

УДК 621.822.17

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УДАРНОГО НАГРУЖЕНИЯ
МАСЛЯНОГО СЛОЯ С ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ
ПОДШИПНИКА СКОЛЬЖЕНИЯ**

А.В. Разуваев, И.О. Кудашева, М.С. Губатенко, Д.А. Костин

Исследован процесс динамически ударного нагружения в масляном слое с поверхностно-активными веществами (ПАВ) подшипника скольжения. Рассмотрен вопрос применения ПАВ на рабочих поверхностях подшипника скольжения и шейки коленчатого вала. Описано влияние применения ПАВ на эксплуатационную надежность подшипников скольжения форсированных дизелей. Приведены результаты экспериментальных исследований гидродинамики подшипника скольжения при применении смазочного масла с ПАВ в форсированных дизелях.

Ключевые слова: подшипник скольжения; гидродинамические колебания; поверхностно-активные вещества; масляная пленка; коэффициент динамичности; эксплуатационная надежность.

**ҮСТҮРТӨН АКТИВДҮҮ ЗАТТАР МЕНЕН СЫЙГАЛАНМА ПОДШИПНИКТЕРДИ
МАЙ КАТМАРЫНА САЛУУНУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛДЫК ИЗИЛДӨӨ**

А.В. Разуваев, И.О. Кудашева, М.С. Губатенко, Д.А. Костин

Бул макалада үстүртөн активдүү заттар менен сыйгаланма подшипниктерди май катмарына динамикалык салуу процесси изилденген. Үстүртөн активдүү заттарды сыйгаланма подшипниктин үстүңкү жумушчу бөлүгүндө жана муунак валдын моюнчасында колдонуу маселеси каралды. Үстүртөн активдүү заттарды колдонуунун тездетилген дизелдердин сыйгаланма подшипниктерини колдонуу бышыктыгына тийгизген таасири сүрөттөлгөн. Макалада тездетилген дизелдерде үстүртөн активдүү заттар менен майлоочу майды колдонууда сыйгаланма подшипниктердин гидродинамикасын эксперименталдык изилдөөнүн жыйынтыктары берилди.

Түйүндүү сөздөр: сыйгаланма подшипниктер; гидродинамикалык термелүүлөр; үстүртөн активдүү заттар; майдын жука катмары; динамикалуулук коэффициенти; колдонуудагы бышыктыгы.

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF DYNAMIC IMPACT LOADING
IN AN OIL LAYER WITH SURFACTANTS OF A SLIDING BEARING**

A. V. Razuvaev, I. O. Kudasheva, M. S. Gubatenko, D. A. Kostin

The article considers research of dynamic impact loading in an oil layer with surface-active substances of a sliding bearing. The question of the use of surface-active substances on the working surfaces of the sliding bearing and the crankshaft neck is considered. The influence of the use of surface-active substances on the operational reliability of the sliding bearings of forced diesels is described. The results of experimental research of the hydrodynamics of the sliding bearing when using oil with surface-active substances in forced diesel engines are presented.

Keywords: sliding bearing; hydrodynamic fluctuations; surface-active substances; oil layer; dynamic factor; operational reliability.

Повышение ресурсов машин – одно из актуальных направлений научных исследований, а практическая реализация полученных результатов – необходимое условие для поиска новых путей и подходов к ускорению работ в этой области [1, 2].

Особенностью работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) в составе дизель-генератора связано с тем, что этот двигатель должен работать постоянно на номинальных оборотах коленчатого вала, вне зависимости от нагрузки и обеспечивать при этом требуемую выработку частоты электрического тока – 50 Гц. При этом нагрузка на подшипники скольжения возникает от действия инерционных сил поршня ДВС.

При работе форсированных дизелей, в результате сгорания топлива, в подшипниках скольжения происходит возбуждение колебаний в связи с высокой скоростью нарастания давления, что, в свою очередь, вызывает гидродинамические колебания в масляном слое подшипника [3].

Задача повышения несущей способности подшипника скольжения путем снижения динамики нагружения в масляном слое (эффект П.А. Ребиндера) при сгорании топлива и предотвращения выдавливания смазочного материала с трущихся поверхностей, решается применением ПАВ, которые наносятся на рабочие трущиеся поверхности. Рассмотрим тонкостенный вкладыш подшипника скольжения с ПАВ [4], который содержит металлическую основу 1, антифрикционный слой 2 и прирабочный слой 3 (рисунок 1). Эти слои формируются путем нанесения на металлическую основу поверхностно-активного вещества 4 с рабочей стороны Е.

Поверхностно-активное вещество представляет собой смесь растворителя с активным веществом (композиционную консистентную смазку) или эмульгатор. При наличии на рабочей поверхности последнего в зоне трения, происходит сложный комплекс физико-химических процессов – пластификация поверхностных слоев материала сопрягаемых деталей и снижение сил трения в подшипниковом узле. При этом в процессе трения в масляном слое происходит разрушение макромолекул ПАВ, в местах трения образуется квазисжиженная антифрикционная сервовитная пленка. Сервовитная пленка обеспечивает увеличение демпфирующей способности масляного слоя и снижает динамичность нагружения (эффект П.А. Ребиндера). В экспериментальных исследованиях применяли эпиламирующий раствор во фторсодержащих растворителях – хладонах 112, 113, 114В2 или их смесях, как ПАВ, отечественные эмульгаторы 6СФК-180-0,5 (разработчик – ГИПХ, Санкт – Петербург) [5, 6].

Применение ПАВ позволяет сформировать защитную пленку в рабочей зоне трущихся поверхностей вкладыша подшипника скольжения и шейки коленчатого вала. Минеральные масла, выступающие в качестве смазочной жидкости в дизелях, также имеют ПАВ. Они образуются как следствие окисления (старения) масла. Сюда относятся спирты, органические кислоты и т. д. При контакте охлажденного масла с деталями двигателя, имеющем в своем составе медь, формируются органические соединения. Такие соединения имеют способность хорошо растворяться в масле. Однако присутствующие в масле ПАВ в недостаточной степени позволяют обеспечить снижение износа трущихся поверхностей. При этом применение дополнительных ПАВ в рабочей зоне трущихся поверхностей, в частности, на вкладышах подшипников скольжения, приводит к образованию устойчивой барьерной пленки, характеризующейся низким запасом поверхностной энергии. Продукты износа, покрытые медными частицами, также осаждаются в рабочей зоне трущихся поверхностей, где впоследствии образуется квазисжиженная антифрикционная металлическая пленка. Она обеспечивает повышенную демпфирующую способность, вследствие чего снижается динамичность нагружения в рабочей зоне рассматриваемого узла [7].

Экспериментальные исследования гидродинамики подшипника скольжения при применении смазочного масла с ПАВ проводили на дизеле ЧН21/21. Методика эксперимента включала в себя измерение толщины масляного слоя [8]. Оборудование, которое было использовано в исследованиях, приведено на рисунке 2. Структурная схема измерения толщины смазочного слоя во вкладыше шатунного подшипника скольжения приведена на рисунке 3.

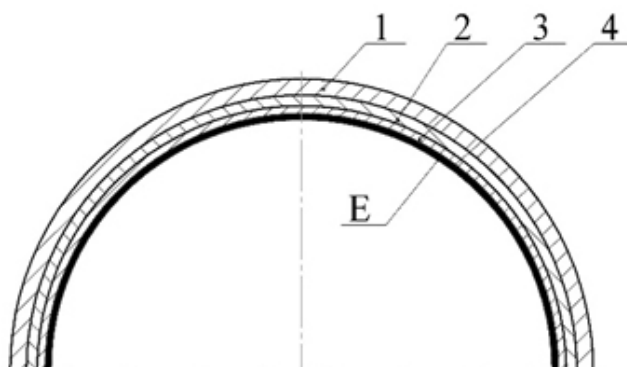


Рисунок 1 – Тонкостенный вкладыш подшипника скольжения с поверхностно-активным веществом

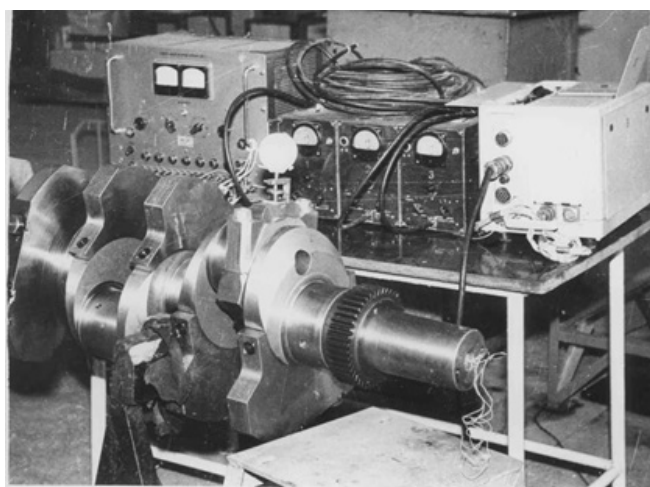


Рисунок 2 – Оборудование для исследования гидродинамики масляного слоя и траектории движения центра коленчатого вала транспортного дизеля

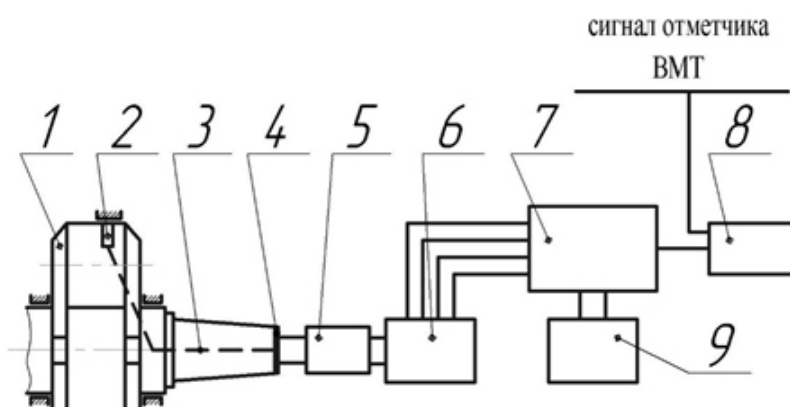


Рисунок 3 – Структурная схема измерения толщины смазочного слоя во вкладыше шатунного подшипника скольжения

На этой схеме представлены емкостные датчики 2, которые встроены в коленчатый вал 1. Сигнал от датчиков 2 поступает по проводам 3, выведенных на ртутный токосъемник 6. Выводы проводов залиты эпоксидной смолой. С целью получения сигнала от измерительных датчиков к контактам ротора двенадцатиканального ртутного токосъемника 6 марки ТРАК-12 припаивали провода, выходящие с носка коленчатого вала через переходники 4 и упругую муфту 5, представляющую собой резиновый рукав, армированный кордом. Переходники позволяют защитить провода от скручивания, упругая муфта выполняет функцию компенсации несоосности и перекосов осей вала ртутного токосъемника. Далее сигнал от измерительных датчиков со статора токосъемника поступал на ПТМП-3-55 (измеритель толщины масляного слоя 7). Регистрацию поступающих сигналов осуществляли на осциллографе 8 (Н-155). Питание схемы обеспечивалось от универсального источника питания типа УИП-1. На рисунке 4 представлена схема емкостного датчика.

Электрод 1 электроизолирован от шейки вала корундовой втулкой 2, коническая головка электрода и гайка 3 фиксируют его во втулке. Датчик устанавливали в резьбовое отверстие в шейке вала и зажимали гайкой 4 с моментом затяжки 50 Нм (дополнительно резьбу датчиков смазывали полимерным клеем СЭДМ – 8 с выдержкой при температуре 473К (200 °С) в течение 2-х часов). Наружная поверхность датчика выполняла роль подвижной обкладки конденсатора, неподвижной обкладкой являлся противолежащий к датчику участок вкладыша. Диаметр электрода на поверхности вала составлял 3 мм.

Для контроля толщины масляного слоя в различных зонах устанавливали несколько емкостных датчиков. Датчик Д1 располагали в зоне преобладающего действия инерционных нагрузок. Датчик Д2 проводил измерения в зоне действия максимального давления сгорания (рисунок 5).

В качестве основного измеряемого параметра рассматривали емкость датчиков, которая варьировалась в зависимости от толщины слоя диэлектрика. В качестве диэлектрического слоя выступала толщина масляного слоя. Сигнал от датчиков попадал на усилитель ПТМП-3-55 (работа по схеме частотной модуляции). Датчики включались в контур генератора высокочастотных колебаний. Изменение параметра емкости датчика приводило к изменению частоты генерируемого напряжения. Диапазон измерения такой экспериментальной установки варьировался от долей микрона до предела в 250 мкм. Экспериментальные исследования проводили с разделением на интервалы до 30 мкм. Однако емкостные датчики имеют нелинейную параболическую характеристику, что при достаточно больших измеряемых величинах (показания толщины масляной пленки) соответствует показаниям малой емкости, характеристика датчика имеет низкую кривизну. В связи с этим, максимальному отклонению при измерении показаний датчиков соответствует самая малая толщина масляного слоя h_{min} . Динамическое значение этой величины оценивается зависимостью:

$$h_{min} = K_d \cdot h_{min \text{ стат}},$$

где $h_{min \text{ стат}}$ – квазистатическая составляющая минимальной толщины масляного слоя; K_d – коэффициент динамичности нагрузки.

Результаты исследований гидродинамики шатунного подшипника скольжения форсированного дизеля ЧН21/21 путём измерения толщины масляного слоя, представлены на рисунках 6 и 7 [1, 3].

Анализ результатов измерений показал, что воздействие ударной возмущающей силы приводит к появлению гидродинамических колебаний 1 в том случае, если используется смазочное масло без ПАВ. Коэффициент динамичности в этом случае $K_d = 1,2$. Но при нанесении эмульгатора (ПАВ) на рабочую зону трущихся поверхностей (вкладыш подшипника скольжения шатунной шейки коленчатого вала) гидродинамические колебания в масляном слое отсутствуют и $K_d = 1,0$ [9].

Результат анализа осциллограмм гидродинамических колебаний позволяет сделать вывод, что коэффициент динамичности K_d вкладыша подшипника скольжения при условии применения смазочных материалов с ПАВ, уменьшается с 1,18 до 1,0, а коэффициент трения на рабочих поверхностях подшипника скольжения стремится к минимуму. Этому способствует формирование на трущихся поверхностях шейки коленчатого вала и вкладыша тонких демфирующих пленок из состава ПАВ. В образованном масляном слое на рабочих трущихся поверхностях колебательный процесс полностью

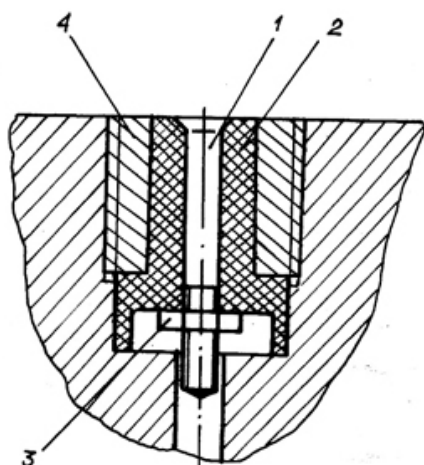


Рисунок 4 – Конструкция емкостного датчика

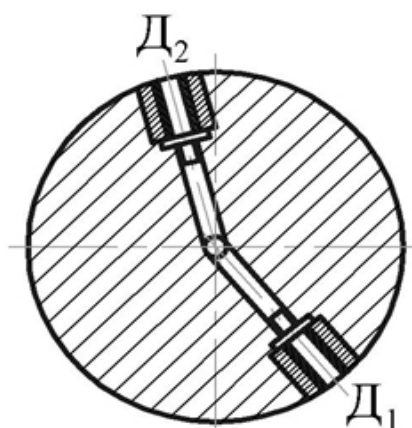


Рисунок 5 – Расположение емкостных датчиков в шатунной шейке коленчатого вала

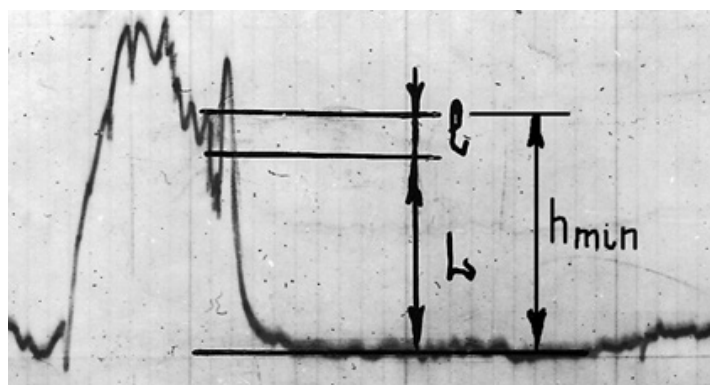


Рисунок 6 – Осциллограмма изменения емкости датчика зазора по углу поворота коленчатого вала – импульс, полученный при действии силы давления газов в шатунном подшипнике без покрытия ПАВ

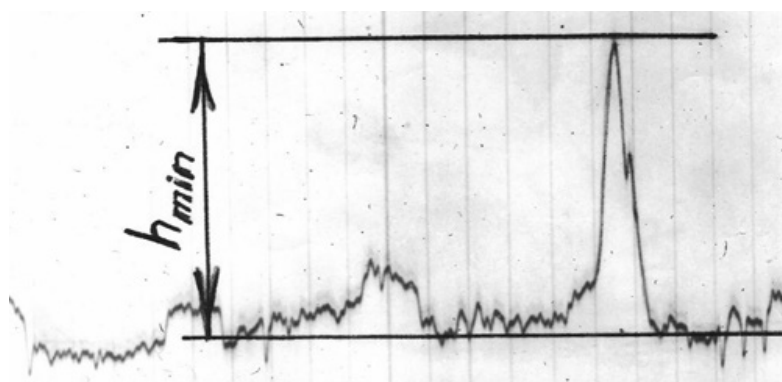


Рисунок 7 – Осциллограмма изменения емкости датчика зазора по углу поворота коленчатого вала – импульс, полученный при действии силы давления газов в шатунном подшипнике с использованием ПАВ

демпфируется. Однако после определенного числа циклов динамического ударного нагружения трущихся поверхностей шейки коленчатого вала и вкладыша подшипника, из зоны трения уносится тонкая износостойкая пленка. При этом одновременно формируется новый промежуточный антифрикционный слой [8].

Результаты исследования применения ПАВ на рабочих поверхностях вкладышей подшипников скольжения при работе дизельного двигателя позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Применение ПАВ, нанесенного на рабочую поверхность вкладыша подшипника скольжения, позволяет снизить динамику ударного нагружения масляного слоя, и как следствие, повысить несущую способность и эксплуатационную надежность подшипника скольжения форсированного дизеля.

2. За счет резкого снижения гидродинамических колебаний, вызванных ударной возмущающей силой, как следствие повышенной демпфирующей способности поверхностного слоя (применение ПАВ) в рабочей зоне, уменьшается выдавливание смазочного материала из зоны трения.

3. Обоснованное применение ПАВ в рабочей зоне трущихся поверхностей форсированного дизеля в целом позволит повысить эксплуатационную надежность его отдельных узлов.

Литература

1. Харламов Ю.А. Физика, химия и механика поверхностей твердого тела / Ю.А. Харламов, Н.А. Будагянц. Луганск, 2000. 624 с.
2. К теории масляного слоя в динамически нагруженном подшипнике / С.Г. Каратышкин // В кн.: Трение и износ в машинах. М.: Изд-во АН, 1958. С. 163–180.
3. Кудашева И.О. Динамика нагружения как критерий оценки эффекта П.А. Ребиндера в подшипниках скольжения транспортных дизелей / И.О. Кудашева, Н.Л. Марьина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 10 (94). С. 12–14.
4. А.с. 1530847 СССР, МКИ F16C 17/C2. Тонкостенный вкладыш подшипника скольжения высокофорсированного дизеля / С.П. Косырев, В.Г. Кочуженко, В.М. Гребнев. СССР. № 4341435/25-27. Заявлено 09.12.87. Опубл. 23.12.89. Бюл. № 4. 4 с.
5. Кобзев Р.А. Математическая модель проявления эффекта П.А. Ребиндера в масляном слое с поверхностно-активными веществами подшипника скольжения форсированного дизеля / Р.А. Кобзев, И.О. Кудашева, Д.С. Мамаев // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10-2. С. 258–261.
6. Кудашева И.О. Экспериментальная оценка гидродинамики масляного слоя в узлах трения «Прецизионная деталь-направляющая втулка» / И.О. Кудашева // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2010. № 10. С. 20–23.
7. Тополянский П.А. Выбор тонкопленочных покрытий для упрочнения изделий / П.А. Тополянский, С.А. Ермаков, А.П. Тополянский // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: матер. межд. научно-практич. конф. / Санкт-Петербургский политехн. ун-т им. Петра Великого. СПб., 2016. С. 194–205.
8. Косырев С.П. Эффект П.А. Ребиндера в подшипниках скольжения комбинированных форсированных дизелей / С.П. Косырев // Двигателестроение. 2010. № 1. С. 20–23.
9. Патент 2028594 Россия, МКИ G 01 M 15/00. Способ измерения толщины масляного слоя шатунного подшипника двигателя внутреннего сгорания / С.П. Косырев, В.М. Гребнев. № 4914621. Заявлено 25.01.91. Опубл. 09.02.95, Бюл. № 4. 4 с.