведенных исследований можно сказать, что наибольшая площадь покрытия трущейся поверхности происходит при угле наклона вставки металла  $10...20^\circ$  и составляет  $84...86\%$  покрываемой площади.

Оценку шероховатости поверхности выполняли методом профилографирования, представленным в разделе 4.2.5, с выводом результатов на монитор ПК (рис. 5.11).

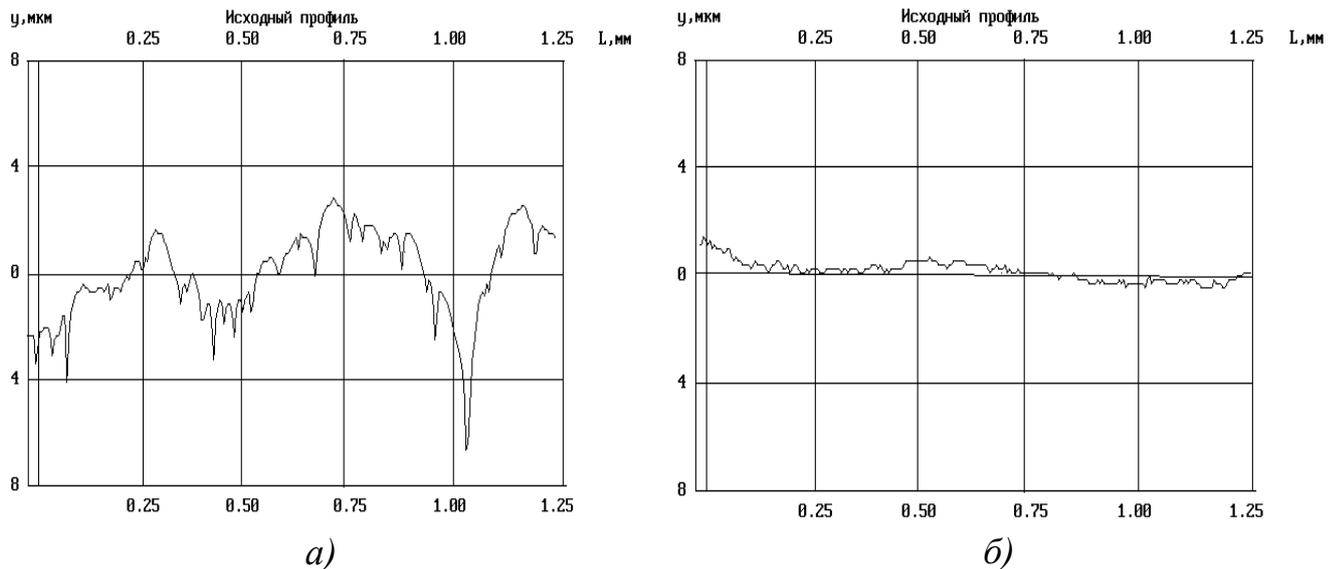


Рисунок 5.11 - Профилограммы поверхности образцов: а) до испытаний; б) после испытаний на машине трения СМТ-1 (режим приработки)

В результате обработки профилограмм были получены следующие характеристики шероховатости поверхности трения опытных образцов (табл. 5.1)

Таблица 5.1 - Параметры шероховатости поверхностей трения опытных образцов

Образцы	Параметры шероховатости, мкм		
	$R_{\max}$	$R_z$	$R_a$
До испытания	2,75	0,95	0,32
После испытания	1,98	0,45	0,28

Анализ таблицы 5.1 показывает, что в результате проведения приработки образцов, прослоенных медью, среднее отклонение профиля от средней линии уменьшилось на 12,5%. Шероховатость поверхностей после приработки свидетельствует о формировании рациональной микрогеометрии соединения, что обеспечивает долговечность работы соединения.

Таким образом, можно констатировать, что снижение износа связано со следующими процессами. Микронеровности, присутствующие на поверхности трения, попадая в зону пластических деформаций (при наличии меди), углубляются на величину, большую, чем это происходит в зоне упругих деформаций. При выходе из зоны пластических деформаций в зону упругих деформаций микронеровность попадает на режущую кромку упругого слоя и срезается, а клин пластичного материала, находящийся перед микронеровностью, разъединяет сопряжённые поверхности и увлекается движущейся микронеровностью до ближайшей впадины, заполняя её [167-169, 171,172].

## 5.2 Результаты ускоренных лабораторных испытаний гильз цилиндров на износостойкость

Результаты ускоренных лабораторных испытаний типовой и биметаллизированной гильз цилиндров на износостойкость представлены в приложении 3.6. Интенсивность изнашивания гильз цилиндров по высоте представлены на рис. 5.12.

При исследовании типовой гильзы цилиндра максимальная интенсивность изнашивания  $J$  составила в верхней и нижней мертвых точках соответственно  $9 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$  и  $7,2 \text{ мкм}/(\text{м} \cdot 10^5)$ , соответствующих 10 мм от верхнего и

50 мм – от нижнего торца гильзы. Наименьшая интенсивность изнашивания  $5,1 \text{ мкм}/(\text{м}\cdot 10^5)$  наблюдали на расстоянии 70 мм от верхнего торца гильзы.

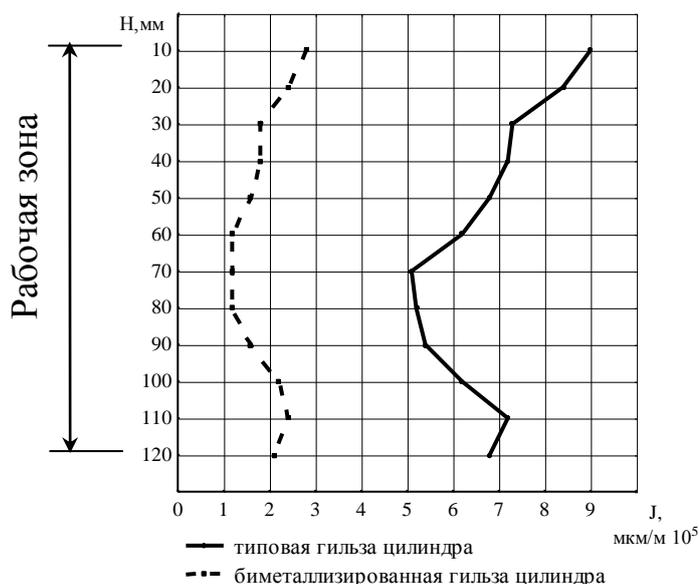


Рисунок 5.12 – Интенсивность изнашивания (J) гильз цилиндров по высоте (H)

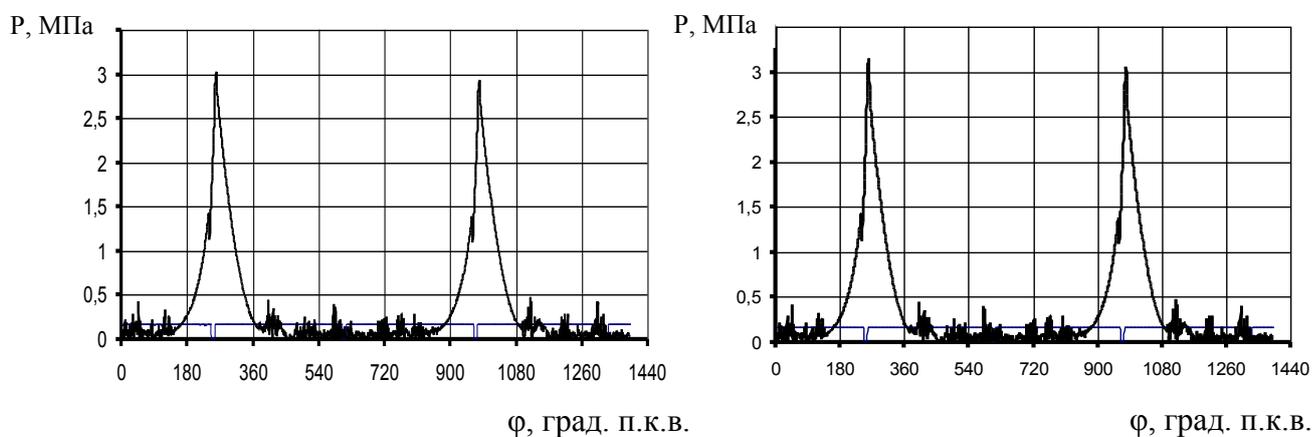
Исследования биметаллизированной гильзы цилиндра показали, что в верхней и нижней мертвых точках интенсивность изнашивания составила соответственно  $2,8 \text{ мкм}/(\text{м}\cdot 10^5)$  и  $2,4 \text{ мкм}/(\text{м}\cdot 10^5)$ , а в средней части гильзы не превышает  $1,5 \text{ мкм}/(\text{м}\cdot 10^5)$ .

Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод, что металлизация гильзы цилиндра вставками меди позволяет улучшить смазывающие свойства трущейся поверхности гильзы цилиндра. Это подтверждается снижением интенсивности износа гильзы цилиндра в мертвых точках в 3 раза, а в средней части - в 4 раза [153,173].

### 5.3 Результаты сравнительных стендовых исследований двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации и оснащённого биметаллизированными гильзами

Анализ стендовых исследований показывает, что использование биметаллизированных гильз цилиндров позволит улучшить мощностные, топливно-экономические и экологические показатели, а также увеличить ресурс работы двигателя за счёт создания в теле гильзы поперечных слоёв из меди.

На рис. 5.13 представлена индикаторная диаграмма двигателя, оснащённого типовыми и биметаллизированными гильзами при частоте вращения коленчатого вала  $n = 800 \text{ мин}^{-1}$ .



а)

б)

Рисунок 5.13 - Индикаторные диаграммы двигателя, оснащенного типовыми (а) и биметаллизированными (б) гильзами

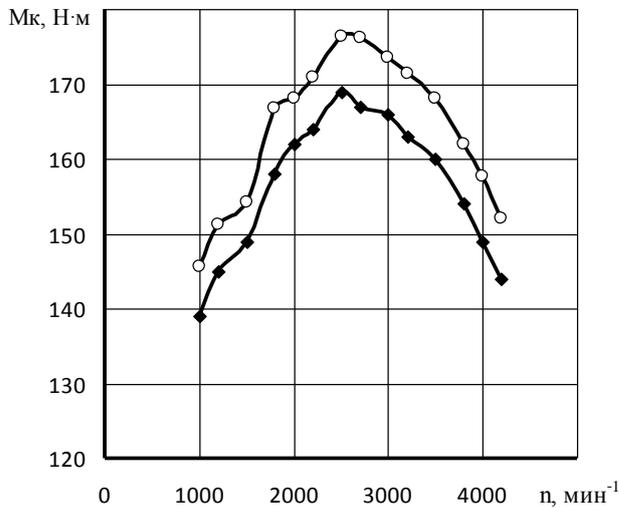
Аналогичные индикаторные диаграммы (Приложение 3.7) снимались при частоте вращения от 800 до 4200  $\text{мин}^{-1}$  с интервалом 200  $\text{мин}^{-1}$

Анализ диаграмм показывает, что у двигателя, оснащённого биметаллизированными гильзами, максимальное давление газов в конце сгорания на 2...5 % выше, чем у двигателя, оснащенного типовыми гильзами.

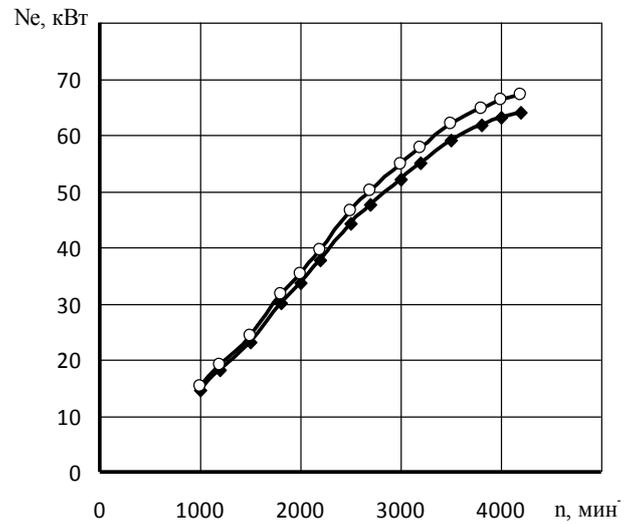
По полученным данным были построены скоростные (рис. 5.14) и нагрузочные (рис. 5.15) (Приложение 3.8) характеристики двигателей, оснащённых типовыми и биметаллизированными гильзами цилиндров.

Анализ скоростных характеристик показывает, что наблюдается рост эффективной мощности двигателя ( $N_e$ ), оснащенного биметаллизированными гильзами во всем диапазоне скоростного режима. Так, при частоте вращения коленчатого вала 4200  $\text{мин}^{-1}$  мощность  $N_e = 67,2 \text{ кВт}$ , тогда как у двигателя, оснащенного типовыми гильзами,  $N_e = 64 \text{ кВт}$ . Максимальный крутящий момент ( $M_K$ ) при частоте вращения 2500  $\text{мин}^{-1}$  составил 176,4  $\text{Н} \cdot \text{м}$  у двигателя с биметаллизированными гильзами и 169  $\text{Н} \cdot \text{м}$  у двигателя с типовыми гильзами. Удельный эффективный расход топлива ( $g_e$ ) на номинальных оборотах 4200  $\text{мин}^{-1}$  у двигателя с биметаллизированными гильзами снизился на

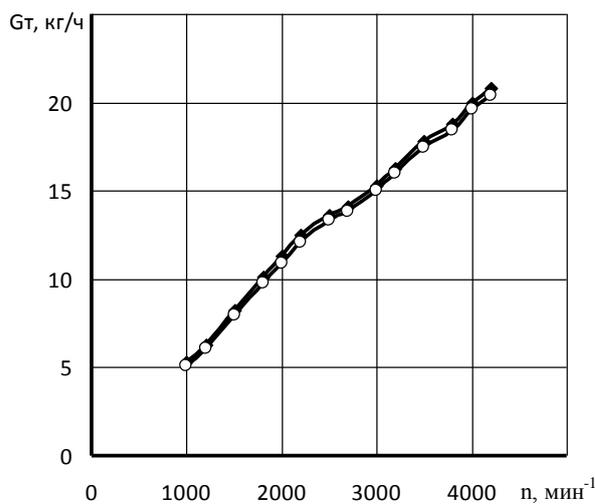
6,8 % и составил 303,3 г/кВт·ч, тогда как у двигателя с типовыми гильзами он равен 321 г/кВт·ч, часовой расход топлива ( $G_T$ ), составил соответственно 20,4 кг/ч и 20,8 кг/ч.



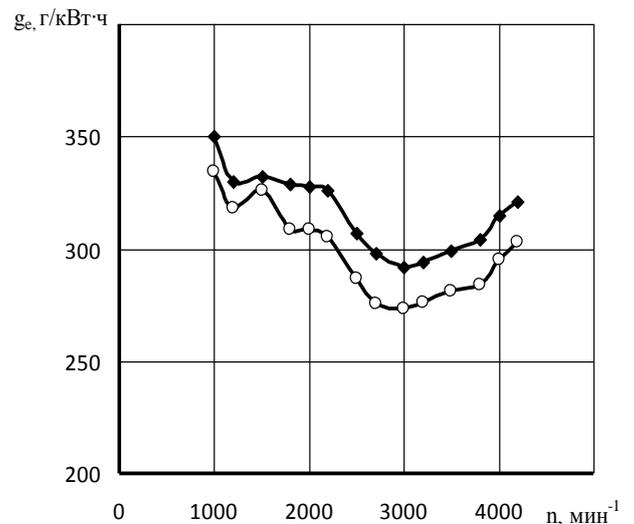
а) крутящий момент ( $M_k$ )



б) эффективная мощность ( $N_e$ )



в) удельный эффективный расход топлива ( $g_e$ )



г) часовой расход топлива ( $G_T$ )

◆ – типовая гильза; ○ – биметаллизированная гильза

Рисунок 5.14 - Скоростная характеристика двигателя, оснащенного типовыми и биметаллизированными гильзами

Показатели нагрузочной характеристики двигателя определяли при частоте вращения коленчатого вала  $2500 \text{ мин}^{-1}$ , так как эта частота соответствует максимальному крутящему моменту по внешней скоростной характери-

стике и рекомендована заводом-изготовителем при снятии контрольных точек (рис. 5.15).

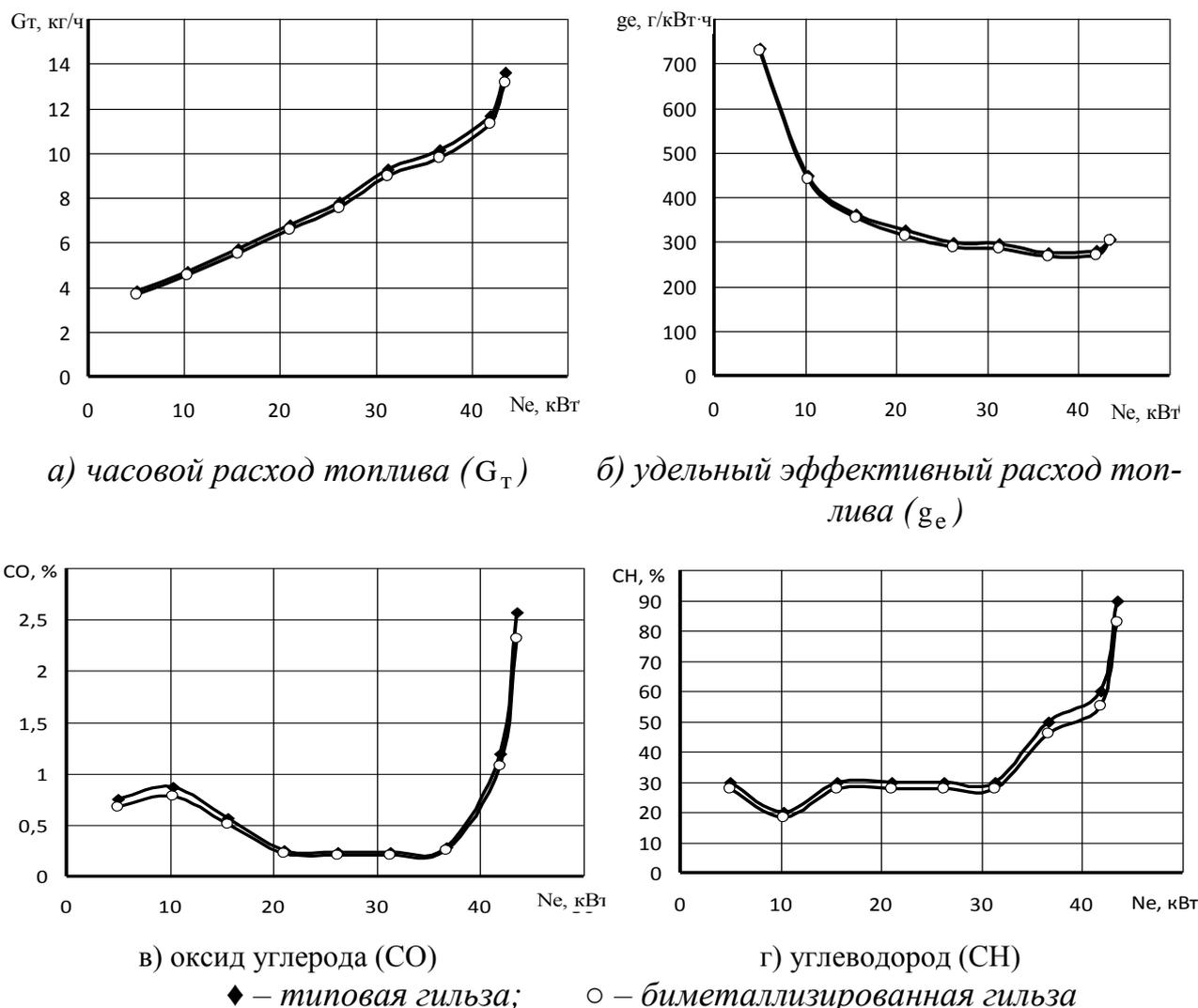


Рисунок 5.15 - Нагрузочная характеристика двигателя, оснащенного типовыми и биметаллизированными гильзами

Анализ нагрузочных характеристик показывает, что часовой расход топлива на режиме малых нагрузок у двигателя с биметаллизированными гильзами составил 3,7 кг/ч при минимальной мощности 5 кВт и оборотах  $2500 \text{ мин}^{-1}$ , против 3,8 кг/ч у двигателя с типовыми гильзами. Удельный эффективный расход на том же режиме составил соответственно 729 и 735 г/кВт · ч. Наблюдается и разное содержание оксида углерода (CO) и углеводородов (CH) в отработавших газах. У двигателя, оснащенного биметаллизированными гильзами, по сравнению с типовыми снижение CO составило в среднем 10%, а CH – 8%.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы. Использование биметаллизированных гильз цилиндров позволяет повысить эффективную мощность двигателя в режиме на номинальной частоте вращения коленчатого вала на 4,8 %, максимальный крутящий момент на 4,1 %, уменьшить в среднем часовой и удельный эффективный расходы топлива соответственно на 2,6 % и 5,6 %, снизить содержание в отработавших газах оксида углерода и углеводородов соответственно на 10 % и 8 % по сравнению с работой двигателя, оснащенного штатными гильзами цилиндров.

После проведения стендовых исследований степень износа гильз цилиндров определяли линейным и весовым методом (приложение 3.2).

Средние значения износа по высоте гильз цилиндров представлены на рисунке 5.16.

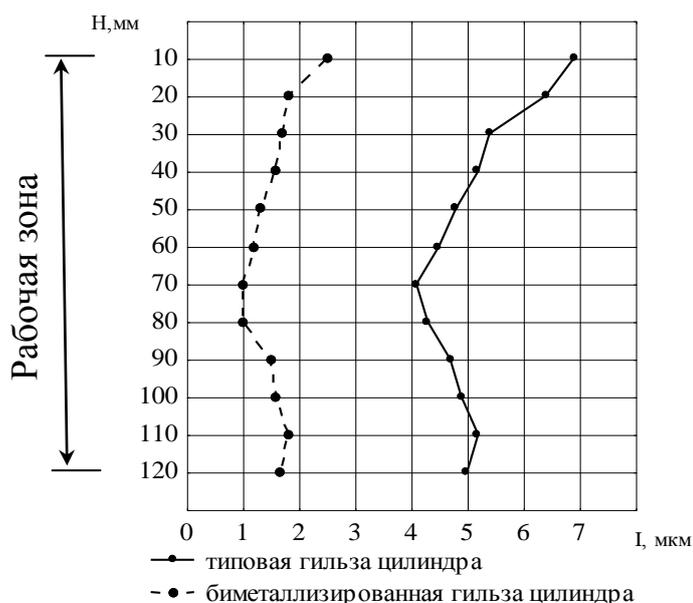


Рисунок 5.16 – Износ ( $I$ ) по высоте гильзы цилиндров ( $H$ )

Установлено, что средний максимальный износ  $I$  типовых гильз цилиндра составил в верхней и нижней мертвых точках соответственно 6,9 мкм и 5,2 мкм, соответствующих 10 мм от верхнего и 50 мм – от нижнего торца гильзы (рис. 5.16). Наименьший износ составил 4,1 мкм на расстоянии 70 мм от верхнего торца гильзы, в верхней и нижней мертвых точках износ составил соответственно 2,5 мкм и 1,8 мкм, а в средней части гильзы не превысил 1,2 мкм.

По полученным данным (приложение 3.2) построены гистограммы результатов взвешивания типовых и биметаллизированных гильз цилиндров (рис. 5.17).

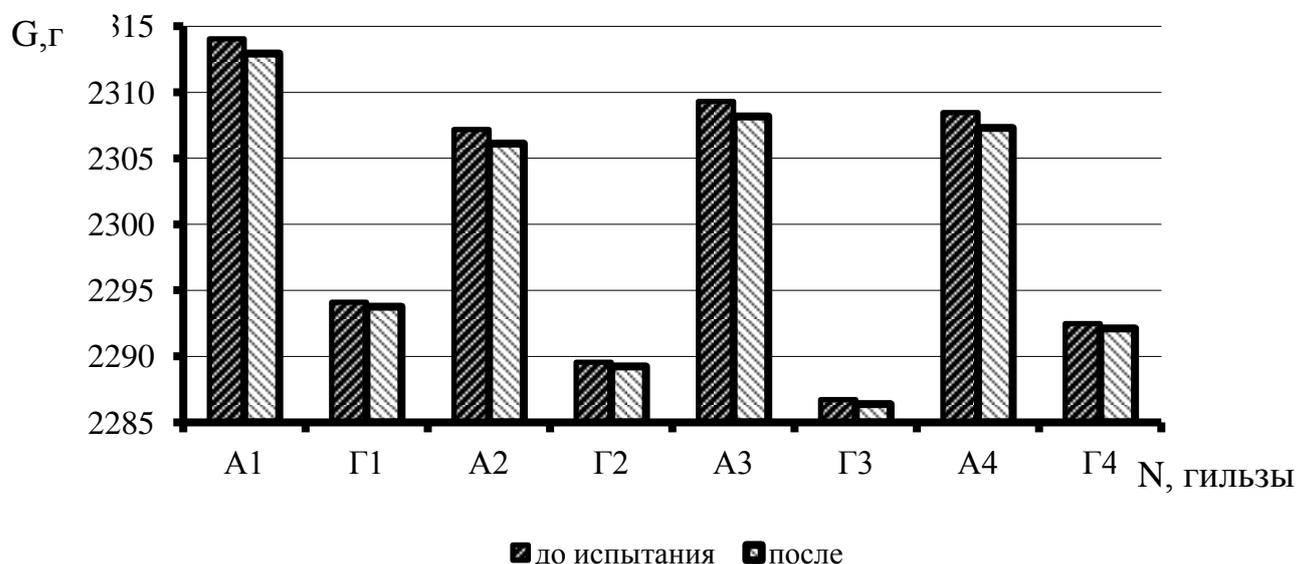


Рисунок 5.17 – Результаты взвешивания ( $G$ ) гильз цилиндров: А 1,2,3,4 типовые гильзы; Г 1,2,3,4 биметаллизированные гильзы

В весовом отношении средний износ типовых гильз составил 1,12 г, а с биметаллизированной поверхностью трения 0,33 г, то есть в 3,4 раза меньше (рис. 5.18).

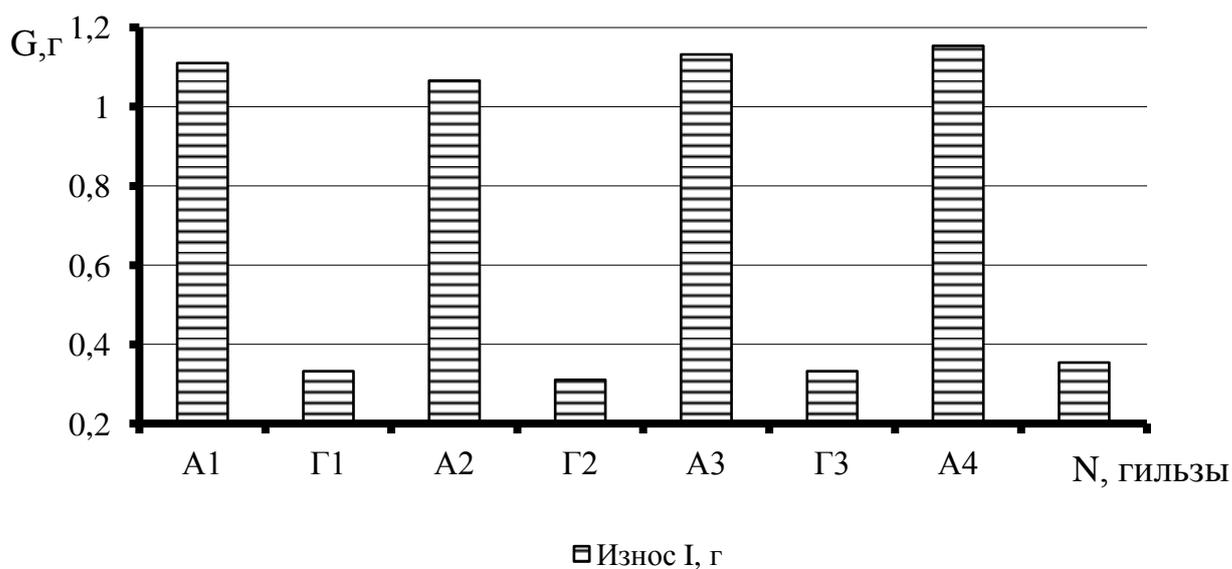


Рисунок 5.18 – Средний износ ( $I$ ) гильз цилиндров: А 1,2,3,4 типовые гильзы; Г 1,2,3,4 биметаллизированные гильзы

Уменьшение износа биметаллизированной гильзы цилиндра обусловлено образованием на поверхности трения антифрикционной пленки и снижением коэффициента трения.

#### **5.4 Результаты эксплуатационных исследований автомобилей УАЗ-3303, оснащённых двигателями в штатной и экспериментальной Комплектации**

Эксплуатационные исследования проводили на двух автомобилях УАЗ-3303 выпуска 2007 г. с пробегом 130...150 тыс. км в условиях рядовой эксплуатации в хозяйстве Ульяновской области на базе ООО «Приморье», согласно методике, описанной в подразделе 4.4. На автомобилях были установлены капитально отремонтированные двигатели УМЗ-417 в штатной (типовые гильзы цилиндров) и экспериментальной (биметаллизированные гильзы цилиндров) комплектации. Наблюдения за эксплуатацией автомобилей и сбор информации о их наработке и техническом состоянии проводили непосредственно в хозяйстве, где они эксплуатировались. Информацию о наработке автомобилей брали в бухгалтерии, о техническом состоянии – у водителей и механиков хозяйства. Средний пробег автомобилей за время исследований составил 19200 км. За время проведения эксплуатационных исследований отказов цилиндро-поршневой группы не наблюдалось.

Проведенные исследования износа гильз цилиндров двигателей УМЗ-417 (Приложение 3.9) в условиях рядовой эксплуатации показали следующие результаты (рис. 5.19).

У автомобилей с типовыми гильзами цилиндров наблюдалось интенсивное изнашивание гильз до 9600 км пробега, и составил 44 мкм. При дальнейшем пробеге износ увеличился незначительно и составил при пробеге 12800 км в среднем 47 мкм по цилиндрам двигателей. У автомобилей, оснащенных двигателями с биметаллизированными гильзами цилиндров, до 6400 км пробега наблюдался интенсивный износ до 15 мкм.

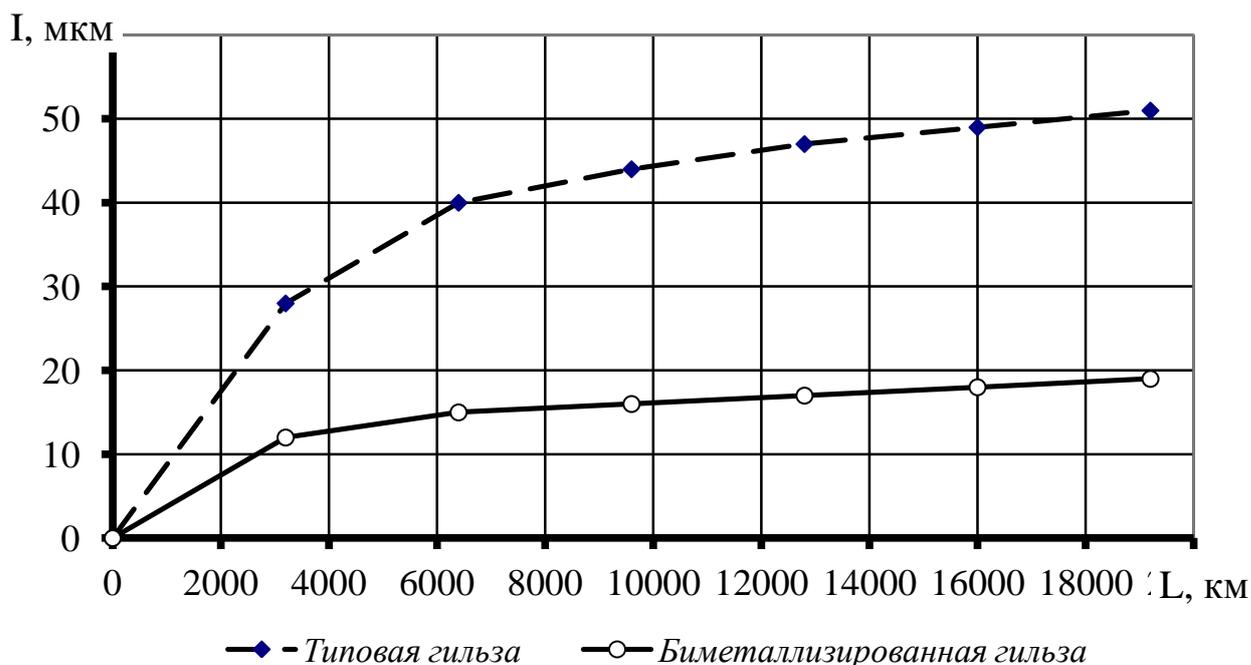


Рисунок 5.19 - Средний износ (I) гильз цилиндров от пробега автомобилей (L)

При дальнейшем пробеге наблюдалось незначительное увеличение износа, составившее в среднем при 9600 – 16 мкм и 12800 – 17 мкм. Увеличение износа в первые 6400 км пробега связано с приработкой трущихся пар ЦПГ.

Стабилизирование процесса изнашивания у биметаллизированных гильз цилиндров при дальнейшей эксплуатации, связано с образованием на поверхностях трения антифрикционного, износостойкого поверхностного слоя и его восстановления в процессе трения.

При дальнейшем пробеге, составляющем 19200 км, износ типовых гильз увеличился до 51 мкм, а биметаллизированных до 19 мкм.

Микрометраж гильз цилиндров показывает, что износ биметаллизированных гильз цилиндров на 32 мкм меньше, чем у типовых гильз.

Таким образом, эксплуатационные исследования подтверждают теоретические расчеты и результаты лабораторных исследований износостойкости гильз цилиндров с биметаллизированной поверхностью трения о снижении износа гильз цилиндров двигателей, укомплектованных биметаллизированными гильзами со вставками меди в 2,7 раза по сравнению с серийными гильзами цилиндров двигателей.

Минимальный путевой расход топлива автомобиля УАЗ-3303 с двигателем УМЗ-417, оснащённого типовыми гильзами цилиндров, составил 15,7 л на 100 км пробега, при скорости 80 км/ч, а у автомобиля, оснащённого двигателем с биметаллизированными медью гильзами цилиндров, снизился на 4% и составил 15,1 л на 100 км пробега при той же скорости (Приложение 3.9 рис. 5.20).

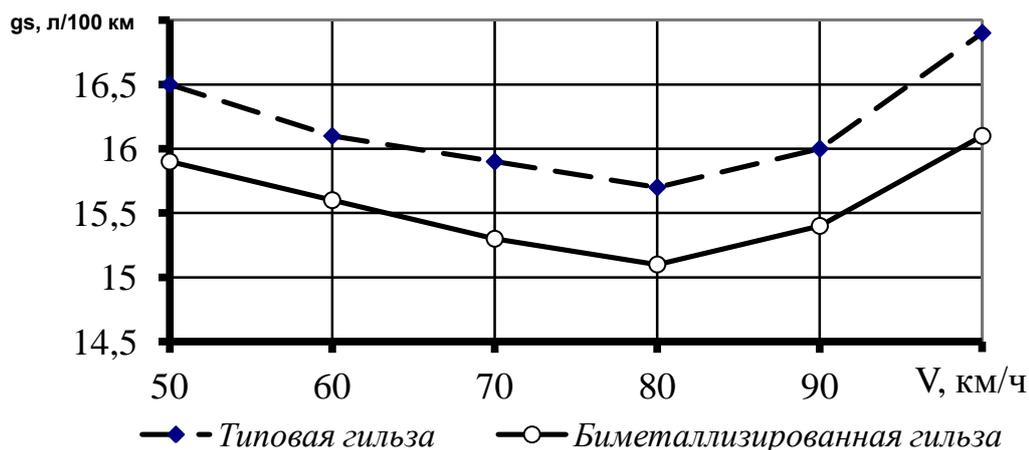


Рисунок 5.20 - Средний путевой расход топлива ( $g_s$ ) от скорости ( $V$ ) автомобилей

Давление газов в конце такта сжатия по цилиндрам двигателей измерялось перед микрометражом гильз цилиндров.

Изменение давления в камере сгорания (компрессии) по цилиндрам исследуемых двигателей показали следующие результаты (рис. 5.21).

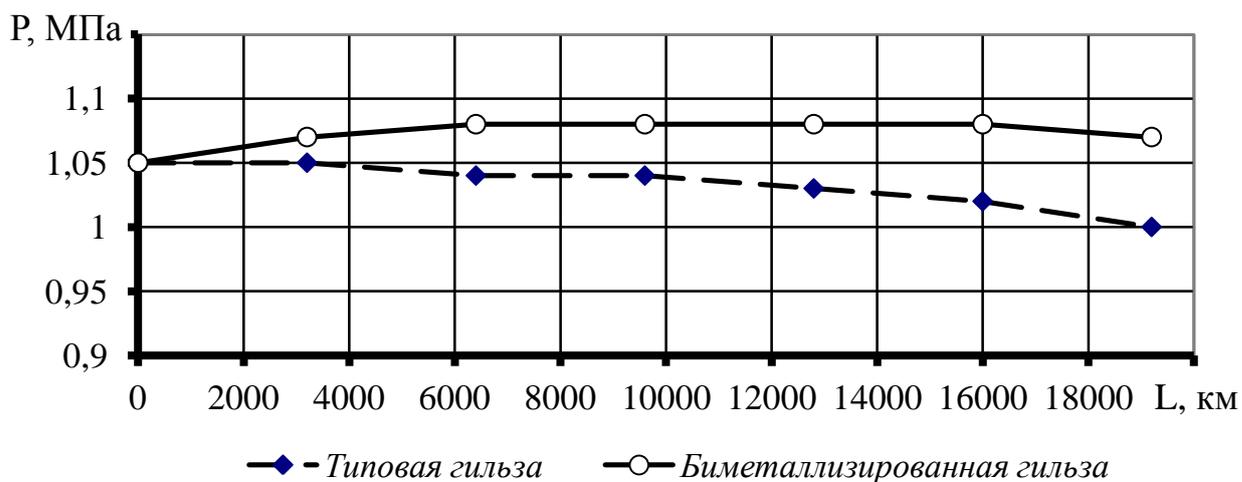


Рисунок 5.21 – Изменение давления в конце такта сжатия ( $P$ ) в цилиндрах двигателя от пробега ( $L$ ) автомобилей

Среднее значение давления газов в конце такта сжатия по цилиндрам двигателей перед началом исследований составляло 1,05 МПа, как у двигателей в штатной ( типовые гильзы), так и в экспериментальной (биметаллизированные гильзы цилиндров) комплектации.

Компрессия в цилиндрах двигателей с типовыми гильзами начала снижаться после пробега 3200 км и составила 1,0 МПа при пробеге автомобиля 19200 км.

Изменение динамики давления в камерах сгорания двигателя оснащенного биметаллизированными гильзами цилиндров, объясняется следующим: при пробеге 3200 - 6400 км осуществлялся процесс приработки деталей цилиндропоршневой группы, одновременно образовывалась антифрикционная пленка на рабочей поверхности гильз металлом вставок (медью), что способствовало заполнению микронеровностей на трущейся поверхности гильз, более плотному прилеганию поршневых колец и, как следствие, повышению давления в конце такта сжатия до 1,08 МПа. В дальнейшем с увеличением износа рабочей поверхности биметаллизированной гильзы цилиндров наблюдалось незначительное снижение давления до 1,07 МПа, соответствующее пробегу в 19200 км.

К концу пробега, 19200 км, давление в камерах сгорания (в конце такта сжатия) двигателей с типовыми гильзами составило 1,0 МПа, а у биметаллизированных – 1,07 МПа, т.е. на 6,5 % выше.

### **Выводы**

1. По результатам лабораторных исследований можно сделать следующие выводы:

- опытные образцы с углами наклона вставки меди в интервале 15°...20° обеспечили снижение износа в среднем 2,7 раза, интенсивности изнашивания на 48...83 %, момента трения на 14,7 % по сравнению со сплошным образцом;

- данные рентгеновского спектрального анализа поверхностей трения биметаллизированных образцов свидетельствуют о наличии на трущейся поверхности меди;

- наблюдается уменьшение шероховатости у биметаллизированных образцов на 12,5 % по сравнению со сплошным.

2. На основании проведенных ускоренных лабораторных испытаний гильз цилиндров на износостойкость можно сделать вывод, что биметаллизация гильзы цилиндра вставками меди позволяет снизить интенсивность изнашивания гильзы цилиндра в мертвых точках в 3 раза, а в средней части - в 4 раза по сравнению с типовой гильзой.

3. Результаты сравнительных стендовых исследований двигателя УМЗ-417 установлено, что средний износ биметаллизированных медью гильз цилиндров меньше в 3,4 раза по сравнению с типовыми. Использование биметаллизированных гильз цилиндров позволяет повысить эффективную мощность на 4,8 %, уменьшить часовой и удельный расходы топлива соответственно на 4,8 % и 9,1 %, а также снизить содержание в отработавших газах оксида углерода на 10 % и углеводородов на 8 % по сравнению с двигателем со штатными гильзами.

4. Результаты сравнительных эксплуатационных исследований автомобилей УАЗ-3303, укомплектованных двигателем с биметаллизированными гильзами цилиндров показывают, что снижается линейный износ рабочей поверхности трения гильз цилиндров в 2,7 раза; уменьшается средний путевой расход топлива на 4 % и увеличивается давление газов в камере сгорания в конце такта сжатия на 6,5 % по сравнению с двигателем, укомплектованным штатными гильзами цилиндров.

## 6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЯ УАЗ 3303 С ДВИГАТЕЛЕМ, ОСНАЩЁННЫМ БИМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ГИЛЬЗАМИ ЦИЛИНДРОВ

Экономическую эффективность работы автомобиля при работе двигателя с биметаллизированными гильзами цилиндров определяли путём сравнения затрат на эксплуатацию автомобиля по двум вариантам: базовому (при работе двигателя с типовыми гильзами цилиндров) и внедряемому (с биметаллизированными гильзами) и использованием действующих значений коэффициентов, тарифных ставок, годового пробега автомобилей, стоимости топлива и опытного образца (биметаллизированная гильза цилиндров).

Величину годового расхода топлива по базовому и внедряемому вариантам принимаем по фактическому расходу, полученному в результате эксплуатационных исследований автомобилей УАЗ.

В общем виде эффективность внедрения новых технических средств определяется зависимостью [174,175]:

$$\mathcal{E} = \left[ \Pi_1 \frac{B_2}{B_1} \cdot \frac{P_1 + E_H}{P_2 + E_H} + \frac{(I_1 - I_2) - E_H \cdot (K_2 - K_1)}{P_2 + E_H} - \Pi_2 \right] \cdot A, \quad (6.1)$$

где  $\Pi_1, \Pi_2$  – приведённые затраты в базовом (индекс 1) и внедряемом (индекс 2) вариантах, руб;  $B_1, B_2$  – годовые пробеги автомобилей, км;  $P_1, P_2$  – доли отчисления от балансовой стоимости двигателя на восстановление, км;  $I_1, I_2$  – расходы (издержки) на эксплуатацию двигателя у потребителей, руб;  $K_1, K_2$  – сопутствующие капитальные вложения, руб;  $A$  – количество обслуживаемых изделий;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

При внедрении технических средств сопутствующие капитальные вложения  $K_1, K_2$  отсутствуют, а величина  $\Pi_1$  в большинстве случаев не является определяющей, тогда формула (5.1) приобретает вид

$$\mathcal{E} = (I_1 - I_2) / (P_2 + E_H). \quad (6.2)$$

Расчёт годовой экономии при работе двигателя с биметаллизированной гильзой цилиндров осуществляется по формуле:

$$\mathcal{E}_T = I_1 - I_2, \quad (6.3)$$

где  $I_1$  – годовые эксплуатационные издержки при работе двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации, руб.;  $I_2$  – годовые эксплуатационные издержки при работе двигателя, оснащенного биметаллизированной гильзой цилиндров, руб.

Годовые эксплуатационные издержки рассчитываем по формуле:

$$I = Z + T + A + P + \Pi, \quad (6.4)$$

где  $Z$  – оплата труда водителя, руб.;  $T$  – затраты на топливо, руб.;  $A$  – амортизационные отчисления на полное восстановление основных средств, руб.;  $P$  – затраты на ремонт и техническое обслуживание, руб.;  $\Pi$  – прочие прямые затраты (стоимость вспомогательных материалов, затраты на хранение и пр.), руб.

Оплата труда исполнителей

$$Z = \sum L \cdot C_q \cdot K_0 \cdot T_T, \quad (6.5)$$

где  $L$  – количество водителей, чел.;  $C_q$  – часовая тарифная ставка, руб. (часовая тарифная ставка водителя 3-го класса 44,27 руб./ч);  $K_0$  – коэффициент увеличения оплаты труда по тарифу;  $T_T$  – годовой объем работ, чел.·ч; (2300 чел.·ч).

Коэффициент  $K_0 = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5$  рассчитываем при использовании автомобиля УАЗ на производстве:  $K_1$  – коэффициент, доплат за перевезённую продукцию ( $K_1 = 1,25 \dots 1,50$ );  $K_2$  – коэффициент, учитывающий надбавку за классность ( $K_2 = 1,1 \dots 1,2$ );  $K_3$  – коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату ( $K_3 = 1,15$ );  $K_4$  – коэффициент, учитывающий начисления на выплату страховых взносов ( $K_4 = 1,278$ );  $K_5$  – коэффициент, учитывающий оплату отпусков ( $K_5 = 1,06 \dots 1,1$ ).

Коэффициент увеличения оплаты труда и заработная плата водителей

$$K_0 = 1,25 \cdot 1,1 \cdot 1,15 \cdot 1,278 \cdot 1,06 = 2,14$$

$$Z = 1 \cdot 44,27 \cdot 2,14 \cdot 2300 = 217896 \text{ руб.}$$

Затраты на моторное топливо для проведения транспортных работ:

$$T = W_{\Gamma} \cdot C_{\text{Б}}, \quad (6.6)$$

где  $W_{\Gamma}$  – годовой расход моторного топлива, л;  $C_{\text{Б}}$  – цена 1 литра моторного топлива, руб.

Цена 1 литра бензина А-80 – 22,3 руб. (по среднегодовым рыночным ценам 2011 года).

Годовой расход моторного топлива

$$W_{\Gamma} = q_{\text{Е.Р.}} \cdot K_{\text{Р.Д.}}, \quad (6.7)$$

где  $q_{\text{Е.Р.}}$  – ежесменный расход топлива, л;  $K_{\text{Р.Д.}}$  – количество рабочих дней (300 дней).

$$q_{\text{Е.Р.}} = \frac{L_{\text{Е}} \cdot p_{\text{Р.Т.}}}{100}, \quad (6.8)$$

где  $L_{\text{Е}}$  – ежесменный пробег автомобиля, км;  $p_{\text{Р.Т.}}$  – путевой расход топлива 15,7 л./ 100 км.

По результатам эксплуатационных исследований (гл. 5 п. 5.4) автомобиля УАЗ 3303 оснащенного двигателем УМЗ-417 с биметаллизированными гильзами цилиндров получены результаты снижения расхода топлива на 4 % и составляющие  $p_{\text{Р.Т.}}$  – 15,1 л./ 100 км.

$$L_{\text{Е}} = \frac{L_{\Gamma}}{K_{\text{Р.Д.}}}, \quad (6.9)$$

где  $L_{\Gamma}$  – годовой пробег автомобиля, км, ( $L_{\Gamma} = 45000$  км)

Тогда годовые затраты на моторное топливо при проведении транспортных работ будут равны:

а) при работе двигателя с типовой гильзой цилиндров

$$L_{\text{Е}} = \frac{45000}{300} = 150 \text{ км},$$

$$q_{\text{Е.Р.}} = \frac{150 \cdot 15,7}{100} = 23,55 \text{ л.},$$

$$W_{\Gamma} = 23,55 \cdot 300 = 7065 \text{ л.},$$

$$T = 7065 \cdot 22,3 = 157549,5 \approx 157550 \text{ руб.}$$

б) при работе двигателя с биметаллизированной медью гильзой цилиндров

$$L_E = \frac{45000}{300} = 150 \text{ км},$$

$$q_{E.P.} = \frac{150 \cdot 15,1}{100} = 22,65 \text{ л.},$$

$$W_T = 22,65 \cdot 300 = 6795 \text{ л.},$$

$$T = 6795 \cdot 22,3 = 151528,5 \text{ руб.}$$

Стоимость нового двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации равна -  $B_I = 48000$  руб. Стоимость двигателя с биметаллизированной гильзой цилиндров складывается из дополнительных затрат на изготовление биметаллизированной гильзы цилиндров и установку на двигатель.

Затраты на изготовление (на одну гильзу) будут равны:

$$C_{\text{доп}} = K_{\text{накл}} \cdot (C_{\text{зар}} + C_{\text{мат}}), \quad (6.10)$$

где  $K_{\text{НАКЛ}}$  – коэффициент накладных расходов ( $K_{\text{НАКЛ}} = 1,10$ );  $C_{\text{ЗАР}}$  – затраты на зарплату рабочим, руб.;  $C_{\text{МАТ}}$  – затраты на наплавляемый материал, руб.

Заработная плата рабочих при изготовлении биметаллизированной гильзы цилиндров:

$$C_{\text{ЗАР}} = C_{\text{ч}} \cdot (t_{\text{ТОК}} + t_{\text{НАП}} + t_{\text{ШЛ}}) + C_{\text{Д}} + C_{\text{СТР.П}}, \quad (6.11)$$

где  $C_{\text{ч}}$  – часовая тарифная ставка рабочих 4 разряда ( $C_{\text{ч}} = 40,95$ ), руб;  $t_{\text{ТОК}}$  – норма времени на токарные работы, ч (нарезка кольцевых канавок на рабочую поверхность трения) ( $t_{\text{ТОК}} = 0,27$ );  $t_{\text{НАП}}$  – норма времени на наплавочные работы, ч (наплавка меди в канавки) ( $t_{\text{НАП}} = 0,56$ );  $t_{\text{ШЛ}}$  – норма времени на шлифовочные работы, ч (зачистка рабочей поверхности трения) ( $t_{\text{ШЛ}} = 0,43$ );  $C_{\text{Д}}$  – дополнительная заработная плата, руб;  $C_{\text{СТР.П}}$  – начисления на выплату страховых платежей, руб.

Заработная плата рабочих составит:

$$C_{\text{ЗАР}} = 40,95 \cdot (0,27 + 0,56 + 0,43) = 51,6 \text{ руб.},$$

Дополнительная заработная плата составляет 30% от основной:

$$C_D = 0,3 \cdot 51,6 = 15,5 \text{ руб.},$$

Начисления на выплату страховых платежей принимаем в размере 34 % от основной заработной платы:

$$C_{СТР.П} = 0,34 \cdot 51,6 = 17,5 \text{ руб.},$$

Общая заработная плата будет равняться:

$$C_{ЗАР} = 51,6 + 15,5 + 17,5 = 84,6 \text{ руб.}$$

Затраты на наплавляемый материал (меди):

$$C_{МАТ} = \frac{\pi D_{ПР}^2 \cdot L_{НАП} \cdot \rho}{4} C_{НАП} \text{ руб.}, \quad (6.12)$$

где  $L_{НАП}$  – длина наплавочного материала (медь М1), м ( $L_{НАП} = 4,16$ );  $D_{ПР}$  – диаметр проволоки, м ( $D_{ПР} = 8 \cdot 10^{-4}$ );  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup> ( $\rho = 8930$ );  $C_{НАП}$  – цена наплавочного материала, руб./кг ( $C_{НАП} = 521,56$  руб./кг по ценам 2011 г).

$$C_{МАТ} = \frac{3,14 \cdot 8^2 \cdot 10^{-8} \cdot 4,16 \cdot 8930}{4} \cdot 521,56 = 9,74 \text{ руб.}$$

Затраты на внедрение (на одну гильзу) будут равны:

$$C_{ДОП} = 1,10(84,6 + 9,74) = 103,77 \text{ руб.}$$

Стоимость двигателя с биметаллизированными гильзами цилиндров:

$$B_2 = B_1 + C_{доп},$$

$$B_2 = 48000 + 4 \cdot 103,77 = 48415,1 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт двигателя УМЗ-417 с биметаллизированными гильзами цилиндров составят:

$$C_2 = C_1 + 4 \cdot C_{доп}, \quad (6.13)$$

где  $C_1$  – затраты на замену цилиндропоршневой группы, руб. ( $C_1 = 4000$ ).

$$C_2 = 4000 + 4 \cdot 103,77 = 4415,1 \text{ руб.}$$

Амортизационные отчисления, приходящие на работу двигателя:

$$A = B \cdot a / 100, \quad (6.14)$$

где  $B$  – балансовая стоимость двигателя УМЗ-417, руб.;  $a$  – норма амортизационных отчислений,  $a = 14,7\%$ .

$$A_1 = 48000 \cdot 0,147 = 7056,0 \text{ руб.}$$

$$A_2 = 48415,1 \cdot 0,147 = 7117,0 \text{ руб.}$$

Затраты на ремонт и ТО, приходящиеся на работу автомобиля:

$$P = B \cdot p / 100, \quad (6.15)$$

где  $p = 10\%$  - норматив затрат денежных средств на ремонт, ТО и хранение автомобиля.

$$P_1 = 48000 \cdot 0,1 = 4800,0 \text{ руб.}$$

$$P_2 = 48415,1 \cdot 0,1 = 4841,5 \text{ руб.}$$

Прочие прямые затраты:

$$П = (З + Т + А + P) \cdot n / 100, \quad (6.16)$$

где  $n = 10\%$  - процент прочих прямых затрат.

$$П_1 = (217896 + 157550 + 7056 + 4800) \cdot 0,1 = 38730 \text{ руб.};$$

$$П_2 = (217896 + 151529 + 7117 + 4841,5) \cdot 0,1 = 38138 \text{ руб.}$$

Годовые эксплуатационные издержки составят

$$И_1 = 217896 + 157550 + 7056 + 4800 + 38730 = 426032 \text{ руб.};$$

$$И_2 = 217896 + 151529 + 7117 + 4841,5 + 38138 = 419521,5 \text{ руб.}$$

Приведённые затраты:

$$П = C + E_H \cdot K, \quad (6.17)$$

где  $C$  – себестоимость одного двигателя, руб.;  $E_H$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений ( $E_H = 0,15$ );  $K$  – удельные капитальные вложения, руб.

Себестоимость двигателя:

$$C = B / P_H, \quad (6.18)$$

где  $P_H$  – коэффициент, учитывающий нормативный процент рентабельности ( $P_H = 1,14$ ).

$$C_1 = 48000 / 1,14 = 42105 \text{ руб.}$$

$$C_2 = 48415,1 / 1,14 = 42469,3 \text{ руб.}$$

Удельные капитальные вложения

$$K = B \cdot \eta_K, \quad (6.19)$$

где  $\eta_K$  – коэффициент основных производственных фондов и нормируемых оборотных средств в расчёте на 1 рубль цены двигателя ( $\eta_K = 0,68$ ).

$$K_1 = 48000 \cdot 0,68 = 32640 \text{ руб.}$$

$$K_2 = 48415,1 \cdot 0,68 = 32922,2 \text{ руб.}$$

Приведённые затраты равны

$$П_1 = 42105 + 0,15 \cdot 32640 = 47001 \text{ руб.}$$

$$П_2 = 42469,3 + 0,15 \cdot 32922,2 = 47407,6 \text{ руб.}$$

Годовая экономия

$$\mathcal{E}_Г = 426032 - 419521,5 = 6510,5 \text{ руб.}$$

Срок окупаемости дополнительных затрат,

$$T_Д = C_2 / \mathcal{E}_Г,$$

$$T_Д = 4415,1 / 6510,5 = 0,7 \text{ года.}$$

Таблица 6.1 – Экономическая эффективность от применения биметаллизованных гильз цилиндров

Показатели	Вид гильзы		Разница, +/-
	типовая	биметалли- зированная	
Среднегодовой пробег, км	45000	45000	-
Затраты на изготовление мотор-комплекта биметаллизованных гильз цилиндров, руб.	-	415	
Затраты на замену ЦПГ, руб.	4000	4415	+ 415
Расход топлива, л/100 км	15,7	15,1	- 0,6
Затраты на топливо, руб.	157550	151528,5	- 6022
Годовые эксплуатационные издержки, руб.	426032	419521	- 6511
Приведённые затраты, руб.	47001	47407	+ 406
Годовая экономия, руб.	-	6511	+ 6511
Срок окупаемости дополнительных затрат, лет	-	0,7	-

### Выводы

Расчетная годовая экономия от использования на автомобиле УАЗ-3303 двигателя УМЗ-417, оснащенного биметаллизованными медью гильзами цилиндров, составит 6511 руб., получаемая за счёт снижения затрат на топливо на 4 % (без учёта повышения эксплуатационной мощности и снижения вредных веществ в отработавших газах).

Срок окупаемости дополнительных затрат 0,7 года.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Из теоретического анализа процесса взаимодействия трущихся поверхностей следует, что для осуществления внешнего трения необходимо, чтобы прочность на сдвиг тонкого поверхностного слоя была бы меньше прочности основного материала.

Теоретически обоснованы форма, геометрические размеры и необходимое количество канавок на рабочей поверхности трения гильз цилиндров, заполненных медью. Угол наклона кольцевой канавки к диаметральной плоскости гильзы цилиндров  $17,2^\circ$ . Ширина и глубина канавки равны между собой и составляют 1,5 мм. Толщина антифрикционной пленки на поверхности трения гильзы размером 2...3 мкм обеспечивается 6 кольцевыми канавками, что соответствует не менее 8,3 % площади канавок, заполненных медью, к площади рабочей поверхности трения гильзы цилиндров. В соответствии с проведенными расчетами линейный износ биметаллизированной гильзы цилиндров в 3,1 раза ниже, чем у типовой гильзы.

2. Результаты лабораторных исследований свидетельствуют, что опытные образцы с углами наклона вставки меди в интервале  $15^\circ \dots 20^\circ$  обеспечивают снижение износа в среднем 2,7 раза, интенсивности изнашивания на 48...83 %, момента трения на 14,7 % по сравнению со сплошным образцом.

Данные рентгеновского спектрального анализа поверхностей трения биметаллизированных образцов подтверждают наличие на трущейся поверхности меди.

Наблюдается уменьшение шероховатости у биметаллизированных образцов на 12,5 % по сравнению со сплошным.

3. Разработан технологический процесс изготовления биметаллизированной медью гильзы цилиндров, на рабочей поверхности которой выполняются канавки в виде трех рядов замкнутых колец отдельных друг от друга, с углами подъема  $17^\circ$  к диаметральной плоскости гильзы и шагом 13 мм.

Проведенные лабораторные сравнительные ускоренные испытания гильз цилиндров на износостойкость подтверждают, что биметаллизация гильзы цилиндра вставками меди позволяет снизить интенсивность изнашивания гильзы цилиндра в среднем в 3 раза.

4. Результаты сравнительных стендовых исследований двигателя УМЗ-417 установлено, что средний износ биметаллизированных медью гильз цилиндров меньше в 3,4 раза по сравнению с типовыми. Использование биметаллизированных гильз цилиндров позволяет повысить эффективную мощность на 4,8 %, уменьшить часовой и удельный расходы топлива соответственно на 4,8 % и 9,1 %, а также снизить содержание в отработавших газах оксида углерода на 10 % и углеводородов на 8 % по сравнению с двигателем со штатными гильзами.

Сравнительные эксплуатационные исследования автомобилей УАЗ-3303, укомплектованных двигателем с биметаллизированными гильзами цилиндров показывают, что снижается линейный износ рабочей поверхности трения гильз цилиндров в 2,7 раза; уменьшается средний путевой расход топлива на 4 % и увеличивается давление газов в камере сгорания в конце такта сжатия на 6,5 % по сравнению с двигателем, укомплектованным штатными гильзами цилиндров.

5. Использование на автомобиле УАЗ-3303 двигателя УМЗ-417, оснащенного биметаллизированными медью гильзами цилиндров, позволяет получить годовую экономию 6511 руб., за счёт снижения затрат на топливо на 4 % (без учёта повышения эксплуатационной мощности и снижения вредных веществ в отработавших газах). Срок окупаемости дополнительных затрат 0,7 года.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шайхутдинов, Р.Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров двигателей путём обоснования параметров анодно-механического хонингования: Автореф. дис...канд.тех.наук. / Р.Р. Шайхутдинов. - Казань, 2010. - 18 с.
2. Архангельский, В.М. Автомобильные двигатели / В.М. Архангельский, М.М. Вихерт, А.Н. Воинов и др. – М.: Машиностроение, 1967. – 496 с.
3. Салахутдинов, И.Р. Гильза цилиндров двигателя УМЗ – 417 с изменёнными физико-механическими свойствами / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глущенко // Вклад молодых учёных в инновационное развитие АПК России: Материалы НПК молодых учёных – Пенза: ПГСХА, 2010. – С. 132-135.
4. Карагодин, В.И. Ремонт автомобилей и двигателей.: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования / В.И. Карагодин, Н.Н. Митрохин. – 6-е изд., стер. – М.: Академия, 2009. – 496 с.
5. Костюков, А.Ю Восстановление гильз цилиндров дизельных двигателей сельскохозяйственной техники термопластическим деформированием в матрице: Автореф. дис...канд.тех.наук / А.Ю. Костюков. – М, 2006. – 21 с.
6. Симдянкин, А.А. Контактное-силовое взаимодействие деталей цилиндра-поршневой группы: Монография: - Саратов., 2003. - 144 с.
7. Загородских, Б.П. Гильза цилиндров ДВС с неоднородными физико-механическими свойствами рабочей поверхности / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов: Информационный листок №39-2002. - 2 с.
8. Салахутдинов, И.Р. Обоснование геометрических параметров вставок при биметаллизации рабочей поверхности гильзы цилиндров двигателя УМЗ 417 / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, К.У. Сафаров // Молодёжь и нау-

ка XXI века: Материалы международной НПК молодых учёных – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 99-104. ISBN 978-5-902532-68-2

9. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения. [Текст]. – Введ 1989-01-01. – М.: Госстандарт СССР: Изд-во стандартов. 1989. – 21с.

10. Суслов, В.П. Анализ состояния ремонтного фонда и резервы повышения долговечности дизелей Д-240 в период до первого капитального ремонта: Сб. науч. тр. - Горки, 1987. С. 10-12.

11. Попов, В.Н. Повышение долговечности сельскохозяйственной техники: Дис...д-ра. техн. наук. - М., 1997. - 401 с.

12. Черноиванов, В.И. Организация и технология восстановления деталей машин. - М.: Агропромиздат, 1989. - 336 с.

13. Рыков, В.Н. Организация капитального ремонта. - М.: Машиностроение, 1988. - 112 с.

14. Комплексная система технического обслуживания и ремонта машин в сельском хозяйстве. - М.: ГОСНИТИ, 1985. - 108 с.

15. Сковородин, В.Я. Справочная книга по надёжности сельскохозяйственной техники / В.Я. Сковородин, Л.В. Тишкин - Л.: 1985. - 204 с.

16. Некрасов, С.С. Повысить надёжность автотракторных двигателей / Техника в сельском хозяйстве. 1980. №6. - С. 56-58.

17. Черепанов, С.С. Развивать ремонтно-обслуживающую базу / Техника в сельском хозяйстве. 1987. №7. - С. 38-39.

18. Совершенствование организации восстановления деталей в АПК: Обзор информации / АГРОНИИТЭИИТО. - М., 1988. - 46 с.

19. Курчаткин, В.В. Надёжность и ремонт машин / Под ред. В.В. Курчаткина. - М.: Колос, 2000. -776с.

20. Гурвич, И.Б. Тепловое состояние двигателей в процессе изнашивания / И.Б. Гурвич, В.И. Чумак, В.И. Баранов: Двигателестроение, М.: Колос. 1989. - №9. - С.49-50.

21. Авдонькин, Ф.Н. Взаимосвязь технического состояния ДВС и агрегатов установки / Двигателестроение, М.: Колос. 1988. - №2. - С.44-45.
22. Асташкевич, Б.М. Влияние структуры чугуна и напряженного состояния, термически обработанных гильз цилиндров ДВС на их изнашивание / Б.М. Асташкевич, О.М. Епархин: Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1995. - №1.-С.167-174.
23. Сафонов, В.В. Металлосодержащие смазочные композиции в мобильной сельскохозяйственной технике: технология, исследование, применение / В.В. Сафонов, В.И. Цыпцын, Э.К. Добринский, Семин А.Г. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1999. - 80 с
24. Авдонькин, Ф.Н. Некоторые принципы нормирования затрат на текущий ремонт ДВС / Двигателестроение, М.: Колос. 1988. — С.45-47.
25. Ждановский, Н.С. Диагностика автотракторных дизелей / Под ред. Н.С.Ждановского. - Л.: Колос, 1977.-264 с.
26. Польцер, Г. Основы трения и изнашивания / Г. Польцер, Ф. Майснер. - М.: Машиностроение, 1984. - 264 с.
27. Ведерников, Д.Н. Решение проблем двигателей внутреннего сгорания: современная практика изготовителей и перспективы / Д.Н. Ведерников, Шляхтов В.А. Трение и износ. ИММС ПАН Беларуси, Гомель, 1994. -№1. - С.138-148.
28. Хебды, М Справочник по триботехнике: Т.1 Теоретические основы / Под общ. ред. М. Хебды, А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1989.-400 с.
29. Крагельский, И.В. Основы расчетов на трение и износ / И.В. Крагельский, М.Н. Добычин, В.С. Комбалов. - М.: Машиностроение, 1977. - 526 с.
30. Крагельский, И.В. Узлы трения машин: Справочник. / И.В. Крагельский, Н.М. Михин - М.: Машиностроение, 1984. - 280 с.
31. Асташкевич, Б.М. Трибологические аспекты изнашивания деталей цилиндропоршневой группы мощных двигателей внутреннего сгорания /

Б.М. Асташкевич. Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1995.- №1.-С.92-105.

32. Асташкевич, Б.М. Износостойкость чугуновых втулок цилиндров транспортных дизелей / Двигателестроение. М.: Колос. 1986. - №2. - С.32-36.

33. Булатов, В.П. Корреляция между усталостными свойствами и износостойкостью поршневых колец / В.П. Булатов, Д.Н. Ведерников. Двигателестроение. М.: Колос. 1989. -№2. -С.12-14.

34. Хебда, М. Справочник по триботехнике: Т.2 Смазочные материалы, техника смазки, опоры скольжения и качения. / Под общ. ред. М.Хебды, А.В.Чичинадзе. - М.: Машиностроение, 1990. -416 с.

35. Стрельцов, В.В. Ресурсосберегающая ускоренная обкатка отремонтированных двигатели / В.В. Стрельцов, В.Н. Попов, В.Ф. Карпенков. - М.: Колос, 1995. - 175 с.

36. Гаркунов, Д.Н. Триботехника (износ и безызносность) – М.: МСХА, 2001. – 616 с.

37. Гаркунов, Д.Н. Долговечность трущихся деталей. - М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.

38. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Т.2 Конструкция и расчет / Под ред. А.С.Орлина. - М.: Машгиз., 1962. - 380 с.

39. Гельман, Б.М. Сельскохозяйственные тракторы и автомобили. Кн. 1. Двигатели. / Б.М. Гельман, М.В. Московин - М.: Агропромиздат, 1987. - 287 с.

40. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания: Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Под общ. ред. А.С.Орлина, М.Г.Круглова. - М.: Машиностроение, 1984. - 384 с.

41. Гуревич, А.М. Конструкция тракторов и автомобилей. / А.М. Гуревич, А.К. Болтов, В.И. Судницын. - М.: Агропромиздат, 1989. - 368 с.

42. Гуревич, А.М. Тракторы и автомобили. / А.М. Гуревич, Е.М. Сорочкин. - М.: Колос, 1978. - 479 с.

43. Солнцев, Л.А. Повышение долговечности гильз цилиндров транспортных дизелей. / Л.А. Солнцев, Л.А. Тимофеева // Двигателестроение. М.: Колос, 1989. - №6 - С.41-42.

44. Бугаев, В.Н. Эксплуатация и ремонт форсированных тракторных двигателей. – М.: Колос, 1981. - 208 с.

45. Бабусенко, СМ. Ремонт тракторов и автомобилей. - М.: Агропромиздат, 1987. - 351с.

46. Ульман, И.Е. Ремонт машин / Под общ. ред. И.Е.Ульмана. - М.: Колос, 1976. - 448 с.

47. Салахутдинов, И.Р. Причины возникновения отказов и способы восстановления гильз цилиндров ДВС / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, К.У. Сафаров // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной НПК – Ульяновск: УГСХА, 2009. – С. 77-81. ISBN 987-5-902532-56-9

48. Салахутдинов, И.Р. Биметализация внутренней поверхности гильзы // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной НПК – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 63-65. ISBN 987-5-902532-66-8

49. Заренбин, В.Г. Расчетно-экспериментальная оценка локальных тепловых потоков в гильзе цилиндра при неосесимметричном стационарном температурном поле // Двигателестроение. М.: Колос, 1986. -№11. - С.21-22.

50. Хохлов, А.Л. Теоретическое обоснование влияния теплонапряжённости на износ деталей цилиндропоршневой группы / А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов. // Использование инновационных технологий для решения проблем АПК в современных условиях: Материалы международной НПК – Волгоград: ВГСХА, 2009. – С. 223-229. ISBN 978-5-85536-382-1

51. Луканин, В.Н. Двигатели внутреннего сгорания / Под ред. В.Н.Луканина. - М.: Высш. шк., 1985.-311 с.

52. Непогодьеv, А.В. Контроль состояния смазочного масла в дизелях сельскохозяйственных тракторов / А.В. Непогодьеv, И.Н. Холин, И.Е. Либеров, И.В. Митин. // Двигателестроение. М.: Колос, 1987. - №3.- С.57-58.
53. Эфендиев, А.М. Особенности изнашивания автотракторных двигателей в условиях пустынь и полупустынь / А.М. Эфендиев, А.В. Николаенко. // Двигателестроение. М.: Колос, 1991. -№10-11-С.69-72,78.
54. Эфендиев, А.М. Влияние солесодержащей пыли пустынь и полупустынь на срабатывание присадок моторных масел / А.М. Эфендиев, А.В. Николаенко // Двигателестроение. М.: Колос, 1991. -№12. - С.3-4.
55. Кагин, С.Г. Изнашивание деталей ЦПГ малооборотного дизеля при конденсации паров воды в нем // Двигателестроение. М.: Колос, Москва, 1990. - №6 - С.3-4.
56. Храмцов, Н.В. Надежность отремонтированных автотракторных двигателей. -М.: Росагропромиздат, 1989. - 159 с.
57. Ющенко, А.А. Кинематические возмущения, обуславливающие радиальное движение поршня в плоскости поршневого пальца // Двигателестроение. М.: Колос, 1987. - №9. - С.8-10.
58. Зазимко, О.В. Механохимические процессы при абразивном изнашивании // Трение и износ. 1993. - №1. - С.203-209.
59. Семенов, В.С. Режим смазки пары трения поршневое кольцо-цилиндровая втулка двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение. М.: Колос, 1991.-№10-11. –С 9-23.
60. Войтов, В.А. О расположении материалов в парах трения по твердости и конструктивных способах повышения износостойкости // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1994. -№3. - С.452-460.
61. Хохлов, А.Л. Способы восстановления гильз цилиндров ДВС / А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов, К.У. Сафаров // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: Материалы международной НПК – Димитровград: ТИ филиал УГСХА, 2009. – С. 86-90. ISBN 978-5-904455-09-5

62. Денисов, А.С. Основы формирования эксплуатационно-ремонтного цикла автомобилей. - Саратов, Саратовский государственный технический университет, 1999.-352 с.

63. Черновол, М.И. Повышение качества восстановления деталей машин / М.И. Черновол, С.Е. Поединок, Н.Е. Степанов – Киев, Техника, 1989. - 168 с.

64. Технологические процессы и указания по восстановлению деталей контактной приваркой присадочных материалов. -М.: ВНПОВД «Ремдеталь», 1987. - С.343.

65. Шалай, А.Н. Применение газотермического напыления и сварочных процессов в двигателестроении //Двигателестроение. М.: Колос, Москва, 1987. -№4. - С.51-54.

66. Гариков, Б.М. Разработка способа восстановления цилиндров дизелей приваркой порошков (на примере двигателя Д-37) // Автореф. дис...канд.тех.наук. / Гариков Б.М. — М., 1990.- 17 с.

67. Технологические процессы восстановления основных деталей двигателей СМД-14.-М.: ГОСНИТИ, 1985.-48 с.

68. Auer St. Handbuch fur Reparaturen an Landmaschinen und Traktoren: Praktische Selbsthilfe fur Warning, Einstellung / St. Auer, W. Kletzl - Miinchen: DLG-Verlag, BLG-Verlagsgesellschaft, 1993.-516 с.

69. Беленький, А.М., Иванов А.Ф. Электроосаждение металлических покрытий / А.М. Беленький, А.Ф. Иванов - М.: Металлургия, 1985. - 288 с.

70. Хасуи, А., Моригаки, О. / Пер. с яп. В.Н. Попова; под ред. В.С. Стёпина., Н.Г. Шестёркина. - М.: Машиностроение, 1985. - 240 с.

71. Соколов, А.Д. Влияние толщины покрытий на долговечность хромированной стали при термосиловом воздействии / А.Д. Соколов, Б.А. Ляшенко, О.В. Цыгулев // Двигателестроение. М.: Колос, 1991. -№12. - С.37-38.

72. Баев, А.С. Внутренние напряжения в осадках электролитического хрома при восстановлении деталей дизелей / А.С. Баев, И.О. Потапов // Двигателестроение. М.: Колос, 1988.-№9,- С.37-38.

73. Патапов, И.О. Оптимизация процесса хромирования при восстановлении деталей дизелей // Двигателестроение. М.: Колос, 1989. -№1. - С. 34-35.

74 Айвазян, Р.С. Ускоренные испытания опытных поршневых колец на абразивную износостойкость / Р.С. Айвазян, А.Д. Соколов // Двигателестроение. М.: Колос, 1988.-№2.-С.3-5.

75 Соколов, А.Д., Филиппочев А.Н. Влияние технологического процесса хромирования на упругость поршневых колеи / А.Д. Соколов, А.Н. Филиппочев // Двигателестроение, М.: Колос, 1986.-№7.-С.37-38,50.

76. Веселовский, Н.И. Ресурсосберегающая технология восстановления внутренних поверхностей деталей сельскохозяйственной техники скоростным железнением // Автореф. дис...канд.тех.наук. / Н.И. Веселовский - М., 1999. - 26 с.

77. Астахов Г.А. Восстановление цилиндров двигателей внутреннего сгорания композиционными электрохимическими покрытиями на основе железа проточным электролизом // Автореферат диссертации на соискание ученой степени к.т.н. - Кишинев: Изд-во «Штиица», 1989. - 20 с.

78. Гаркунов, Д.Н. «Триботехника. Краткий курс» / Д.Н. Гаркунов, Э.Л.Мельников, В.С.Гаврилюк // Москва. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008 г

79. Добрынин, А.М. Повышение износостойкости центробежно-литых гильз цилиндров дизелей ЯМЗ-236 / А.М. Добрынин, Ю.Э. Елисеев // Двигателестроение. М.: Колос, 1989.-№3.-С.35-37.

80. Тушинский, Л.И. Оптимизация структуры для повышения износостойкости сплавов // Физика износостойкости поверхности металлов, - Л.: ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1988.-С.42-55.

81. Карпенков, В.Ф. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) деталей / В.Ф. Карпенков, ВВ. Стрельцов, И.Л. Приходько, В.Н. Попов, С.С. Некрасов - Пущино: Изд-во ОНТИ ПНЦ РАН, 1996. - 107 с.

82. Гаркунов, Д.Н. Избирательный перенос в узлах трения / Д.Н. Гаркунов, И.В. Крагельский, А.А. Поляков. – М.: Транспопрт, 1969. – 104 с.

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

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

85. Киреенко О.Ф. Структурно-масштабная модель безызносного трения металлических конструкционных материалов в условиях структурной самоорганизации // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1993. - №1. -С.85-97.

86. Кужаров, А.С. Трибологические проявления самоорганизации в системе латунь-глицерин-медь / А.С. Кужаров, Р. Марчак, Я. Гузик, К. Кравчик, Е.Г. Задошенко // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1996. -№1. - С. 113-121.

87. Грипачевский, А.Н. Самоорганизация вторичных структур при трении меди и бронзы по стали / А.Н. Грипачевский, А.В. Верещак, В.В. Горский // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1992. №4,- С.647-653.

88. Поляков, А.А. Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении (динамическая трибология) // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1992. - №2. - .388 с.

89. Воронков Б.Д. Повышение долговечности химического оборудования методом избирательного переноса при трении / Б.Д. Воронков, В.Г. Шадрин //Долговечность трущихся деталей машин. Выпуск 3./Под общ. ред. Гаркунова Д.Н. - М.: Машиностроение, 1988. - 272 с.

90. Рыбакова Л.М. Структура и износ покрытий при финишной антифрикционной безабразивной обработке гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания / Л.М. Рыбакова, Л.И. Куксенова, Ю.А. Назаров // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1994.-№5. - С.909 - 921.

91. Дробышевский, В.Н. Приработочное покрытие для гильз цилиндров дизельных двигателей // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 1996. - №2. - С.246-248.

92. Потапов Г.К. Финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) гильз цилиндров и шеек коленчатых валов двигателей / Г.К. Потапов, В.И. Балабанов // Эффект безызносности и триботехнологии. 1994. - №3-4. - С.48-53.

93. Хохлов, А.Л. Методы повышения износостойкости цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания / А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов, С.А. Борисов: Материалы студенческой международной НПК – Дмитровград: ТИ филиал УГСХА, 2009. – С. 89-92.

94. Абрамзон, А.А. Поверхностно-активные вещества: Свойства и применение. –2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1981. – 304 с.

95 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.

96. Шаронов, Г.П. Применение присадок к маслам для ускорения приработки двигателей / Г.П. Шаронов. – Л.: Химия, 1965. – 223 с.

97. Литвинов, В.Н. Физико-химическая механика избирательного переноса при трении / В.Н. Литвинов, Н.М. Михин, Н.К. Мышкин. – М.: Наука, 1979. – 188 с.

98. 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.

99. 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.

100. Шайхутдинов, Р.Р. Анодно-механическая обработка гильз цилиндров ДВС / Р.Р. Шайхутдинов, Х.С. Фасхутдинов // Сб. науч. трудов IV меж-

дунар. науч.-практич. конференции «Автомобиль и техносфера» (ICATS, 14-16 июня 2005). – Казань, 2005 – С.265-266.

101. Шайхутдинов, Р.Р. Теоретические основы обеспечения износостойкости гильз цилиндров при анодно-механическом хонинговании / Р.Р. Шайхутдинов, Х.С. Фасхутдинов // Проблемы механизации сельского хозяйства: юбил. сб. науч. трудов ученых КГСХА. – Казань: Изд-во КГСХА, 2000. – С. 312-315.

102. Бочков, А.А. Поверхностное раскатывание улучшает износостойкость ДВС / Бочков А.А., Егоров А.А. // Двигателестроение. М.: Колос, 1986. - №10.- С.40.

103. Исаев, В.А. Поверхностное упрочнение деталей автомобильных двигателей // Двигателестроение. М.: Колос, 1986. - №9. - С.53-55.

104. Белкин, Л.М. Расширение технологических возможностей упрочнения поверхностным пластическим деформированием деталей ДВС / Л.М. Белкин, М.Я. Белкин, СМ. Гензелев, И.Б. Волков // Двигателестроение. М.: Колос, 1987. - №2. - С.24-26.

105. Чеповецкий И.Х. Антифрикционно-деформационный метод формирования рабочих поверхностей гильз цилиндров ДВС / И.Х. Чеповецкий, С.А. Ющенко // Двигателестроение. М.: Колос, 1990. - №8. - С.38-40.

106. Аветисян, В.К. Восстановление зеркала гильз цилиндров двигателей совмещенным процессом растачивания и поверхностного пластического деформирования // Автореф. дис...канд.тех.наук. / В.К. Аветисян. - Харьков: Харьковский государственный аграрный университет им. В.В.Докучаева, 1993.-20 с.

107. Соколенко, И.Н. Технология поверхностного упрочнения гильз цилиндров двигателей раскатыванием с одновременным нанесением медного покрытия при их восстановлении // Автореф. дис...канд.тех.наук. / И.Н. Соколенко. - Саратов: 1990. - 15 с.

108 Бугаевский, В.В. Исследование одновременного процесса растачивания и раскатывания цилиндров автомобильных двигателей при ремонте // Автореф. дис...канд.тех.наук. / В.В. Бугаевский. - Краснодар, 1974. - 25 с.

109. Уманский В.Б. Новые способы упрочнения деталей машин / В.Б. Уманский, Л.К. Маняк - Донецк: Донбас, 1990. - 144 с.

110. Головин, Г.Ф. Высокочастотная термическая обработка / Г.Ф. Головин, М.М. Замятин - Л.: Машиностроение. 1990. - 239 с.

111. Лахтина, Ю.М. Термическая обработка в машиностроении / Под ред. Ю.М.Лахтина, А.Г.Рихштадта. - М.: Машиностроение, 1980. - 783 с.

112. Вершинина, Н.И. Исследование возможности повышения стабильности макрогеометрии чугуновых гильз цилиндров с помощью термообработки / Н.И. Вершинина, О.М. Епархин, Б.М. Асташкевич // Двигателестроение. М.: Колос, 1990. - №8. - С.40-42.

113. Григорьянц, А.Г. Лазерная техника и технология: Основы лазерного термоупрочнения сплавов / А.Г. Григорьянц, А.Н. Сафонов - М.: Высш. шк., 1988. - 159 с.

114. Асташкевич, Б.М. Повышение износостойкости втулок цилиндров дизелей лазерным упрочнением / Б.М. Асташкевич, Г.А. Лукаев, Ю.А. Назаров // Двигателестроение. М.: Колос, 1990. - №6. - С.42-43.

115. Асташкевич, Б.М. Лазерное упрочнение деталей транспортной техники / Б.М. Асташкевич, С.С. Воинов, Е.А. Шур, В.С. Прослов // Двигателестроение. М.: Колос, 1987. - №8. - С. 38-40.

116. Антонов, А.Е. Лазерная термообработка цилиндров двигателей ГАЗ / А.Е. Антонов, А.П. Егорова, А.Э. Исаков, Б.Ф. Мульченко, Д.И. Ройтенбург // Двигателестроение. М.: Колос, 1986. -№9. -С.55-57.

117. Соколов, А.Д. Лазерное упрочнение поршневых колец / А.Д. Соколов, С.В. Зеленова, А.Н. Сафонов // Двигателестроение. М.: Колос, 1986. - №3. - С.48-49.

118. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов. - М.: Машиностроение, 1989. - 168 с.

119. Полевой, С.Н. Упрочнение машиностроительных материалов / С.Н. Полевой, В.Д. Евдокимов - М.: Машиностроение, 1994. - 496 с.

120. Симдянкин А. А. Исследование износостойкости деталей слоеной конструкции / А. А. Симдянкин, Ю. В. Кривопапов // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 2000. - № 4. -С.433—437.

121. Симдянкин, А.А. Моделирование динамического взаимодействия деталей цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания. Физическое моделирование // Математическое моделирование и управление в технических системах. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1998. - С.87-98.

122. Симдянкин, А.А. Моделирование динамического взаимодействия деталей цилиндропоршневой группы. Статистическая обработка информации / А.А. Симдянкин, А.С. Фалькович // Математическое моделирование и управление в технических системах. - Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1998. - С. 107-114.

123. Simdyankin, A.A. Combustion Engine Parts Sandwiching at Production and Repairs.//Journal of Huazhong Agricultural University Vol.19, No.3, June 2000, p.284-291.

124. Загородских, Б.П. Пути повышения износостойкости ДВС / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: Межвуз. науч. сб. - Саратов: СГТУ, 2001. - с. 64-70.

125. Загородских, Б.П. Повышение износостойкости цилиндропоршневой группы дизелей / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов // Проблемы экономичности и эксплуатации двигателей внутреннего сгорания в АПК СНГ.: Материалы межгосуд. научно-технич. семинара, Саратов, Вып. 14, 2002. -с.52-54

126. Загородских, Б.П. Повышение износостойкости деталей их слоением. / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов // Трение и износ. ИММС НАН Беларуси, Гомель, 2001. - №6. - С.703-706.

127. Баринов, С.В. Упрочняющая технология при обработке гильз цилиндров под ремонтный размер // Информационный листок №38-2002. - 4 с.

128. Загородских, Б.П. Цилиндро-поршневая группа / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов // Патент на изобретение №2186234.

129. Загородских, Б.П. Результаты испытаний деталей с неоднородной поверхностью трения / Б.П. Загородских, А.А. Симдянкин, С.В. Баринов // Повышение эффективности эксплуатации транспорта: Межвуз. науч. сб. - Саратов: СГТУ, 2002. - с. 102-106.

130. Баринов, С.В. Противоизносные и антифрикционные свойства деталей с неоднородной поверхностью трения // Совершенствование технологии и организации обеспечения машин с использованием восстановительно-упрочняющих процессов / Саратовский ГТУ: Саратов, - 2003, - с.37-44.

131. Симдянкин, А.А. Повышение эксплуатационных показателей автотракторных дизелей учётом контактно-силового взаимодействия деталей цилиндро-поршневой группы: Дисс. доктора техн. наук: А.А. Симдянкина. – Саратов, 2003. 316 с.

132. Крагельский, И.В. Трение и износ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1968. – 475 с.

133. Костецкий, Б.И. Сущность явлений трения и износа в деталях машин. Трение и износ в машинах. Труды Второй Всесоюзной конференции по трению и износу в машинах. Т.4, М., Изд-во АН СССР, 1951. - с. 201-208.

134. Лихтман, В.И. Влияние поверхности активной среды на процесс деформации металлов / В.И. Лихтман, П.А. Ребиндер, Г.В. Карпенко // М., Изд-во АН СССР, - 1954. – 208 с.

135. Елин, Л.В. Взаимное внедрение поверхностных слоёв металлов, как одно из причин изнашивания при несовершенной смазке. Сб. «Трение и износ в машинах», №13. М., Изд-во АН СССР. - 1959. – 267 с.

136. Крагельский, И.В. Усталостный износ и краткая методика аналитической оценки величины износа поверхностей трения при скольжении / И.В. Крагельский, Г.М. Харач, Е.Ф. Непомнящий // М., Научный Совет по трению и ИМАШ. – 1967. – 18 с.

137. Конвисаров, Д.В. Трение и износ металлов. М.: Машгиз, - 1947. - 184 с.
138. Archard J.F. and Hirst W. The Wear of Metals under Unlubricated Conditions. «Proc. R. Sos». 1956, Nr. 1206, vol. 236, pp. 397 – 410.
139. Патент на полезную модель 93465 Россия, МПК F02F 1/00. Цилиндропоршневая группа / А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов, Е.С. Зыкин, К.У. Сафаров. – № 2010100259/22; Заяв.11.01.2010; Оpubл. 27.04.2010, Бюл. № 12.
140. Гуревич, СМ. Справочник по сварке цветных металлов. Киев: Наукова думка. 1981. - 610с.
141. Панова, А.А. Обработка металлов резанием: Справочник технолога / Под общ. ред. А.А.Панова. - М.: Машиностроение. 1988. -736 с.
142. Локтев, А.Д. Общемашиностроительные нормативы режимов резания: Справочник: Т 1 / А.Д.Локтев и др. - М.: Машиностроение. 1991. - 640 с.
143. Методы экспериментальной оценки фрикционной совместимости материалов трущихся сопряжений РД 50-662-88 / Государственный комитет СССР по стандартам. – М.: Издательство стандартов. 1988. - 8 с.
144. Машина для испытаний материалов на трение и износ. Заводское обозначение 2070 СМТ-1: Инструкция по эксплуатации. Союзточмашприбор.– Завод испытательных приборов. – Иваново. 1987. – 38 с.
145. Весы «Zaktady Mechaniki Precyzyjnej». Заводское обозначение WA-31: Инструкция по эксплуатации. – Варшава. 1995. – 16 с.
146. Бездифракционный анализатор рентгеновский спектральный. Заводское обозначение БАРС-3: Инструкция по эксплуатации. – НИИ испытательных приборов. – Л., 1995. – 12 с.
147. Профилометр модели ПРОФИ 130 степень точности 1 ТУ 3943-001-70281271: Паспорт 130.0.01-ПС. – М: – ОАО «Завод ПРОТОН-МИЭТ». 2007. – 38 с.
148. Хохлов, А.Л. Установка для ускоренных испытаний деталей цилиндропоршневой группы / А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов // Использо-

ние инновационных технологий для решения проблем АПК в современных условиях: Материалы международной НПК – Волгоград: ВГСХА, 2009. – С. 229-230. ISBN 978-5-85536-382-1

149. Хохлова, Е.А. Определение износа биметаллизированных образцов весовым методом / Е.А Хохлова, А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов // Материалы внутривузовской студенческой научной конференции – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 85-86.

150. Марьин, Д.М. Определение шероховатости биметаллизированных образцов / Д.М. Марьин, А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов // Материалы внутривузовской студенческой научной конференции – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 86-87.

151. Абдулмянов, Р.Р. Определение элементного состава поверхности трения биметаллизированных образцов / Р.Р. Абдулмянов, А.Л. Хохлов, И.Р. Салахутдинов // Материалы внутривузовской студенческой научной конференции – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 87-89.

152. Салахутдинов, И.Р. Ускоренные испытания на износостойкость гильз цилиндров ДВС / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов // Наука-Технология-Ресурсо-сбережение: Материалы международной НПК – Киров: ВГСХА, 2011. – С. 107-116.

153. Салахутдинов, И.Р. Повышение износостойкости гильз цилиндров ДВС / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глущенко, К.У. Сафаров, Е.Н. Прошкин // Вестник УГСХА – Ульяновск УГСХА . – 2011. -№1. – С. 102-105. ISSN 1816-4501

154. Автомобили УАЗ 3741, УАЗ-3962, УАЗ-2206, УАЗ-3303 и их модификации. / Руководство по эксплуатации РЭ 37.212.003-86. – Куйбышев, 1986. – 224 с.

155. Автомобили УАЗ: Техническое обслуживание и ремонт. – М.: Транспорт, 2002. – 336 с.

156. Внешнее устройство аналого-цифрового преобразования для ЭВМРС/АТ - совместимых компьютеров LA-1,5PCI. / Руководство пользователя ВКФУ. 411819.04. – М., 2004. – 47с.

157. ГОСТ 12.2.091 – 94 (МЭК 414-73). Требования безопасности для показывающих и регистрирующих электроизмерительных приборов и вспомогательных частей к ним. – Действ. 01.01.94. – 10с.

158. ГОСТ 26104 – 89 (МЭК 348-78). Средства измерений электронные. – Действ. 01.01.90. – 70с.

159. Хитрюк, В.А. Практикум по автотракторным двигателям: Учеб. пособие / В.А. Хитрюк, Е.С. Цехов. – Минск.: Ураджай, 1989. – 143 с.

160. Данилов, А.С. Лабораторный практикум по испытаниям двигателей внутреннего сгорания / А.С. Данилов, Р.К. Сафаров, П.Н. Аюгин. - Ульяновск: УГСХА, 2001. – 78 с.

161. Уханов, Д.А. Автомобили и двигатели. Испытания: лабораторный практикум / Д.А. Уханов, Х.Х. Губейдуллин, А.Л. Хохлов, Р.К. Сафаров. – Ульяновск: УГСХА, 2011. – 143 с

162. Мухин, Е.М. Приработка и испытание автомобильных двигателей / Е.М. Мухин, Н.И. Столяров. – М.: Транспорт, 1981. – 265 с.

163. Некрасов, С.С. Послеремонтная обкатка двигателя / С.С. Некрасов, В.В. Стрельцов, П.И. Носихин // Агропромышленный комплекс России. - 1989. -№ 1. – с. 38 – 39.

164. Нигаматов, М.Х. Ускоренная обкатка двигателя после ремонта / М.Х. Нигаматов. – М.: Колос, 1984. – 79 с.

165. ГОСТ 14846-81. Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. – Введ. 1982-01-01. – М.: Госстандарт России: Изд-во стандартов, 2003. - 45 с.

166. Салахутдинов, И.Р. Результаты трибологических испытаний на износостойкость биметаллизированных образцов / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глушенко, К.У. Сафаров // Наука в современных условиях: от

идеи до внедрения: Материалы международной НПК – Димитровград: ТИ филиал УГСХА, 2010. – С. 54-59. ISBN 978-5-9795-0232-8

167. Салахутдинов, И.Р. Результаты экспериментальных исследований износостойкости деталей с изменёнными физико-механическими характеристиками поверхности трения / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глушенко, К.У. Сафаров // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной НПК – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 107-116. ISBN 987-5-902532-66-8

168. Салахутдинов, И.Р. Результаты исследований угла наклона вставки при биметаллизации поверхности гильзы цилиндров / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глушенко // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: Материалы международной НПК – Ульяновск: УГСХА, 2010. – С. 43-49. ISBN 987-5-902532-66-8

169. Салахутдинов, И.Р. Исследования шероховатости и элементного состава поверхности трения биметаллизированных образцов / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глушенко, К.У. Сафаров // Наука в современных условиях: от идеи до внедрения: Материалы международной НПК – Димитровград: ТИ филиал УГСХА, 2010. – С. 60-65. ISBN 978-5-9795-0232-8

170. Салахутдинов, И.Р. Обоснование угла наклона вставки при биметаллизации поверхности гильзы цилиндров / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глущенко // Нива Поволжья – Пенза ПГСХА.- №4. С. 52-56. ISSN 1998-6092

171. Салахутдинов, И.Р. Теоретическое обоснование применения различных металлов для снижения износа деталей ЦПГ / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глущенко, К.У. Сафаров // Вестник УГСХА – Ульяновск УГСХА.- 2010. -№1 (11). С. 127-131. ISSN 1816-4501

172. Салахутдинов, И.Р. Теоретическое обоснование процесса снижения износа цилиндро-поршневой группы биметаллизацией методом вставок / И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов, А.А. Глущенко // Вестник Саратовского

ГАУ имени Н.И. Вавилова – Саратов СГАУ им. Вавилова Н.И.-2011. - №2.  
С.42-45. ISSN 1998-6548

173. Глушенко, А.А. Влияние биметаллизации на смазывающую способность рабочей поверхности гильзы цилиндра / А.А. Глушенко, И.Р. Салахутдинов, А.Л. Хохлов // Вестник Саратовского ГАУ имени Н.И. Вавилова – Саратов СГАУ им. Вавилова Н.И.- 2011. - №4. С. 32-34. ISSN 1998-6548

174. Методика (основные положения) определения экономической эффективности использования в народном хозяйстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений. – М.: ГОСНИТИ, 1981. -4с.

175. Лоза, Г.М. Методика определения экономической эффективности использования в сельском хозяйстве результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, новой техники, изобретений и рационализаторских предложений / Под. общ. рук. Г.М.Лозы. – М.: МСХ, 1980. 116с.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1**

**Программа и операционная карта технологического процесса изготовления биметаллизированной гильзы цилиндров**

Рабочая программа нарезки кольцевых канавок на центровочном токарном станке с системой ЧПУ T-500

N:\MPF\REZIBA\G11.MPF

N10	G95	N100	R6=90
;	R1-NAC. DIAM	N110	GG11
;	R2-KONEC. DIAM	N120	TRANS
;	R3-GLUB. YREZ	N130	R6=0
N20	M42	N140	TRANS Z-76
N30	R6=0	N150	GG11
N40	S20M3	N160	TRANS
N50	T3F0.5	N170	R6=0
N60	GOX90Z40	N180	GOX90
N70	Z-10	N190	M5
N80	GG11	N200	Z100
N90	TRANS Z-38	N210	M02

==eof==

Подпрограмма рабочей программы ЧПУ

N:\MPF\REZIBA\G11.MPF

N10	R5=0	N260	PGN
N20	GOZ-10	N270	R11=-32.25 R12=63
;	ACC[Z]=1	N280	PGN
N30	G1X91.5F0.5	N290	R11=-28.25 R12=80
N40	R1=91.5 R2=94.7 R3=0.002500	N300	PGN
N50	R11=-11 R12=20	N310	R11=-19.75 R12=85
N60	PGN	N320	PGN
N70	R11=-12.6R12=32	N330	R11=-15.75 R12=80
N80	PGN	N340	PGN
N90	R11=-15.7500 R12=63	N350	R11=-12.6 R12=63
N100	PGN	N360	PGN
N110	R11=-19.7500000 R12=80	N370	R11=-11 R12=32
N120	PGN	N380	PGN
N130	R11=-28.250000 R12=85	N390	R11=-10 R12=20
N140	PGN	N400	PGN
N150	R11=-32.25000 R12=80	N410	IF R3==0 GOTOF N450
N160	PGN	N420	IF R1<R2 GOTOF N50
N170	R11=-35.4 R12=63	N430	R3=0
N180	PGN	N440	GOTOF N50
N190	R11=-37 R12=32	N450	Z-11.5 X91 K25

N200	PGN	N460IF	R5==190 GOTOF N490
N210	R11=-38.000000 R12=20	N470	R5=190
N220	PGN	N480	GOTOF N30
N230	R11=-37 R12=20	N490	GOX90
N240	PGN	;ACC	[Z]=100
N250	R11=-35.4 R12=32	N500	RET

==eof==

Подпрограмма рабочей программы ЧПУ

N:\MPF\REZIBA\PGN. MPF

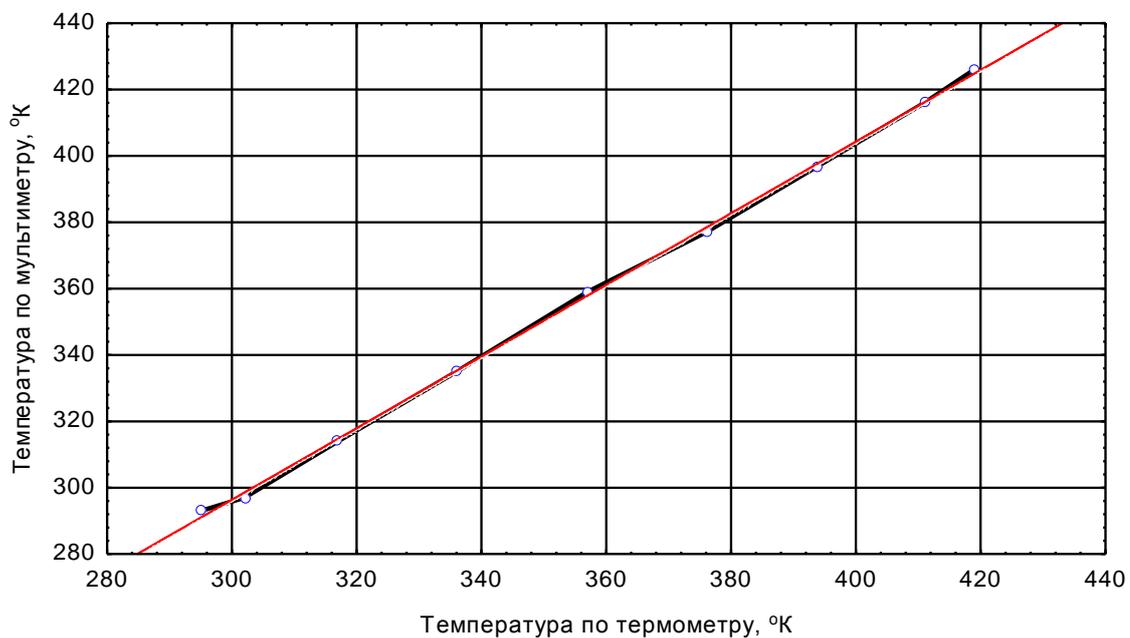
N10 R1=R1+R3  
 N20 R7=R5+R6  
 N30 G33 Z=R11 X=R1 K=R12 SF=R7  
 N40 RET  
 ==eof==

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2**

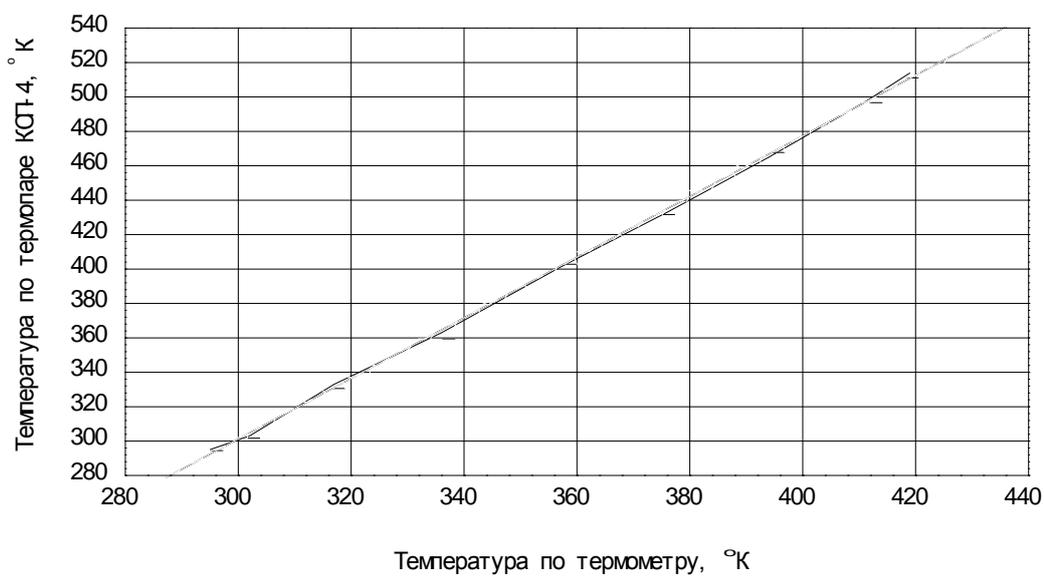
**Данные тарировок, тарировочные графики,  
геометрические размеры гильз цилиндров**

## Данные тарировки мультиметра М 890G и потенциометра КСП – 4

t мин.	Термометр (градус- ник) С <sup>0</sup> (К)	Мультиметр М 890 G С <sup>0</sup> (К)	Потенциометр КСП- 4 (термопара) С <sup>0</sup> (К)
0	22 (295)	20 (293)	22 (295)
5	29 (302)	24 (297)	30 (303)
6	31	28	40
7	34	30	41
8	36	33	45
9	39	37	50
10	44 (317)	41 (314)	60 (333)
11	48	45	64
12	51	49	70
13	55	53	76
14	59	58	82
15	63 (336)	62 (335)	90 (363)
16	67	66	98
17	71	70	102
18	75	75	110
19	79	79	118
20	84 (357)	86 (359)	128 (401)
21	87	88	131
22	91	93	139
23	95	97	146
24	99	101	152
25	103 (376)	104 (377)	160 (433)
26	106	110	168
27	111	114	175
28	114	117	180
29	118	122	188
30	121 (394)	124 (397)	192 (465)
31	124	128	198
32	127	132	204
33	130	135	210
34	134	139	218
35	138 (411)	143 (416)	224 (497)
36	141	147	231
37	144	150	238
38	146 (419)	153 (426)	241 (514)



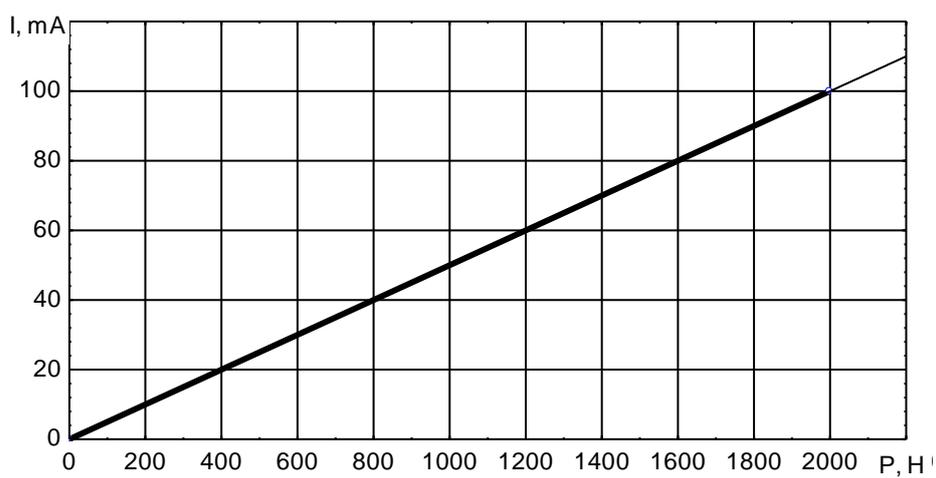
Тарировочный график мультиметра М 890С



Тарировочный график термопары потенциометра КСП-4

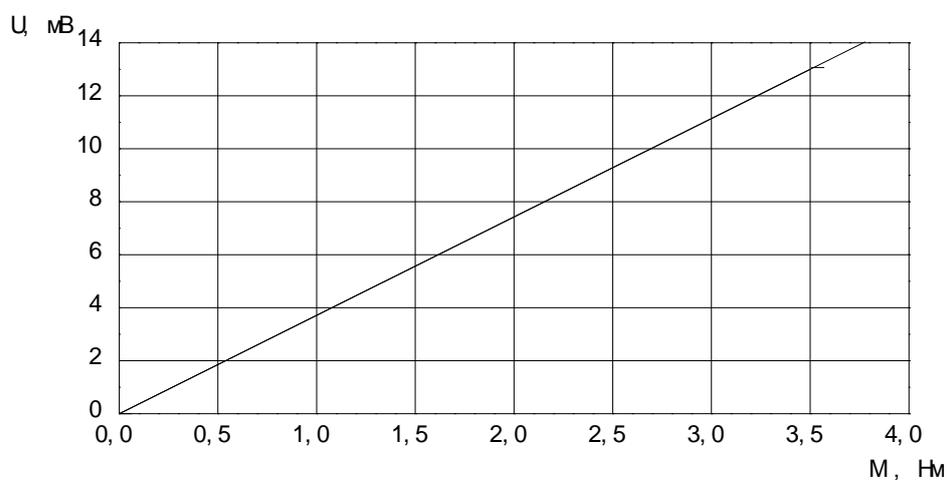
## Тарировочные графики машины трения СМТ 1

I, mA	0	100
P, H	0	2000



## Тарировочный график механизма нагружения машины трения СМТ-1

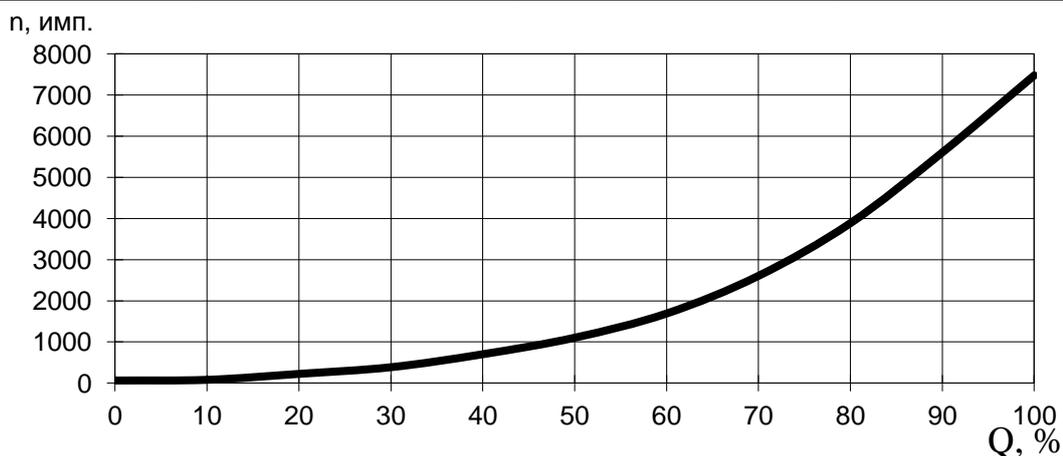
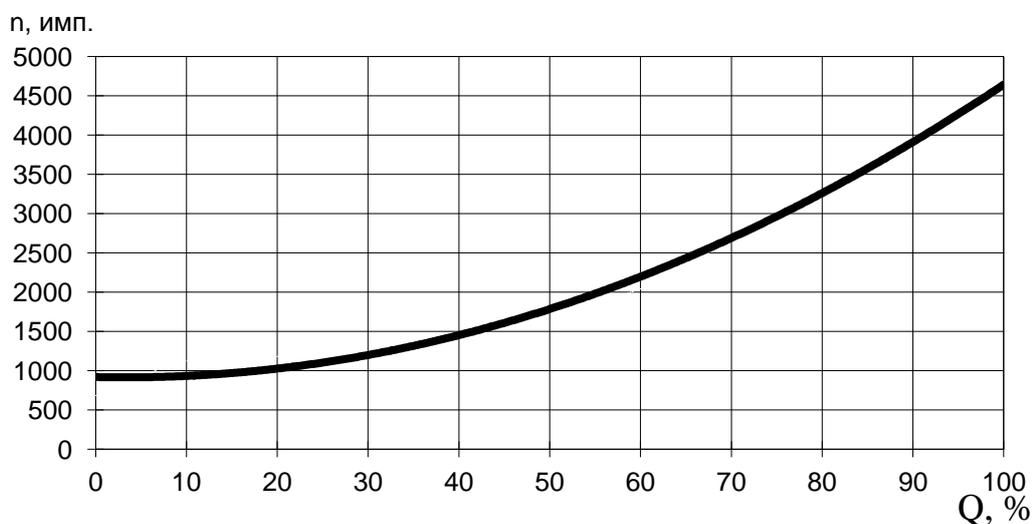
U, мВ	0	13
M, Нм	0	3,5



## Тарировочный график индуктивного датчика момента силы трения

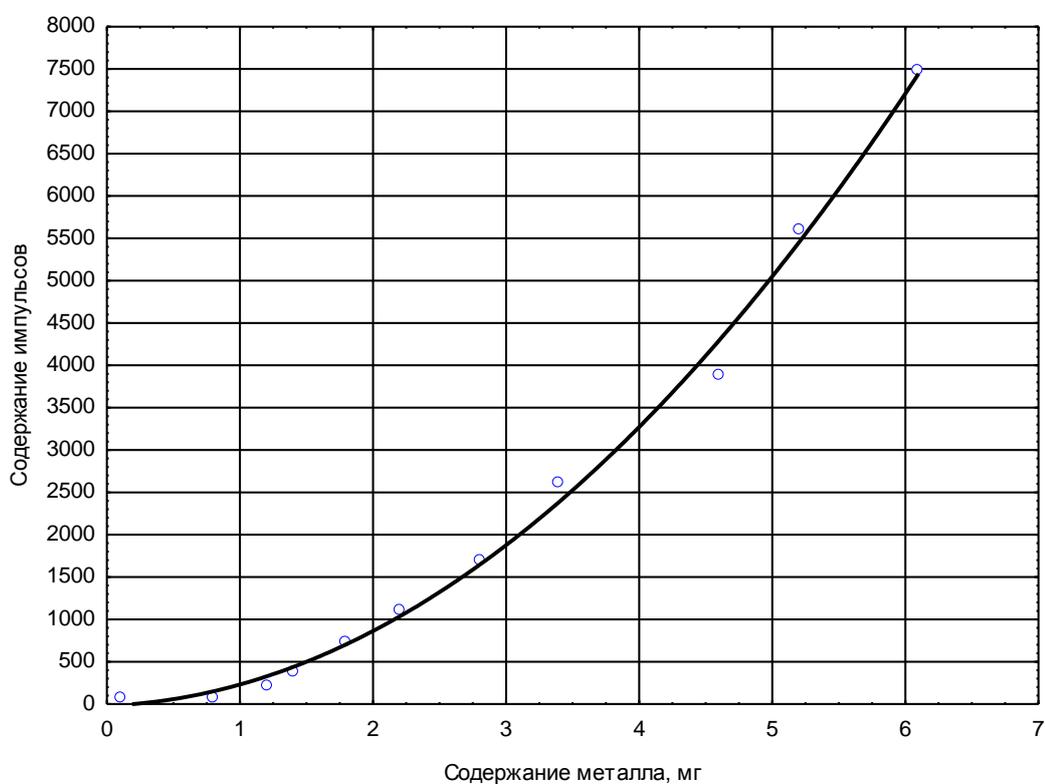
Тарировка прибора БАРС – 3 на содержание металлов  $Cu$  и  $Fe$ , %

Содержание $Cu$ , %	Количество импульсов $Cu$	Содержание $Fe$ , %	Количество импульсов $Fe$
100	7482	100	4486
90	5608	90	3965
80	3889	80	3226
70	2608	70	2660
60	1692	60	2142
50	1104	50	1762
40	732	40	1561
30	386	30	1225
20	224	20	1209
10	80	10	925
0	63	0	683

Тарировочный график содержания  $Cu$ , %Тарировочный график содержания  $Fe$ , %

Тарировка прибора БАРС – 3 на содержание металла *Си*, мг

Количество металла <i>Си</i> , мг	Количество импульсов
6,1	7482
5,2	5608
4,6	3889
3,4	2608
2,8	1692
2,2	1104
1,8	732
1,4	386
1,2	224
0,8	80
0,1	63

Тарировочный график количества импульсов от содержания *Си*, мг

## Геометрические размеры типовых гильз

## Гильза А-1

## Проекция А-А

20мм-13=92,487  
 40мм-12=92,488  
 60мм-10=92,490  
 80мм-8=92,492  
 100мм-9=92,491  
 120мм-13=92,487  
 140мм-12=92,488

## Проекция В-В

20мм-13=92,487  
 40мм-12=92,488  
 60мм-13=92,487  
 80мм-13=92,487  
 100мм-14=92,486  
 120мм-18=92,482  
 140мм-16=92,484

## Гильза А-2

## Проекция А-А

20мм-13=92,487  
 40мм-12=92,488  
 60мм-14=92,486  
 80мм-14=92,486  
 100мм-15=92,485  
 120мм-21=92,479  
 140мм-20=92,48

## Проекция В-В

20мм-13=92,489  
 40мм-12=92,488  
 60мм-13=92,488  
 80мм-13=92,488  
 100мм-14=92,487  
 120мм-18=92,486  
 140мм-16=92,45

## Гильза А-3

## Проекция А-А

20мм-9=92,491  
 40мм-9=92,491  
 60мм-11=92,489  
 80мм-11=92,489  
 100мм-12=92,488  
 120мм-17=92,483  
 140мм-12=92,488

## Проекция В-В

20мм-11=92,489  
 40мм-8=92,492  
 60мм-6=92,494  
 80мм-5=92,495  
 100мм-4=92,496  
 120мм-8=92,492  
 140мм-0=92,500

## Гильза А-4

## Проекция А-А

20мм-7=92,493  
 40мм-6=92,494  
 60мм-6=92,494  
 80мм-5=92,495  
 100мм-8=92,492  
 120мм-11=92,489  
 140мм-9=92,491

## Проекция В-В

20мм-9=92,491  
 40мм-9=92,491  
 60мм-10=92,490  
 80мм-10=92,490  
 100мм-13=92,487  
 120мм-16=92,484  
 140мм-10=92,490

## Геометрические размеры биметаллизированных гильз

## Гильза Г-1

## Проекция А-А

20мм-13=92,050  
 40мм-12=92,048  
 60мм-10=92,042  
 80мм-8=92,044  
 100мм-9=92,042  
 120мм-13=92,040  
 140мм-12=92,042

## Проекция В-В

20мм-13=92,052  
 40мм-12=92,052  
 60мм-13=92,046  
 80мм-13=92,046  
 100мм-14=92,045  
 120мм-18=92,046  
 140мм-16=92,046

## Гильза Г-2

## Проекция А-А

20мм-13=92,045  
 40мм-12=92,044  
 60мм-14=92,042  
 80мм-14=92,040  
 100мм-15=92,042  
 120мм-21=92,042  
 140мм-20=92,044

## Проекция В-В

20мм-13=92,050  
 40мм-12=92,048  
 60мм-13=92,044  
 80мм-13=92,042  
 100мм-14=92,036  
 120мм-18=92,036  
 140мм-16=92,036

## Гильза Г-3

## Проекция А-А

20мм-9=92,050  
 40мм-9=92,050  
 60мм-11=92,045  
 80мм-11=92,043  
 100мм-12=92,042  
 120мм-17=92,042  
 140мм-12=92,042

## Проекция В-В

20мм-11=92,045  
 40мм-8=92,043  
 60мм-6=92,039  
 80мм-5=92,037  
 100мм-4=92,037  
 120мм-8=92,037  
 140мм-0=92,036

## Гильза Г-4

## Проекция А-А

20мм-7=92,049  
 40мм-6=92,047  
 60мм-6=92,044  
 80мм-5=92,042  
 100мм-8=92,041  
 120мм-11=92,040  
 140мм-9=92,039

## Проекция В-В

20мм-9=92,045  
 40мм-9=92,041  
 60мм-10=92,043  
 80мм-10=92,041  
 100мм-13=92,041  
 120мм-16=92,041  
 140мм-10=92,041

## Тарировка датчика разряжения

Используемое оборудование:

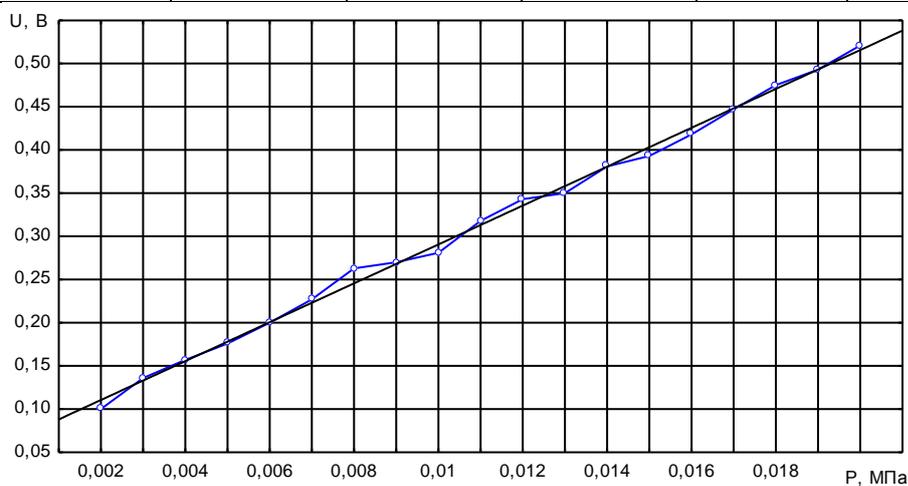
-датчик разряжения BOSCH 4513829;

-вакуумметр;

-АЦП

-шприц Жанэ объёмом 100 мл ТУ 46-22-631-76.

Разрежение (вакуумметр)		Аналого-цифровой преобразователь				
		количество замеров				
Р МПа	Р Па	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>4</sub>	m <sub>CP</sub>
0,002	0,1	0,09	0,1	0,1	0,1	0,09≈0,1
0,003	0,15	0,125	0,12	0,15	0,15	0,13≈0,136
0,004	0,2	0,15	0,15	0,17	0,15	0,15≈0,157
0,005	0,25	0,175	0,175	0,18	0,175	0,17≈0,176
0,006	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2≈0,2
0,007	0,35	0,225	0,225	0,235	0,225	0,22≈0,227
0,008	0,4	0,25	0,275	0,277	0,25	0,26≈0,263
0,009	0,45	0,275	0,225	0,275	0,275	0,27≈0,27
0,01	0,5	0,3	0,225	0,3	0,3	0,28≈0,281
0,011	0,55	0,325	0,3	0,325	0,325	0,31≈0,318
0,012	0,6	0,375	0,325	0,325	0,35	0,34≈0,343
0,013	0,65	0,4	0,3	0,35	0,35	0,35≈0,35
0,014	0,7	0,425	0,35	0,375	0,375	0,38≈0,381
0,015	0,75	0,4	0,375	0,4	0,4	0,39≈0,393
0,016	0,8	0,425	0,4	0,425	0,425	0,41≈0,418
0,017	0,85	0,45	0,425	0,45	0,475	0,44≈0,447
0,018	0,9	0,475	0,45	0,475	0,5	0,47≈0,475
0,019	0,95	0,5	0,475	0,5	0,5	0,49≈0,493
0,02	1	0,525	0,5	0,51	0,55	0,52≈0,521

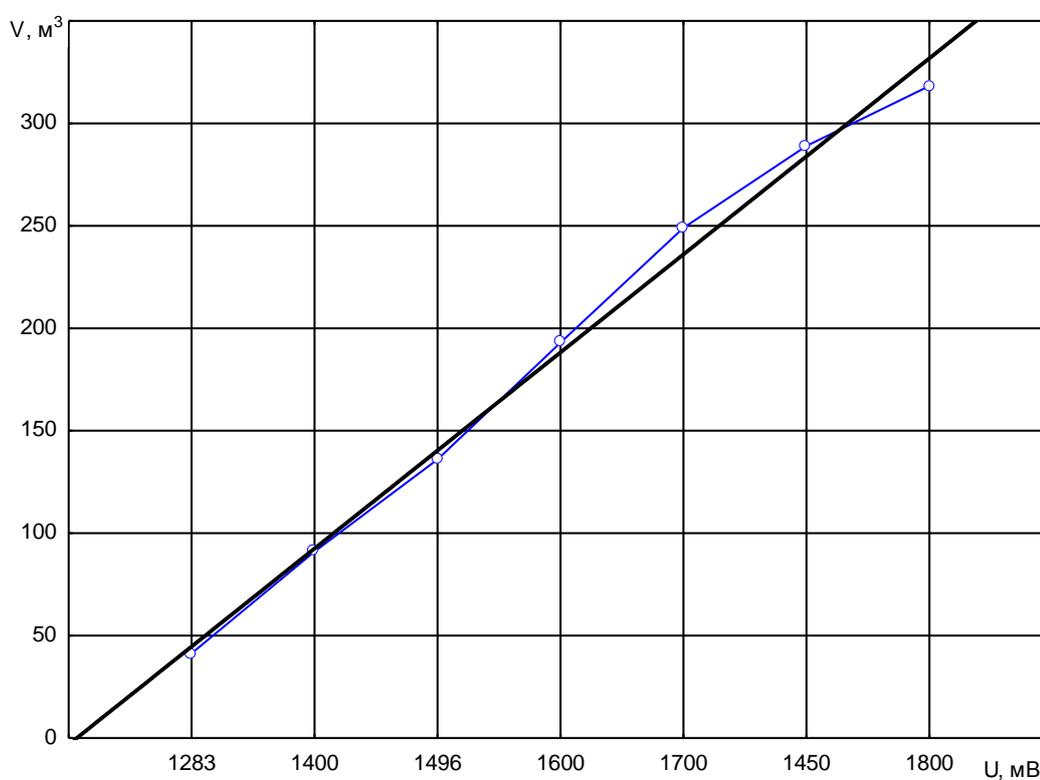


Тарировочный график изменения напряжения от разрежения

## Тарировка датчика массового расхода воздуха

Используемое оборудование:

- датчик массового расхода воздуха BOSCH 0 280 218 037;
- мультиметр М 890G;
- АЦП;
- всасывающее устройство;
- блок питания 5-12 В;
- счётчик газовый СГК-4;
- секундомер;



Тарировочный график расхода воздуха и напряжения

## Тарировка датчика давления газов

Используемое оборудование:

- датчик давления газов УДПС 001-01 № 9000 008;
- манометр поршневой класс точности 0,05%. Тип МП 600атм;
- АЦП;

P, кгс/см <sup>2</sup>	U, мВ			
	m <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	m <sub>3</sub>	m <sub>CP</sub>
10	50	45	50	48
20	100	100	95	98
30	140	140	145	142
40	185	190	180	185
50	225	230	230	228
60	270	265	265	267
70	305	315	315	312
80	365	360	355	360
90	395	400	395	397
100	460	460	450	457

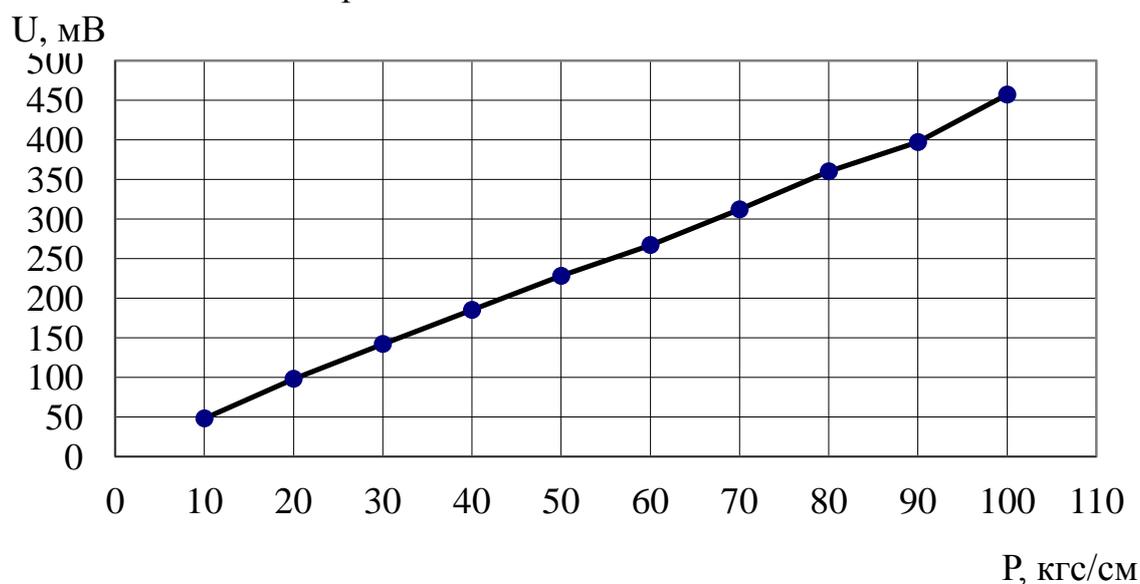
9,81МПа=100 кгс/см<sup>2</sup>

Данные НИИФИ

Чувствительность – 4,4 мВ/( кгс/см<sup>2</sup>)

Ёмкость собств., пФ – 120 пФ

Сопротивление изоляции при 450 °С - 7·10<sup>5</sup> Ом



Тарировочный график изменения напряжения от давления

### **ПРИЛОЖЕНИЕ 3**

**Результаты лабораторных, стендовых и эксплуатационных испытаний**

**Индикаторные диаграммы двигателя УМЗ-417 при различной частоте вращения коленчатого вала**

## Определение момента силы трения и периода его стабилизации

Образец 0 (без вставки)  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла С <sup>0</sup>	T, колод- ки С <sup>0</sup>	M, трения	t, мин	T, масла С <sup>0</sup>	T, колод- ки С <sup>0</sup>	M, трения
1	20-40	17,5-59	3,25	31	98	106,5	3,2
2	46	72	3,10	32	98	107,5	3,2
3	52	81	3,05	33	99	108	3,2
4	58	85	3,0	34	99	108,5	3,25
5	59	87	3,0	35	99	108,5	3,25
6	60	89	3,0	36	99	108,5	3,3
7	71	90	3,0	37	100	109,5	3,3
8	74	91	3,05	38	100	109,5	3,3
9	78	92	3,0	39	100	109,5	3,3
10	80	93	3,0	40	100	110,5	3,3
11	81	94	3,0	41	100	110,5	3,3
12	81	95	3,0	42	100	110,5	3,3
13	82	96	3,0	43	100	110,5	3,3
14	83	97	3,05	44	101	111,5	3,3
15	85	97,5	3,1	45	101	111,5	3,3
16	86	98	3,1	46	102	111,5	3,3
17	87	98,5	3,15	47	102	111,5	3,35
18	88	99	3,15	48	102	111,5	3,35
19	89	99,5	3,15	49	102	111,5	3,35
20	90	100	3,15	50	102	111,5	3,35
21	91	101,5	3,15	51	102	111,5	3,35
22	92	102,5	3,15	52	103	111,5	3,35
23	93	103,5	3,15	53	103	112,5	3,35
24	94	104,0	3,15	54	103	112,5	3,35
25	94	104,5	3,2	55	103	112,5	3,4
26	94	104,5	3,2	56	103	112,5	3,4
27	95	105,5	3,2	57	103	112,5	3,4
28	96	106,0	3,2	58	104	112,5	3,4
29	97	106,5	3,2	59	104	112,5	3,4
30	98	106,5	3,2	60	104	112,5	3,4

Образец 1 (угол наклона 0<sup>0</sup>)  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла С <sup>0</sup>	T, колод- ки С <sup>0</sup>	M, трения	t, мин	T, масла С <sup>0</sup>	T, колод- ки С <sup>0</sup>	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	20-40	18-72	3,3	31	104	111,5	3,35
2	48	84	3,25	32	104	111,5	3,35
3	60	92	3,25	33	104	112	3,35

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
4	65	94	3,2	34	105	112,5	3,4
5	72	97	3,2	35	105	112,5	3,4
6	79	99	3,3	36	105	112,5	3,4
7	80	101	3,3	37	105	112,5	3,4
8	82	103	3,25	38	105	112,5	3,35
9	89	104	3,25	39	105	112,5	3,4
10	92	104	3,3	40	105	112,5	3,35
11	94	105	3,3	41	105	112,5	3,35
12	98	106	3,35	42	105	112,5	3,35
13	100	107	3,35	43	105	112,5	3,35
14	102	107	3,35	44	105	112,5	3,35
15	102	108	3,35	45	105	112,5	3,35
16	102	108	3,3	46	105,5	112,5	3,35
17	102	109	3,3	47	105,5	112,5	3,35
18	102	109	3,35	48	105,5	112,5	3,35
19	103	109,5	3,4	49	105,5	112,5	3,35
20	103	109,5	3,4	50	105,5	112,5	3,4
21	104	110,5	3,35	51	105,5	112,5	3,4
22	104	110,5	3,4	52	105,5	112,5	3,4
23	104	110,5	3,35	53	106	112,5	3,4
24	104	111	3,4	54	106	112,5	3,4
25	104	111,5	3,35	55	106	112,5	3,4
26	104	111,5	3,35	56	106	112,5	3,4
27	104	111,5	3,35	57	106	112,5	3,4
28	104	111,5	3,35	58	106	112,5	3,4
29	104	111,5	3,35	59	106	112,5	3,4
30	104	111,5	3,35	60	106	112,5	3,4

Образец 2 (угол наклона  $5^0$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла C <sup>0</sup>	T, ко- лодки C <sup>0</sup>	M, трения	t, мин	T, масла C <sup>0</sup>	T, ко- лодки C <sup>0</sup>	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	20-28	21-45	3,4	31	95	106,5	3,2
2	33	58	3,1	32	97	106,5	3,2
3	45	74	3,1	33	97	107	3,2
4	45	82	2,9	34	98	107,5	3,2
5	49	88	2,95	35	98	107,5	3,2
6	55	92	2,95	36	99	107,5	3,2
7	60	94	2,9	37	99	108	3,2
8	62	95	2,95	38	100	108,5	3,25
9	65	96	3,0	39	100	108,5	3,25
10	70	97	3,0	40	100	108,5	3,25
11	79	96	3,0	41	100	108,5	3,25
12	81	96	3,05	42	100	109	3,25
13	82	96,5	3,05	43	100	109,5	3,25
14	85	97	3,05	44	100	109,5	3,25

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
15	86	98	3,1	45	100	109,5	3,25
16	88	99	3,1	46	100	109,5	3,25
17	89	100	3,1	47	100	109,5	3,25
18	90	101	3,1	48	100	109,5	3,25
19	90	102	3,15	49	100	109,5	3,25
20	90	102	3,15	50	100	109,5	3,25
21	91	103	3,2	51	101	109,5	3,25
22	91	104	3,2	52	101	109,5	3,25
23	91	104	3,2	53	101	110	3,25
24	91	104	3,2	54	102	110	3,25
25	91	104,5	3,2	55	102	110	3,25
26	92	104,5	3,2	56	103	110	3,25
27	92	105	3,15	57	103	110	3,25
28	94	105,5	3,2	58	104	110	3,25
29	95	106	3,2	59	104	110	3,25
30	95	106,5	3,2	60	104	110	3,25

Образец 3 (угол наклона  $10^0$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла $C^0$	T, ко- лодки $C^0$	M, трения	t, мин	T, масла $C^0$	T, ко- лодки $C^0$	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	23-25	24-61	3,05	31	97	103,5	3,2
2	42	73	3,1	32	98	104	3,2
3	43	84	3,1	33	98	104,5	3,2
4	50	88	3,1	34	98	104,5	3,2
5	60	92	3,15	35	98	104,5	3,2
6	70	94	3,15	36	98	104,5	3,2
7	79	94	3,15	37	98	104,5	3,2
8	80	95	3,15	38	99	104,5	3,2
9	81	95	3,2	39	100	104,5	3,2
10	82	95	3,2	40	100	105	3,2
11	83	96	3,2	41	100	105,5	3,2
12	85	97	3,2	42	100	105,5	3,15
13	86	97	3,2	43	100	105,5	3,15
14	87	98	3,2	44	100	105,5	3,15
15	88	98	3,2	45	100	105,5	3,15
16	89	99	3,2	46	100	105,5	3,15
17	89	99	3,15	47	100	105,5	3,15
18	90	99	3,15	48	100	105,5	3,15
19	90	100	3,2	49	100	106	3,15
20	91	101	3,2	50	100	106	3,15
21	92	101	3,2	51	101	106	3,15
22	92	101	3,2	52	101	106	3,14
23	92	102	3,2	53	101	106	3,14
24	92	102	3,2	54	101	106	3,14
25	93	103	3,2	55	102	106	3,14

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
26	94	103	3,2	56	102	106	3,14
27	94	103	3,2	57	102	106,5	3,14
28	95	103,5	3,2	58	102	106,5	3,14
29	96	103,5	3,2	59	102	106,5	3,14
30	97	103,5	3,2	60	103	106,5	3,14

Образец 4 (угол наклона  $15^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	22-33	24-60	3,2	31	99	104,5	3,1
2	41	68	3,15	32	100	104,5	3,1
3	42	72	3,15	33	100	104	3,1
4	49	76	3,1	34	100	104	3,1
5	58	81	3,1	35	100	104	3,1
6	60	88	3,15	36	100	104	3,1
7	68	92	3,2	37	100	104	3,1
8	72	96	3,25	38	100	104	3,05
9	80	98	3,3	39	100	103,5	3,05
10	82	103	3,3	40	100	103,5	3,05
11	85	103	3,3	41	100	103,5	3,05
12	90	103	3,3	42	100	103,5	3,05
13	91	103	3,3	43	101	103,5	3,05
14	92	103	3,3	44	101	103,5	3,05
15	93	103,5	3,3	45	101	103,5	3,05
16	93	103,5	3,25	46	101	103,5	3,05
17	93	103,5	3,25	47	101	103,5	3,05
18	93	103,5	3,25	48	101	103,5	3,05
19	93	103,5	3,2	49	101	103,5	3,0
20	95	104	3,2	50	101	103,5	3,0
21	95	104	3,2	51	101,5	103,5	3,0
22	95	104	3,2	52	101,5	103,5	3,0
23	96	104	3,2	53	101,5	103,5	3,0
24	97	104	3,2	54	101,5	103	3,0
25	98	104	3,2	55	101,5	103	3,0
26	98	104,5	3,15	56	101,5	103	3,0
27	98	104,5	3,15	57	101,5	103	3,0
28	98	104,5	3,15	58	101,5	103	3,0
29	98	104,5	3,1	59	101,5	103	3,0
30	99	104,5	3,1	60	101,5	103	3,0

Продолжение П.3.1

Образец 5 (угол наклона  $20^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	20-34	17-53	3,1	31	89	104	3,1
2	42	70	3,1	32	90	104	3,1
3	42	80	3,1	33	90	104	3,05
4	45	88	3,15	34	90	104,5	3,05
5	49	92	3,15	35	90	104,5	3,05
6	53	95	3,15	36	90	104,5	3,05
7	60	95	3,15	37	90	105	3,05
8	69	95	3,15	38	90	105,5	3,05
9	70	95	3,2	39	90	105,5	3,05
10	72	95	3,2	40	90	106	3,05
11	73	95	3,2	41	90	106,5	3,05
12	74	96	3,2	42	92	106,5	3,04
13	75	96	3,15	43	92	106,5	3,04
14	78	97	3,15	44	92	106,5	3,03
15	78	97	3,15	45	92	107	3,03
16	79	98	3,15	46	92	107,5	3,03
17	80	99	3,15	47	92	107,5	3,02
18	80	99	3,1	48	94	108	3,02
19	80	100	3,1	49	94	108	3,02
20	82	100	3,1	50	94	108,5	3,02
21	82	100	3,1	51	95	108,5	3,02
22	83	101	3,1	52	95	108,5	3,0
23	83	101	3,1	53	95	108,5	3,0
24	83	102	3,1	54	95	108,5	3,0
25	84	102	3,1	55	95	109	3,0
26	85	103	3,1	56	95	109	3,0
27	85	103	3,1	57	95	109	3,0
28	86	103	3,1	58	95	109	2,98
29	88	103	3,1	59	95	109	2,98
30	89	104	3,1	60	97	109	2,98

Образец 6 (угол наклона  $25^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	25-30	25-58	3,2	31	101	101,5	3,2
2	40	62	3,2	32	101	101,5	3,2
3	48	69	3,2	33	101	101,5	3,15
4	58	74	3,2	34	101	101,5	3,15
5	65	81	3,25	35	101	101,5	3,15
6	90	84	3,25	36	101	101,5	3,15

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
7	90	88	3,25	37	101	101,5	3,15
8	90	90	3,25	38	101	101,5	3,15
9	92	93	3,25	39	101	101,5	3,15
10	95	93	3,25	40	101	101,5	3,15
11	95	94	3,25	41	101	102	3,15
12	98	94	3,25	42	101	102	3,15
13	98	94	3,25	43	101	102,5	3,15
14	98	95	3,25	44	101	102,5	3,15
15	99	95	3,2	45	101	102,5	3,1
16	99	95	3,2	46	101	103	3,1
17	100	96	3,2	47	101	103	3,1
18	100	96	3,2	48	101	103	3,1
19	100	96	3,2	49	101	103,5	3,1
20	100	97	3,2	50	101	103,5	3,1
21	100	97	3,2	51	101	103,5	3,1
22	100	98	3,2	52	101	103,5	3,05
23	100	98	3,2	53	101,5	104	3,05
24	100	98	3,2	54	101,5	104	3,05
25	100	99	3,2	55	101,5	104	3,05
26	101	99	3,2	56	101,5	104	3,05
27	101	100	3,2	57	101,5	104	3,05
28	101	100	3,2	58	101,5	104	3,05
29	101	100	3,2	59	101,5	104	3,05
30	101	101	3,2	60	101,5	104	3,05

Образец 7 (угол наклона  $30^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	21-28	21-54	3,05	31	94	100	2,95
2	40	69	3,05	32	94	100	2,95
3	58	79	3,05	33	94	100,5	2,95
4	68	84	3,05	34	94	100,5	2,95
5	72	88	3,05	35	94	101	2,95
6	80	90	3,0	36	94	101,5	2,95
7	85	92	3,0	37	94	101,5	3,0
8	88	93	3,0	38	94	102	3,0
9	89	94	3,0	39	94	102	3,0
10	90	95	3,0	40	94	102,5	3,0
11	91	96	3,0	41	94	102,5	3,0
12	93	96	3,0	42	94	103	3,05
13	93	96	3,0	43	94	103,5	3,05
14	93	97	3,0	44	95	103,5	3,05
15	93	97	2,95	45	95	103,5	3,05
16	93	98	2,95	46	95	104	3,05
17	93	99	2,95	47	95	104,5	3,05

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
18	93	99	2,95	48	95	104,5	3,05
19	93	100	2,95	49	95	104,5	3,05
20	93	100	2,95	50	95	104,5	3,05
21	93	100	2,95	51	95	104,5	3,05
22	93	100	2,95	52	96	104,5	3,1
23	93	100	2,95	53	98	105	3,1
24	93	100	2,95	54	98	105,5	3,1
25	94	100	2,95	55	98	105,5	3,1
26	9	100	2,95	56	98	105,5	3,1
27	4	100	2,95	57	98	105,5	3,1
28	94	100	2,95	58	98	105,5	3,1
29	94	100	2,95	59	98	105,5	3,1
30	94	100	2,95	60	98	105,5	3,1

Образец 8 (угол наклона  $35^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла C <sup>0</sup>	T, ко- лодки C <sup>0</sup>	M, трения	t, мин	T, масла C <sup>0</sup>	T, ко- лодки C <sup>0</sup>	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	22-38	27-60	3,2	31	90	101,5	3,1
2	50	74	3,2	32	91	101,5	3,1
3	52	84	3,2	33	91	101,5	3,1
4	56	91	3,2	34	91	101,5	3,1
5	58	95	3,2	35	91	102	3,1
6	62	97	3,2	36	91	102,5	3,1
7	68	98	3,15	37	91	102,5	3,1
8	75	98	3,15	38	92	102,5	3,1
9	79	98	3,15	39	92	103	3,1
10	80	98	3,15	40	92	103,5	3,1
11	80	98	3,15	41	92	103,5	3,1
12	82	98	3,15	42	92	103,5	3,1
13	82	98	3,1	43	92	103,5	3,1
14	83	98	3,1	44	92	103,5	3,1
15	85	98	3,1	45	92	104	3,1
16	85	98	3,1	46	92	104	3,15
17	85	99	3,1	47	92	104,5	3,15
18	87	99	3,1	48	92	104,5	3,15
19	88	99	3,1	49	92	104,5	3,15
20	89	99	3,1	50	92	104,5	3,15
21	89	100	3,1	51	92	104,5	3,15
22	89	100	3,1	52	94	105	3,15
23	90	100	3,1	53	94	105	3,15
24	90	100	3,1	54	94	105	3,15
25	90	100	3,1	55	94	105,5	3,15
26	90	100,5	3,1	56	94	105,5	3,15
27	90	100,5	3,1	57	94	105,5	3,15
28	90	100,5	3,1	58	94	105,5	3,15

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
29	90	100,5	3,1	59	94	105,5	3,15
30	90	101	3,1	60	94	105,5	3,15

Образец 9 (угол наклона  $40^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	21-30	25-62	3,2	31	102	107,5	3,15
2	38	76	3,2	32	102	107,5	3,2
3	45	86	3,2	33	102	107,5	3,2
4	52	92	3,2	34	102	108	3,2
5	58	97	3,2	35	102	108,5	3,2
6	68	100	3,2	36	102	108,5	3,2
7	72	102	3,2	37	102	108,5	3,2
8	82	102,5	3,2	38	102	108,5	3,2
9	85	102,5	3,2	39	102	108,5	3,2
10	90	103	3,2	40	102	108,5	3,2
11	91	103,5	3,2	41	102	108,5	3,2
12	92	103,5	3,15	42	102	108,5	3,2
13	92	103,5	3,15	43	102	108,5	3,2
14	92	103,5	3,15	44	102	109	3,2
15	92	104	3,15	45	102	109,5	3,2
16	98	104,5	3,15	46	102	109,5	3,2
17	98	105	3,15	47	102	109,5	3,2
18	98	105,5	3,15	48	102	109,5	3,2
19	98	105,5	3,15	49	103	109,5	3,2
20	98	105,5	3,15	50	103	109,5	3,2
21	99	106	3,15	51	103	109,5	3,2
22	100	106,5	3,15	52	103	109,5	3,2
23	100	106,5	3,15	53	103	109,5	3,2
24	100	106,5	3,15	54	103	109,5	3,2
25	100	106,5	3,15	55	104	109,5	3,25
26	100	107	3,15	56	105	110	3,25
27	100	107,5	3,15	57	105	110,5	3,25
28	100	107,5	3,15	58	105	110,5	3,25
29	100	107,5	3,15	59	105	110,5	3,25
30	100	107,5	3,15	60	105	110,5	3,25

Образец 10 (угол наклона  $45^{\circ}$ )  $n=191\text{мин}^{-1}$ ;  $F=150\text{Н}$ 

t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения	t, мин	T, масла $C^{\circ}$	T, ко- лодки $C^{\circ}$	M, трения
1	2	3	4	5	6	7	8
1	28-33	26-57	3,0	31	97	96,5	3,05
2	40	71	3,1	32	97	96,5	3,05

## Продолжение П.3.1

1	2	3	4	5	6	7	8
3	50	81	3,1	33	97	97	3,05
4	52	85	3,1	34	97,5	97,5	3,05
5	58	90	3,15	35	97,5	97,5	3,05
6	64	92	3,15	36	97,5	97,5	3,05
7	70	93	3,15	37	97,5	97,5	3,05
8	78	94	3,15	38	97,5	97,5	3,05
9	82	94	3,1	39	97,5	97,5	3,05
10	82	94	3,1	40	97,5	97,5	3,05
11	85	94	3,05	41	97,5	97,5	3,05
12	89	93	3,05	42	97,5	97,5	3,05
13	90	93	3,05	43	97,5	97,5	3,05
14	90	93	3,0	44	97,5	97,5	3,05
15	90	93	3,0	45	97,5	97,5	3,05
16	90	93,5	3,0	46	98	98	3,05
17	90	93,5	3,0	47	98,5	98,5	3,05
18	91	93,5	3,0	48	98,5	98,5	3,05
19	91	94	3,0	49	98,5	98,5	3,05
20	91	94,5	3,0	50	98,5	98,5	3,05
21	92	94,5	3,0	51	98,5	98,5	3,05
22	92	94,5	3,0	52	98,5	98,5	3,05
23	92	94,5	3,0	53	98,5	98,5	3,05
24	92	94,5	3,0	54	98,5	98,5	3,05
25	94	94,5	3,0	55	98,5	98,5	3,05
26	95	94,5	3,0	56	98,5	98,5	3,05
27	95	95	3,0	57	98,5	98,5	3,05
28	95	95,5	3,0	58	98,5	98,5	3,05
29	95	96	3,0	59	98,5	98,5	3,05
30	96	96,5	3,05	60	98,5	98,5	3,05

Результаты взвешивания образцов, г  
Начальное

№	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_{CP}$
0	22,8357	22,8358	22,8358	22,8358
1	22,9815	22,9814	22,9815	22,9815
2	22,5729	22,5728	22,5728	22,5728
3	22,5539	22,5538	22,5538	22,5538
4	22,7077	22,7079	22,7078	22,7078
5	22,5631	22,5631	22,5631	22,5631
6	22,6103	22,6103	22,6103	22,6103
7	22,6570	22,6570	22,6571	22,6570
8	22,6315	22,6317	22,6316	22,6316
9	22,9354	22,9354	22,9353	22,9354
10	22,4858	22,4858	22,4858	22,4858

№	Приработка		F=150Н	T=60мин.	$m_{CP}$
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_3$	
0	22,8208	22,8209	22,8208	22,8208	22,8208
1	22,9658	22,9659	22,9658	22,9658	22,9658
2	22,5541	22,5541	22,5541	22,5541	22,5541
3	22,5475	22,5476	22,5475	22,5475	22,5475
4	22,7027	22,7028	22,7029	22,7028	22,7028
5	22,5622	22,5620	22,5621	22,5621	22,5621
6	22,6073	22,6074	22,6074	22,6074	22,6074
7	22,6499	22,6499	22,6499	22,6499	22,6499
8	22,6206	22,6203	22,6203	22,6203	22,6204
9	22,9289	22,9289	22,9288	22,9289	22,9289
10	22,4786	22,4783	22,4783	22,4783	22,4784

№	Задир		F=135...815Н	T=60мин.	$m_{CP}$
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_3$	
0	22,8012	22,8012	22,8013	22,8012	22,8012
1	22,9540	22,9540	22,9541	22,9540	22,9540
2	22,5489	22,5489	22,5489	22,5489	22,5489
3	22,5452	22,5452	22,5452	22,5452	22,5452
4	22,7019	22,7017	22,7018	22,7018	22,7018
5	22,5614	22,5612	22,5610	22,5610	22,5621
6	22,6057	22,6056	22,6056	22,6056	22,6056
7	22,6451	22,6450	22,6450	22,6450	22,6450
8	22,6181	22,6181	22,6180	22,6181	22,6181
9	22,9209	22,9207	22,9207	22,9207	22,9208
10	22,4713	22,4711	22,4712	22,4712	22,4712

## Изменение веса образцов в % соотношении

Состояние образцов	Изменение веса по номерам образцов; %											
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Начальное	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Приработка	0,2	0,2	0,4	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	
Задир	0,5	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,2	0,3	0,2	0,2	

## Результаты взвешивания гильз цилиндров, г

№ гильзы	Изменение веса гильзы цилиндра по номерам; г	
	до исследований	после исследований
А-1	2314,059	2312,949
А-2	2307,195	2306,129
А-3	2309,302	2308,170
А-4	2308,467	2307,313
Г-1	2294,095	2293,762
Г-2	2289,564	2289,253
Г-3	2286,733	2286,400
Г-4	2292,483	2292,128

## Износ гильз цилиндров, г

№ гильзы	Типовая	№ гильзы	Биметаллизированная
	г		г
А-1	1,110	Г-1	0,333
А-2	1,066	Г-2	0,311
А-3	1,132	Г-3	0,333
А-4	1,154	Г-4	0,355

## Средний износ гильз цилиндров по высоте гильзы, мкм

Высота гильзы, мм	Типовая	№ гильзы	Биметаллизированная
	мкм		мкм
10	6,9	10	2,5
20	6,4	20	1,8
30	5,4	30	1,7
40	5,2	40	1,6
50	4,8	50	1,3
60	4,5	60	1,2
70	4,1	70	1,0
80	4,3	80	1,0
90	4,7	90	1,5
100	4,9	100	1,6
110	5,2	110	1,8

Данные для построения поверхности отклика от взаимодействия наклона вставки и нагрузки в трибоузле

Угол наклона вставки	Нагрузка	Момент	Износ
0	135	3,15	0,19
0	270	3,4	0,195
0	405	3,5	0,198
0	540	3,8	0,202
0	675	4,1	0,225
0	815	4,75	0,239
5	135	3,25	0,068
5	270	3,5	0,072
5	405	3,65	0,074
5	540	3,9	0,08
5	675	4,25	0,082
5	815	4,85	0,086
10	135	3,2	0,012
10	270	3,5	0,013
10	405	3,6	0,014
10	540	3,9	0,06
10	675	4,25	0,018
10	815	4,85	0,019
15	135	3,2	0,05
15	270	3,55	0,052
15	405	3,65	0,054
15	540	3,9	0,056
15	675	4,25	0,058
15	815	4,75	0,06
20	135	3,3	0,03
20	270	3,65	0,034
20	405	3,75	0,038
20	540	4,05	0,04
20	675	4,4	0,044

20	815	4,9	0,047
25	135	3	0,082
25	270	3,35	0,09
25	405	3,55	0,094
25	540	3,85	0,1
25	675	4,3	0,14
25	815	4,9	0,12
30	135	3,25	0,08
30	270	3,55	0,09
30	405	3,7	0,1
30	540	3,85	0,12
30	675	4,2	0,13
30	815	4,8	0,146
35	135	3,15	0,08
35	270	3,55	0,09
35	405	3,75	0,1
35	540	4	0,12
35	675	4,4	0,13
35	815	4,95	0,146
40	135	3,1	0,16
40	270	3,5	0,172
40	405	3,6	0,18
40	540	3,9	0,2
40	675	4,3	0,25
40	815	4,9	0,275
45	135	2,9	0,19
45	270	3,25	0,195
45	405	3,45	0,198
45	540	3,7	0,202
45	675	4,1	0,225
45	815	4,75	0,239

Замеры (снятие импульсов) с образцов до исследований на машине трения

Образец 0 (без вставки)

*Fe* – 4538; 4530; 4488; 4457; 4419.

*Cu* – 64; 61; 61; 60; 59.

Образец 1 ( $0^0$ )

*Fe* – 5265; 5189; 5135; 5143; 5070.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 568; 574; 577; 570; 574.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 56; 59; 56; 59; 56

Образец 6 ( $25^0$ )

*Fe* – 4221; 4179; 4133; 4125; 4085.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 946; 923; 930; 923; 921.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 56; 57; 52; 51; 49.

Образец 2 ( $5^0$ )

*Fe* – 4845; 4791; 4791; 4740; 4761.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 782; 757; 761; 763; 766.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 54; 56; 57; 52; 55.

Образец 7 ( $30^0$ )

*Fe* – 4048; 4022; 3983; 3981; 3950.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 783; 780; 772; 790; 777.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 55; 59; 52; 53; 56.

Образец 3 ( $10^0$ )

*Fe* – 4737; 4703; 4678; 4659; 4656.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 614; 605; 609; 596; 594.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 61; 56; 59; 55; 53.

Образец 8 ( $35^0$ )

*Fe* – 3902; 3926; 3890; 3880; 3842.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 773; 797; 784; 769; 782.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 58; 54; 48; 53; 50.

Образец 4 ( $15^0$ )

*Fe* – 4649; 4617; 4604; 4572; 4590.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 593; 582; 605; 603; 590.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 53; 56; 52; 56; 50.

Образец 9 ( $40^0$ )

*Fe* – 4016; 3961; 3971; 3957; 3916.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 923; 897; 892; 898; 909.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 56; 53; 59; 50; 56.

Образец 5 ( $20^0$ )

*Fe* – 4391; 4403; 4393; 4371; 4354.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 779; 769; 757; 757; 766.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 54; 53; 51; 50; 52.

Образец 10 ( $45^0$ )

*Fe* – 3821; 3801; 3798; 3742; 3729.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 1114; 1120; 1125; 1102; 1099.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 47; 48; 47; 48; 48.

Замеры (снятие импульсов) с образцов после исследований на машине трения

Образец 0 (без вставки)

*Fe* – 3526; 3509; 3587; 3561; 3470.

*Cu* – 48; 51; 54; 49; 50.

Образец 1 ( $0^0$ )

*Fe* – 4441; 4437; 4405; 4413; 4385.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 487; 495; 490; 495; 478.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 65; 60; 64; 64; 63.

Образец 6 ( $25^0$ )

*Fe* – 3753; 3734; 3744; 3736; 3725.

*Cu*<sub>(0)</sub> – 784; 779; 749; 759; 750.

*Cu*<sub>(3)</sub> – 68; 64; 64; 70; 66.

Образец 2 ( $5^0$ )

*Fe* – 4241; 4218; 4182; 4157; 4172.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 634; 648; 647; 644; 643.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 63; 59; 56; 58; 60.

Образец 3 ( $10^0$ )

*Fe* – 4294; 4236; 4274; 4243; 4208.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 493; 502; 495; 500; 504.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 62; 69; 65; 67; 68.

Образец 4 ( $15^0$ )

*Fe* – 4099; 4105; 4115; 4097; 4096.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 466; 456; 470; 467; 459.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 74; 65; 70; 67; 70.

Образец 5 ( $20^0$ )

*Fe* – 3936; 3861; 3865; 3850; 3821.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 598; 593; 593; 600; 572.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 68; 69; 67; 65; 67.

Образец 7 ( $30^0$ )

*Fe* – 3826; 3842; 3783; 3822; 3771.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 671; 665; 663; 663; 661.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 67; 67; 66; 62; 67.

Образец 8 ( $35^0$ )

*Fe* – 3860; 3852; 3862; 3840; 3844.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 656; 658; 656; 652; 650.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 74; 77; 78; 72; 70.

Образец 9 ( $40^0$ )

*Fe* – 3865; 3845; 3853; 3855; 3823.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 738; 736; 735; 726; 731.

*Cu<sub>(3)</sub>* – 71; 63; 67; 66; 65.

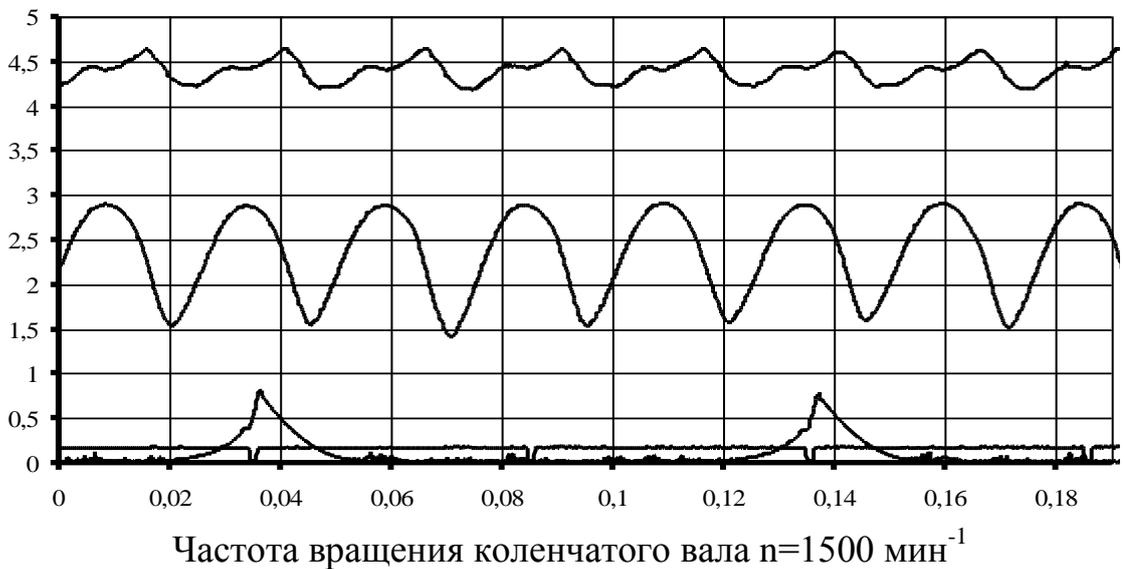
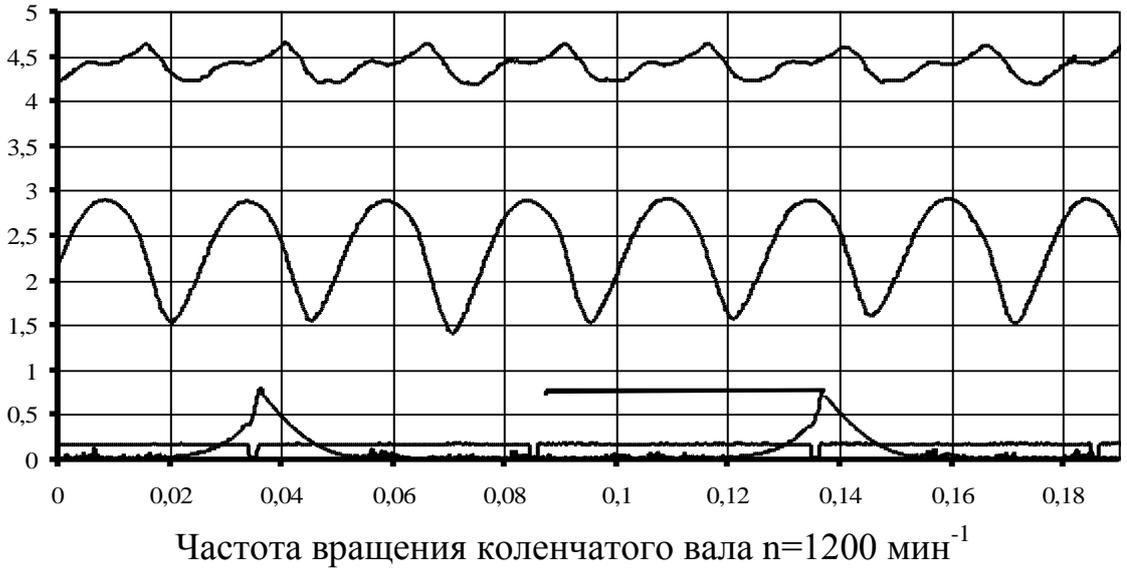
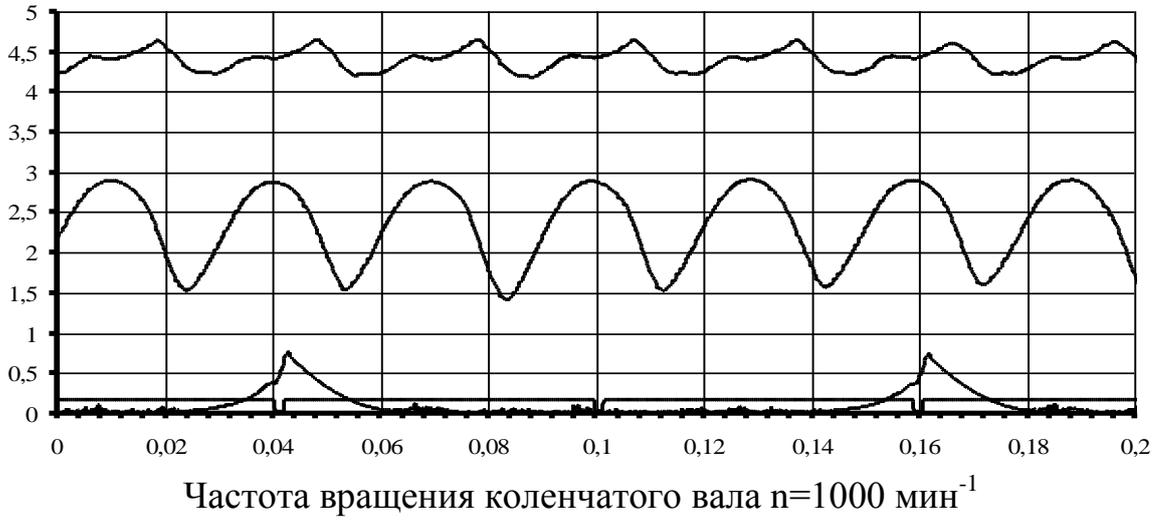
Образец 10 ( $45^0$ )

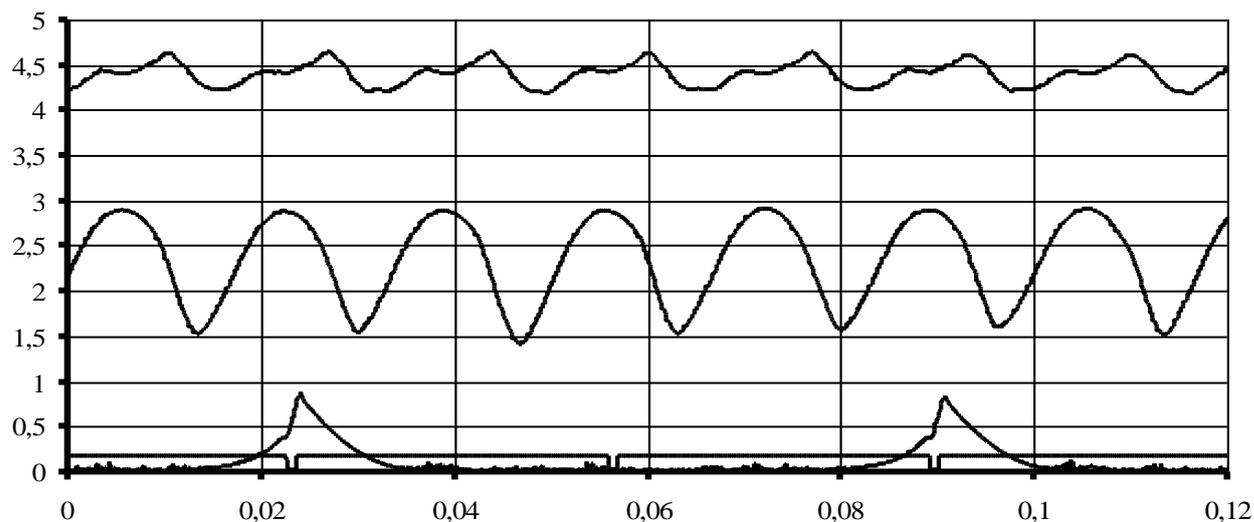
*Fe* – 3444; 3457; 3433; 3415; 3406.

*Cu<sub>(0)</sub>* – 1008; 1012; 990; 995; 987.

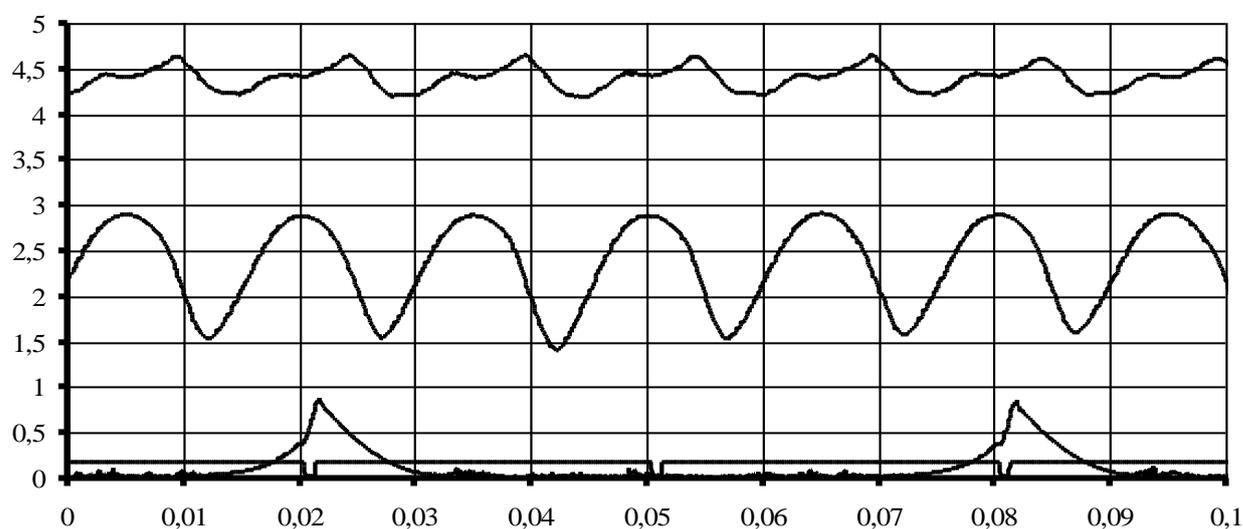
*Cu<sub>(3)</sub>* – 74; 70; 73; 73; 70.

Индикаторные диаграммы двигателя УМЗ-417 оснащённого биметаллизированными медью гильзами цилиндров

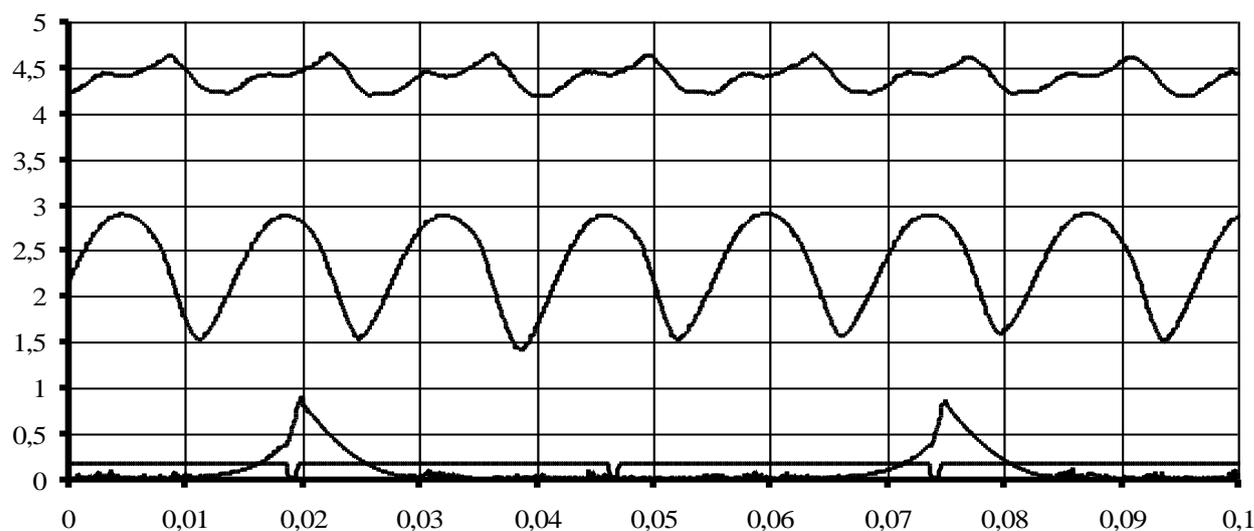




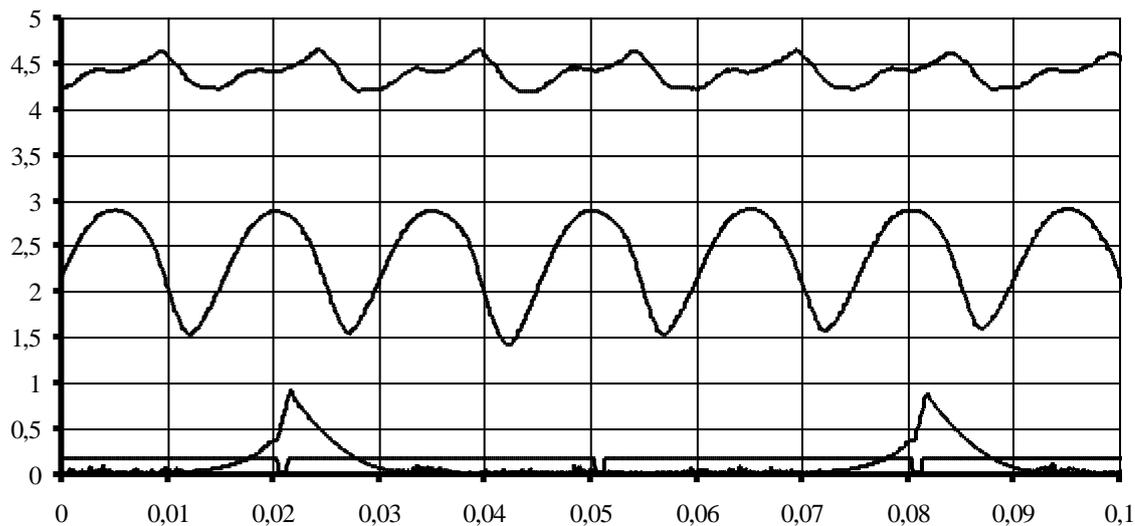
Частота вращения коленчатого вала  $n=1800 \text{ мин}^{-1}$



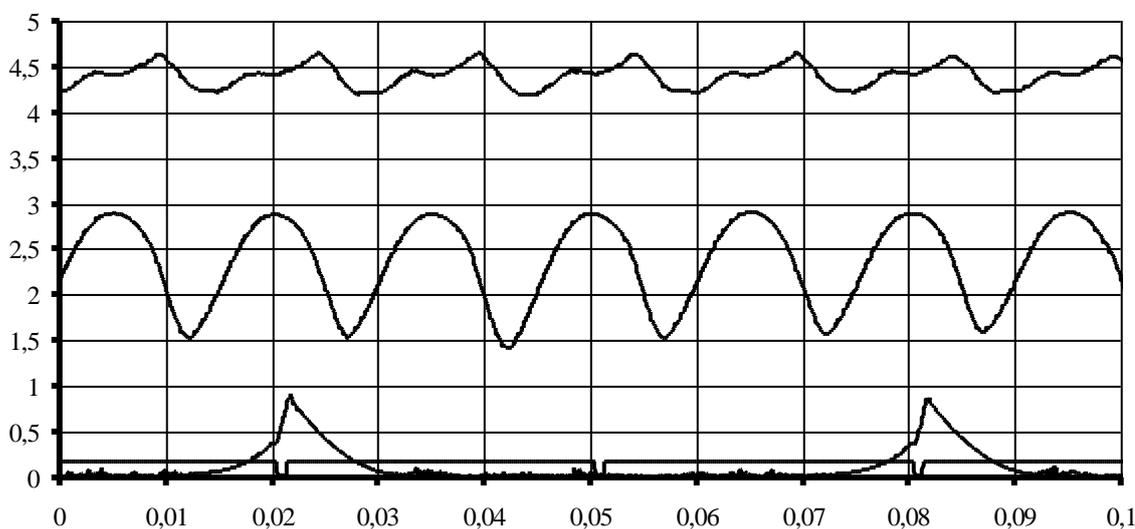
Частота вращения коленчатого вала  $n=2000 \text{ мин}^{-1}$



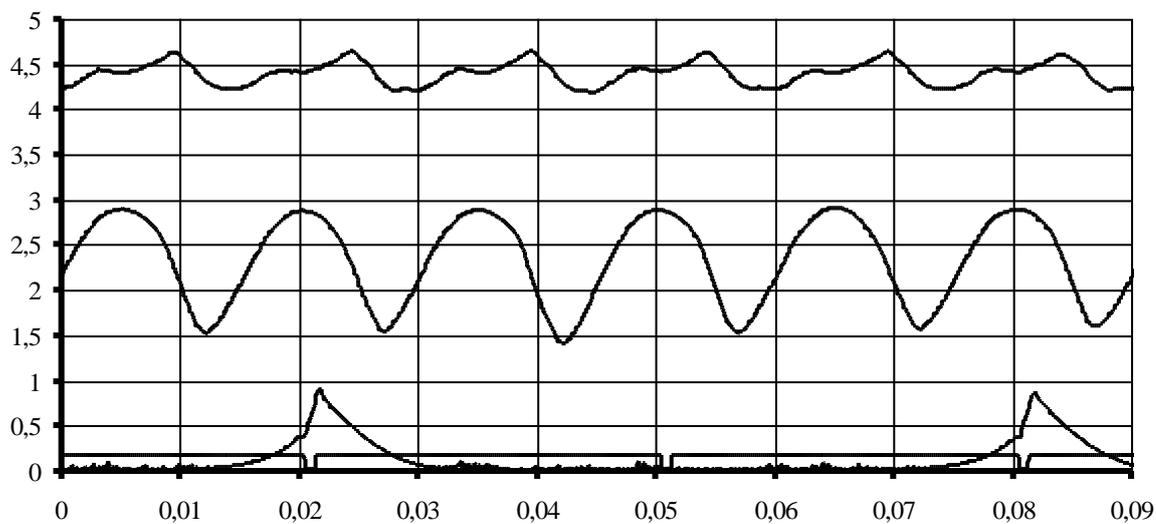
Частота вращения коленчатого вала  $n=2200 \text{ мин}^{-1}$



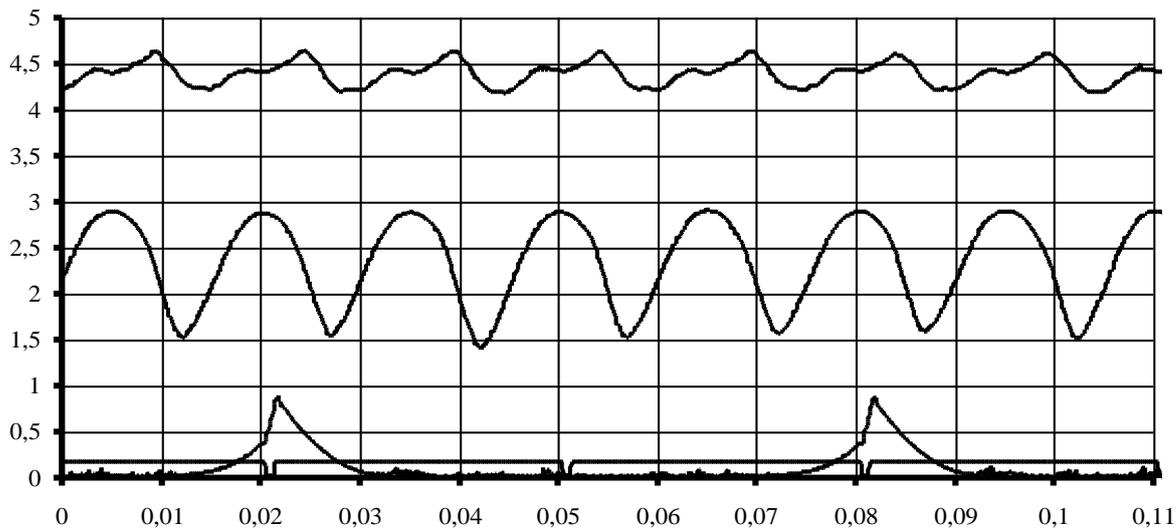
Частота вращения коленчатого вала  $n=2500 \text{ мин}^{-1}$



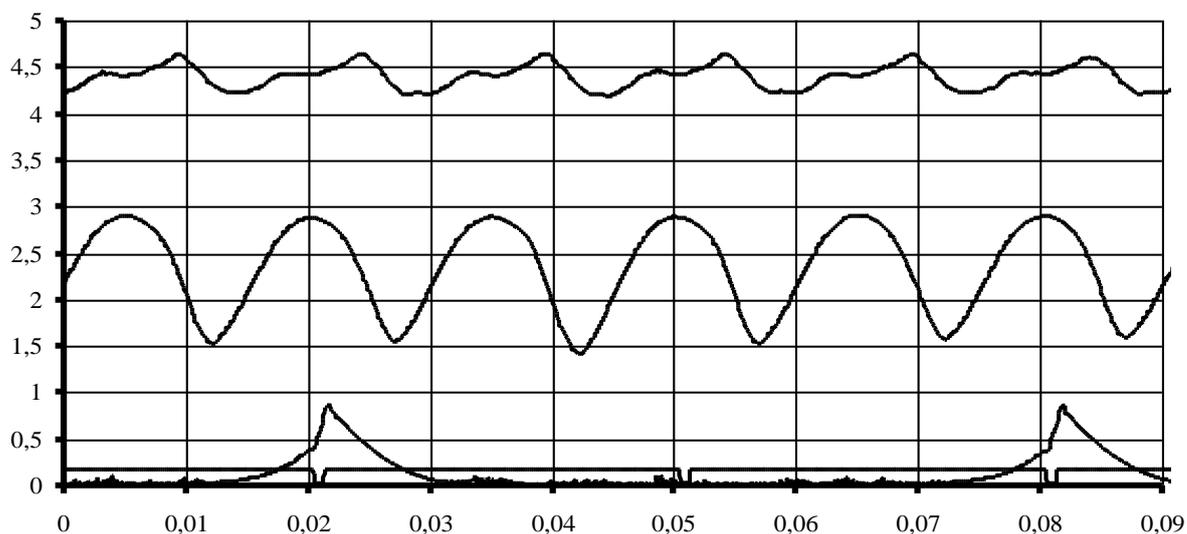
Частота вращения коленчатого вала  $n=2700 \text{ мин}^{-1}$



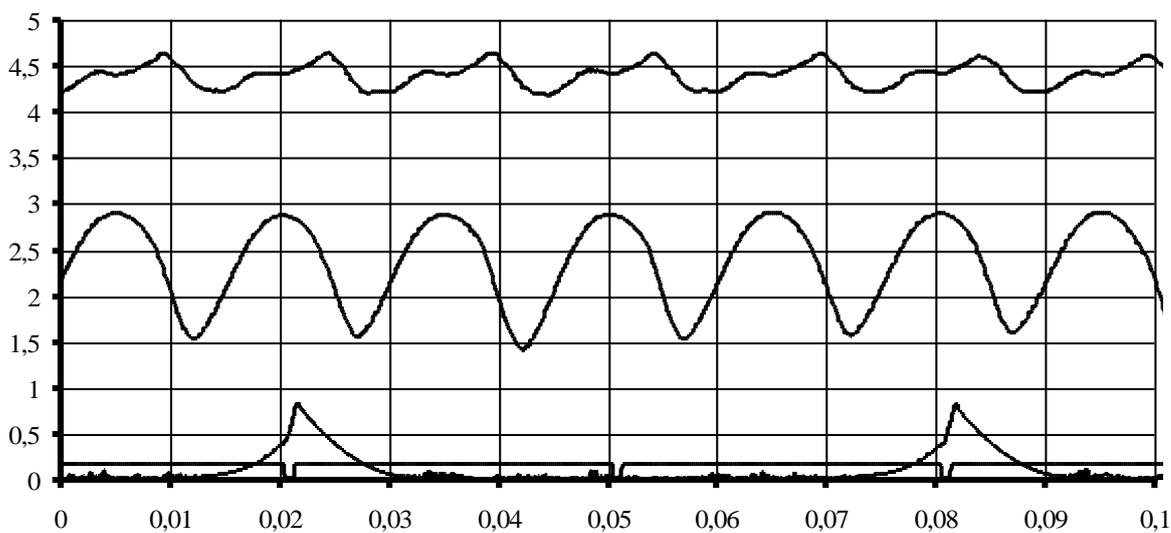
Частота вращения коленчатого вала  $n=3000 \text{ мин}^{-1}$



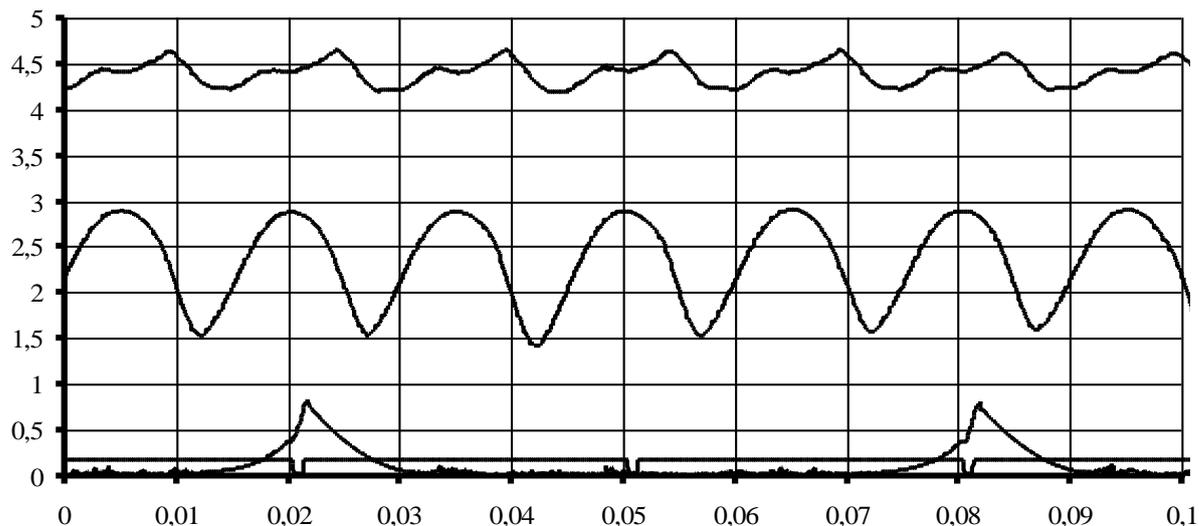
Частота вращения коленчатого вала  $n=3200 \text{ мин}^{-1}$



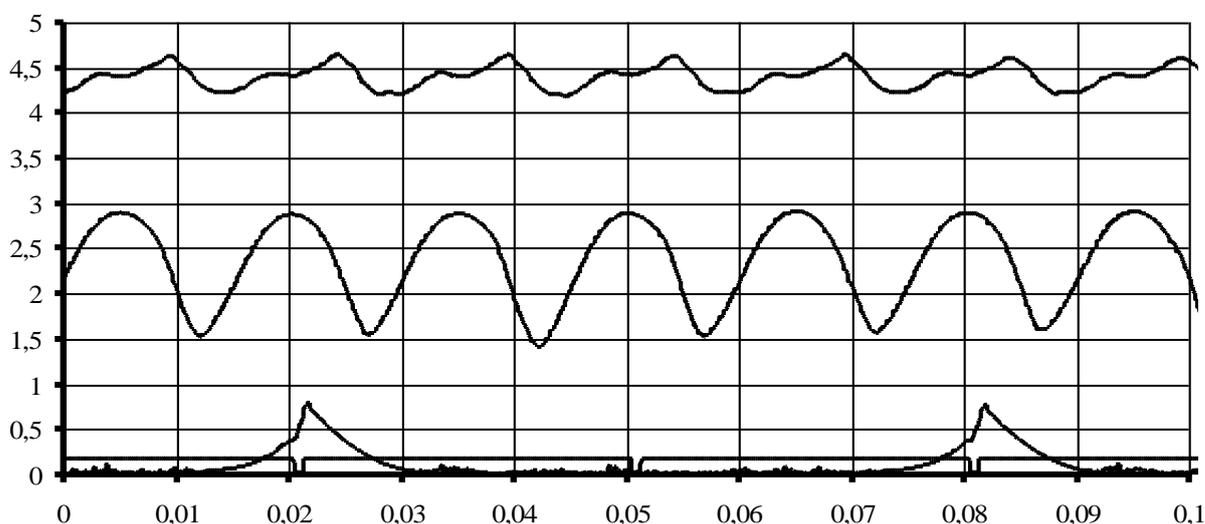
Частота вращения коленчатого вала  $n=3500 \text{ мин}^{-1}$



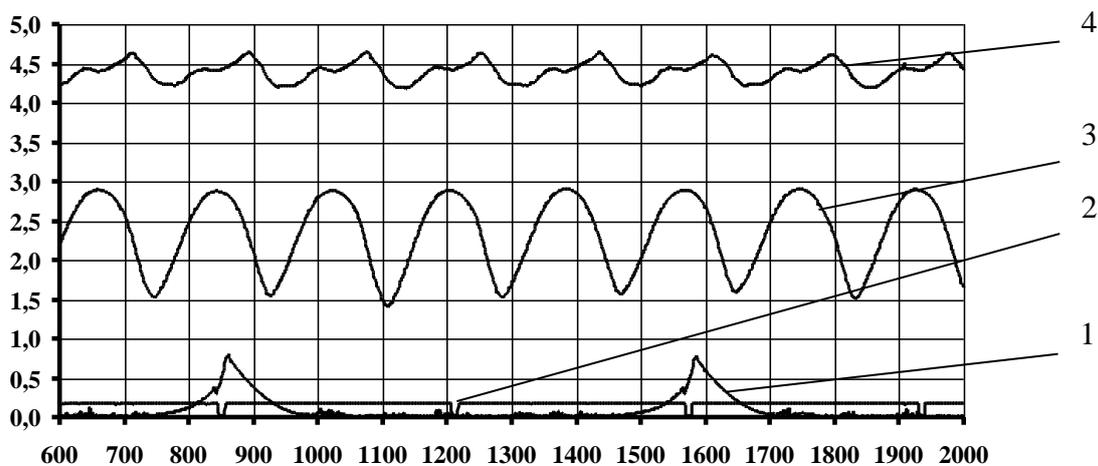
Частота вращения коленчатого вала  $n=3800 \text{ мин}^{-1}$



Частота вращения коленчатого вала  $n=4000 \text{ мин}^{-1}$



Частота вращения коленчатого вала  $n=4200 \text{ мин}^{-1}$



Индикаторная диаграмма карбюраторного двигателя оснащённого биметаллизированными гильзами:

1 - давление газов в цилиндре; 2 - отметчик верхней мёртвой точки и зубьев маховика; 3 - массовый расход воздуха; 4 - разрежение

Зависимость износа  $I$  гильз цилиндров от пробега  $L$ 

Износ $I$ , мкм	Пробег $L$ , км					
	3200	6400	9600	12800	16000	19200
Типовая ГЦ	28	40	44	47	49	51
Бим-ая ГЦ	12	15	16	17	18	19

Изменение давления  $P$  в камере сгорания от пробега  $L$ 

Давление $P$ , МПа	Пробег $L$ , км						
	0	3200	6400	9600	12800	16000	19200
Типовая ГЦ	1,05	1,05	1,04	1,04	1,03	1,02	1
Бим-ая ГЦ	1,05	1,07	1,08	1,08	1,08	1,08	1,07

Путевой расход топлива автомобиля УАЗ-3303, оснащённого типовым и экспериментальным двигателем

Двигатель УМЗ-417, оснащенный типовыми гильзами цилиндров

Скорость, км/ч	Расход топлива, л на 1000 м			
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_{CP}$
50	0,165	0,166	0,165	0,165
60	0,162	0,161	0,161	0,161
70	0,159	0,158	0,159	0,159
80	0,157	0,157	0,157	0,157
90	0,162	0,158	0,160	0,160
100	0,171	0,170	0,168	0,169

Двигатель УМЗ-417, оснащенный биметаллизированными медью гильзами цилиндров

Скорость, км/ч	Расход топлива, л на 1000 м			
	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$m_{CP}$
50	0,160	0,159	0,159	0,159
60	0,156	0,157	0,156	0,156
70	0,155	0,152	0,152	0,153
80	0,150	0,151	0,151	0,151
90	0,154	0,154	0,154	0,154
100	0,161	0,160	0,162	0,161

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	6
1.1 Анализ факторов, влияющих на износостойкость гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.....	6
1.2 Анализ существующих способов восстановления гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.....	15
1.3 Пути повышения износостойкости гильз цилиндров двигателей внутреннего сгорания.....	24
1.4 Выводы.....	33
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ИЗНОСА БИМЕТАЛ- ЛИЗАЦИЕЙ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНД- РОВ.....	34
2.1 Теория взаимодействия трущихся поверхностей при внешнем трении...	34
2.2 Теоретическое обоснование применения различных цветных металлов для снижения износа деталей ЦПГ.....	36
2.3 Теоретическое обоснование снижения износа за счёт вставок из цветного металла.....	39
2.4 Теоретическое обоснование формы, геометрических размеров и количества кольцевых канавок на рабочей поверхности трения гильзы цилиндров.....	45
Выводы.....	54
3 КОНСТРУКТИВНЫЙ ВАРИАНТ ИСПОЛНЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЗИРОВАННОЙ МЕДЬЮ ГИЛЬЗЫ ЦИЛИНДРОВ.....	55
3.1 Конструкция биметаллизированной гильзы цилиндров и работа пары трения «поршневое кольцо – гильза».....	55
3.2 Технологический процесс изготовления биметаллизированной медью гильзы цилиндров.....	57
Выводы.....	63

4 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	64
4.1 Программа экспериментальных исследований.....	64
4.2 Методика лабораторных исследований.....	64
4.2.1 Методика определения температуры поверхностей трения и смазочного материала.....	64
4.2.2 Методика исследования износа рабочей поверхности образцов на машине трения СМТ-1.....	65
4.2.3 Методика определения износа опытных образцов и гильзы цилиндра весовым методом.....	71
4.2.4 Методика определения элементного состава поверхности трения опытных образцов.....	72
4.2.5 Методика определения шероховатости опытных образцов.....	73
4.2.6 Методика микрометража гильзы цилиндров.....	74
4.2.7 Методика ускоренных лабораторных испытаний гильз цилиндров на износостойкость .....	77
4.3 Методика стендовых исследований.....	79
4.3.1 Оборудование и приборное обеспечение.....	79
4.3.2 Методика измерения токсичности отработавших газов бензинового двигателя.....	85
4.3.3 Методика стендовых исследований бензинового двигателя при работе с типовой и биметаллизированной гильзой цилиндров.....	88
4.3.4 Обработка результатов стендовых исследований.....	90
4.4 Методика эксплуатационных исследований автомобилей, оснащённых двигателями с типовыми и биметаллизированными гильзами цилиндров....	91
Выводы.....	93
5 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ БИМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ТРЕНИЯ.....	95
5.1 Результаты лабораторных исследований биметаллизированных поверхностей трения.....	95

5.2 Результаты ускоренных лабораторных испытаний гильз цилиндров на износостойкость .....	102
5.3 Результаты сравнительных стендовых исследований двигателя УМЗ-417 в штатной комплектации и оснащённого биметаллизированными гильзами.....	103
5.4 Результаты эксплуатационных исследований автомобилей УАЗ-3303, оснащённых двигателями в штатной и экспериментальной комплектации.....	109
Выводы .....	112
6 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОМОБИЛЯ УАЗ 3303 С ДВИГАТЕЛЕМ, ОСНАЩЁННЫМ БИМЕТАЛЛИЗИРОВАННЫМИ ГИЛЬЗАМИ ЦИЛИНДРОВ.....	114
Выводы.....	120
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ.....	121
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	123
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	142
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	145
ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	156

Салахутдинов Ильмас Рифкатович

Хохлов Алексей Леонидович

**ПОВЫШЕНИЕ ИЗНОСОСТОЙКОСТИ ГИЛЬЗ ЦИЛИНДРОВ БЕНЗИ-  
НОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ БИМЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ  
РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРЕНИЯ**

(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 № 404

Издательство Ульяновской ГСХА  
432017, г. Ульяновск, б-р Новый Венец, 1