

00424) и государственного задания Минобрнауки РФ (проект №2012044 – Г3 05).

Newtonian Dynamically Loaded Journal Bearings in Mixed Lubrication for Direct Problem / Zhang Chao // Transactions of the ASME. – 2002. – Vol. 124. – P. 178–185.

Список литературы:

1. Прокопьев В. Н. Термогидродинамическая задача смазки сложнагруженных опор скольжения неньютоновскими жидкостями / В.Н. Прокопьев, В.Г. Караваяев // Вестник ЮУрГУ.- Челябинск. – 2003. – №1[17]. – С. 55–66. 2. Прокопьев В.Н. Применение алгоритмов сохранения массы при расчете гидродинамических давлений в смазочных слоях опор скольжения / В.Н. Прокопьев, А.К. Бояришнова, К.В. Гаврилов // Наука и технологии. Труды XXII Российской школы, Миасс – 2002. – С.164–176. 3. Elrod, H.G. Efficient Numerical Method for Computation of Termohydrodynamics of Laminar Lubricating Films / ASME Journal of Tribology. – 1991. – vol 113. – P. 506–511. 4. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский // М.:Наука, 1973. – 847с. 5. Paranjpe, R.S. Analysis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finite Journal Bearings Including Mass Conserving Cavitation / R.S. Paranjpe // ASME Journal of Tribology. – 1992. – Vol. 114. – P. 736–744. 6. Chao Zhang. TEHD Behavior of Non-

Bibliography (transliterated):

1. Prokop'ev V. N. Termogidrodinamicheskaja zadacha smazki slozhnonagruzhennyh opor skol'zhenija nen'juto-novskimi zhidkostjami / V.N. Prokop'ev, V.G. Karavaev // Vestnik JuUrGU.-Cheljabinsk. – 2003. – №1[17]. – С. 55–66. 2. Prokop'ev V.N. Primenenie algoritmov sohrane-nija massy pri raschete gidrodinamicheskikh davlenij v smazochnyh slojah opor skol'zhenija / V.N. Prokop'ev, A.K. Bojarshinova, K.V. Gavrilov // Nauka i tehnologii. Trudy XXII Rossijskoj shkoly, Miass – 2002. – S.164–176. 3. Elrod, H.G. Efficient Numerical Method for Computation of Termohydrodynamics of Laminar Lubricating Films / ASME Journal of Tribology. – 1991. – vol 113. – R. 506–511. 4. Loj-cjanskij L. G. Mehanika zhidkosti i gaza / L.G. Loj-cjanskij // M.:Nauka, 1973. – 847с. 5. Paranjpe, R.S. Anal-isis of Non-Newtonian Effects in Dynamically Loaded Finite Journal Bearings Including Mass Conserving Cavitation / R.S. Paranjpe // ASME Journal of Tribology. – 1992. – Vol. 114. – R. 736–744. 6. Chao Zhang. TEHD Behavior of Non-Newtonian Dynamically Loaded Journal Bearings in Mixed Lubrication for Direct Problem / Zhang Chao // Transactions of the ASME. – 2002. – Vol. 124. – R. 178–185.

УДК 621.436

И.Н. Москаленко, асп., В.Н. Доценко, д-р техн. наук, А.В. Белогуб, д-р техн. наук, В.А. Байков, инж.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИНАМИКИ ПОРШНЯ ДВС

Введение

Увеличение мощности и быстроходности современных ДВС влечет за собой повышение динамической нагруженности узлов трения кривошипно-шатунного механизма. Это придает все большую актуальность вопросам оптимизации при проектировании деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ), так как эффективные и ресурсные показатели двигателя в значительной степени определяются совершенством именно узлов трения. Серьезной задачей, в частности, является создание энергосберегающего сопряжения «поршень-цилиндр», обладающего минимальными механическими потерями и работающего, преимущественно, в условиях жидкостного трения. Решение такой задачи сопряжено с оптимизацией профиля боковой поверхности юбки поршня, исследованиями динамической нагруженности пары «поршень-цилиндр» и процессов трения.

Несмотря на то, что в настоящее время существуют методики и программы, позволяющие с достаточной точностью в целом описывать динамику поршня, такие явления как перекадка и переходные процессы при изменении режимов трения в ЦПГ плохо поддаются теоретическому опи-

санию[1,2]. Поэтому для исследования быстротекущих процессов перекадки, выявления вероятных пятен контакта, оценки нагруженности пары и верификации математических моделей необходимо проведение широких экспериментальных исследований.

Формулирование проблемы

Проблема экспериментального исследования динамики поршня обусловлена тем, что он совершает сложное плоско-параллельное движение, которое характеризуется практически мгновенным изменением динамических и кинематических параметров, и отличается существенной их неравномерностью в пределах цикла. Одновременно с этим, такое движение происходит в пределах «замкнутого» пространства цилиндра, что накладывает ограничение на возможность проведения прямых измерений параметров этого движения. Поэтому, для практического исследования таких процессов, помимо выбора и применения сложных измерительных систем, необходимо проведение комплекса работ, связанного с задачами интеграции чувствительных элементов в состав двигателя. Особая сложность такой интеграции заключается в

том, что измерительная система должна оказывать незначительное влияние на исследуемые процессы.

Таким образом, целью настоящей работы является экспериментальное измерение зазоров между поршнем и цилиндром на различных режимах работы двигателя.

Объект исследований

Объектом исследований выбрана цилиндро-поршневая группа серийного двигателя ВАЗ 21083. Двигатель ВАЗ-21083 в штатном исполнении четырехтактный, бензиновый, карбюраторный с рабочим объемом 1,5 л, степенью сжатия 9,9. Номинальная мощность двигателя 51,5 кВт при частоте вращения коленчатого вала 5600 мин⁻¹; максимальный крутящий момент 106,4 Нм при $n = 3400$ мин⁻¹ [3].

Эксперимент проводился на двигателе, укомплектованном серийными поршнями производства ПАО «АВТРАМАТ».

Испытательный моторный стенд

Экспериментальные исследования динамики поршня проводились на базе испытательного моторного стенда ПАО «АВТРАМАТ».

Моторный стенд состоит из нагрузочного устройства, системы подачи топлива, системы выпуска отработавших газов, водяной и воздушной систем охлаждения, органов управления и измерительной аппаратуры. Общий вид моторного стенда с установленным двигателем ВАЗ 21083 приведен на рис. 1.

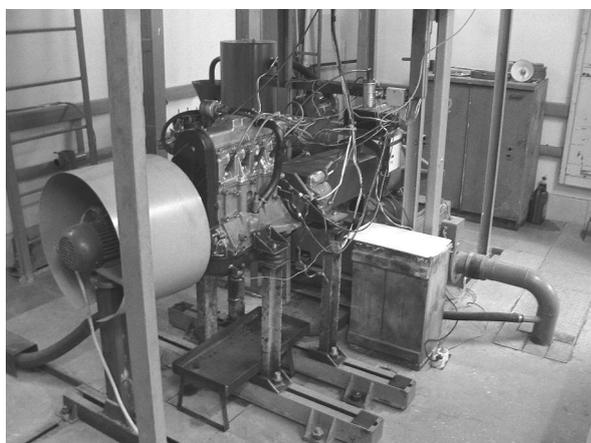


Рис. 1. Моторный стенд ПАО «АВТРАМАТ»

Измерительная аппаратура стенда соответствует ГОСТ 14846-81 и представлена следующими штатными средствами контрольно-измерительной техники:

- гидравлический динамометр SCHENK DYNABAR D630-1E – измерение крутящего момента на выходном валу;
- частотомер ЧЗ-54 – измерение частоты вращения коленчатого вала;
- штихпробер – измерение расхода топлива объемным способом;
- многоканальный цифровой термометр (термопары ХК, ХА) – измерение температур масла в картере, температур охлаждающей жидкости, температуры отработавших газов;
- манометр МО – измерение давления масла в системе смазки;
- и др.

Кроме этого, помимо штатных измерительных систем, в состав моторного стенда была включена измерительная система малых перемещений поршня (ИСМП) авторской разработки. Предложенная ИСМП позволяет экспериментально получать кинематические параметры сложного плоскопараллельного движения поршня в пределах цилиндра – зазоры, непосредственно в процессе работы двигателя. В состав ИСМП входят вихретоковые бесконтактные датчики, датчик температуры (термопара ХА), многоканальный блок-усилитель и аналогово-цифровой преобразователь. Общий вид ИСМП, находящейся в составе моторного стенда, представлен на рис. 2.



Рис. 2. Блок-усилитель ИСМП в составе моторного стенда

Препарировка двигателя

В качестве объекта препарировки был выбран 4-ый цилиндр двигателя. Этот выбор обоснован конструктивными особенностями блока цилиндров ВАЗ 21083 и удобством доступа к возможным местам установки датчиков.

Необходимое количество вихрековых датчиков и места их расположения на двигателе определялись с точки зрения максимизации времени электромагнитного контакта поршня, одновременно с как минимум двумя датчиками. Кроме этого, особое внимание уделялось конфигурации расположения датчиков, устанавливаемых в окрестностях «мертвых» точек, т.к. наибольший интерес при экспериментальных исследованиях представляли динамические процессы перекадки поршня. Таким образом, была разработана схема препарировки двигателя, показанная на рис. 3. Согласно схеме, пять вихрековых датчиков были установлены диаметрально в поперечной плоскости 4-го цилиндра на различных высотах по ходу движения поршня. Термопара №2 ИСМП, ориентированная на измерение температуры масла в зазоре между поршнем и цилиндром, также была установлена в поперечной плоскости цилиндра симметрично вихрековому датчику №5.

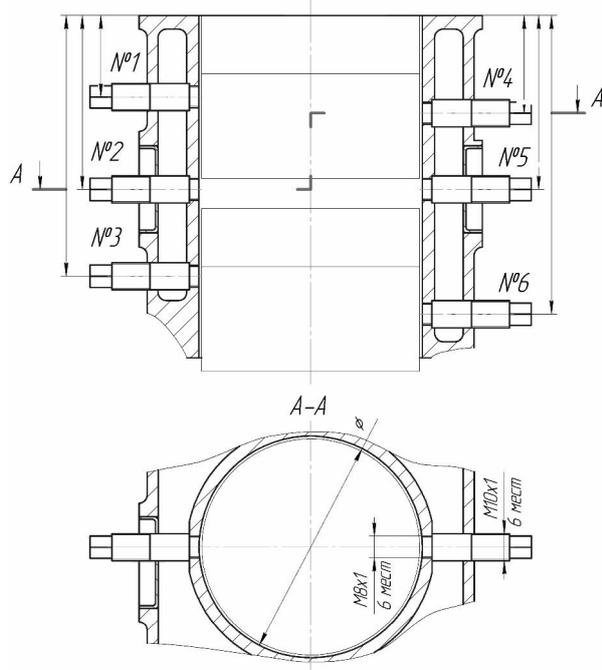


Рис. 3. Схема препарировки 4-го цилиндра

Совместно с задачей выбора мест препарировки решались конструкторские и технологические задачи обеспечения надежности закрепления ЧЭ и герметизации рубашки охлаждения. Конструктивно все датчики ИСМП были соединены с

блоком цилиндров по резьбовым соединениям М8х1. Базирование датчиков в цилиндре осуществлялось относительно упорных буртов, выполненных на корпусах датчиков. Кроме этого, для однозначности позиционирования в цилиндре торцы каждого датчика подвергались предварительной обработке – приданию им цилиндрических форм поверхности. Прочность закрепления и герметичность полостей рубашки охлаждения достигались проклеиванием всех резьбовых соединений высокотемпературным клеем LOXEAL 59-30. Общие виды препарированного блока цилиндров двигателя ВАЗ 21083 представлены на рис. 4 и рис. 5.

Особое внимание после установки датчиков уделялось минимизации влияния препарировки на чистоту поверхности зеркала цилиндра. Для предотвращения нарушения исходной геометрии зеркала был предпринят ряд технологических мероприятий, включающий в себя операции предварительной подготовки корпусов датчиков, чистовую обработку торцов датчиков в составе двигателя и притирание зеркала препарированного цилиндра.

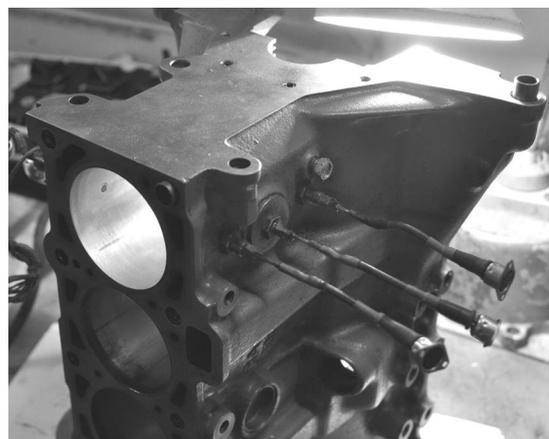


Рис. 4. Препарированный блок цилиндров ВАЗ 21083 (датчики №4, №5, №6)

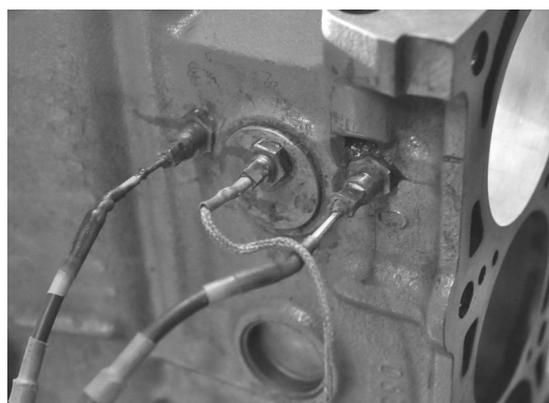


Рис. 5. Препарированный блок цилиндров ВАЗ 21083 (датчики №1, №2 термopара, №3)

Чистовая обработка торцов датчиков проводилась индустриальной пневматической бормашиной непосредственно на двигателе. Доводочная операция притирания зеркала цилиндра осуществлялась вручную алмазной пастой и специально разработанным чугунным притиром. Участки зеркала препарированного цилиндра в окрестностях мест установки датчиков представлены на рис. 6 и рис. 7.

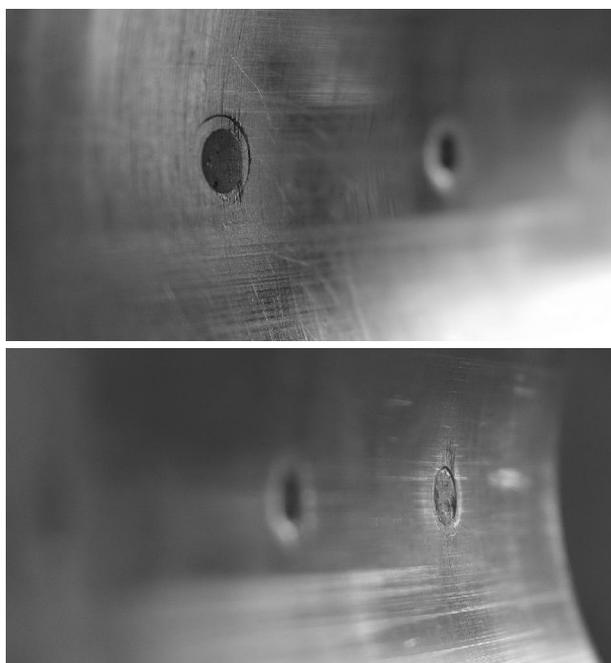


Рис. 6. Зеркало цилиндра в окрестностях датчиков №1 (сверху), датчика №3 (снизу)

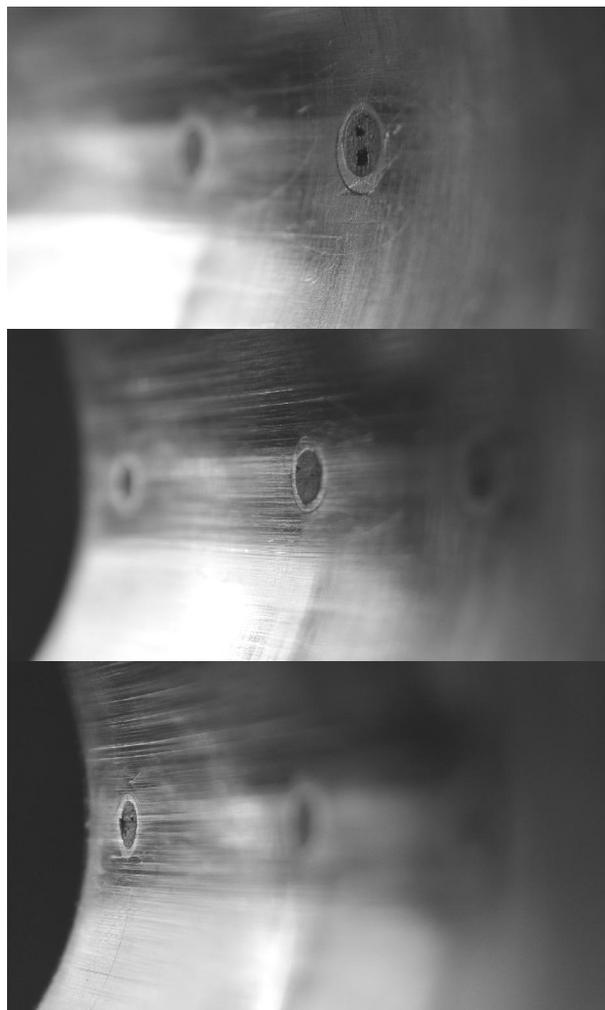


Рис. 7. Зеркало цилиндра в окрестностях датчиков №4 (сверху), датчика №5, датчика №6 (снизу)

Для оценки погрешностей, внесенных при препарировке, и определения размерной группы цилиндра осуществлен микрометраж исходного и препарированного цилиндров. Микрометраж проводился в пяти поясах по глубине цилиндра в поперечной и продольной его плоскостях. Результаты микрометража 4-го цилиндра приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты микрометража 4-го цилиндра

№ пояса	Глубина пояса, мм	Размеры исходного цилиндра, мм		Размеры препарированного цилиндра, мм	
		Поперечные	Продольные	Поперечные	Продольные
1	0	82,42	82,43	82,425	82,435
2	15	82,42	82,42	82,42	82,43
3	45	82,41	82,41	82,41	82,42
4	80	82,4	82,41	82,41	82,415
5	100	82,4	82,41	82,405	82,41

По результатам измерений установлено, что погрешность, внесенная при препарировке, составляет менее 0,05% и носит локальный характер. Помимо этого, в соответствии с размерной группой, подобран комплект серийных поршней и определена их масса.

Программа и методика исследований

Согласно разработанной программе подготовки к испытаниям собранный препарированный двигатель был установлен на моторном стенде и подключен к системе подачи топлива, системе охлаждения, выхлопной системе и измерительной аппаратуре. Система смазки двигателя была направлена полусинтетическим моторным маслом Esso 20W40. Осуществлена настройка системы зажигания. Выполнен пробный запуск и проверка работы двигателя на холостом ходу.

Основная программа проведения экспериментальных исследований предусматривала прогрев двигателя до температуры охлаждающей жидкости

75-85 °С и дальнейшую последовательную работу на установившихся режимах:

- $n_1 = 1100 \pm 150 \text{ мин}^{-1}$; $M_{кр1} = 0 \pm 5 \text{ Нм}$;
- $n_2 = 2000 \pm 150 \text{ мин}^{-1}$; $M_{кр2} = 40 \pm 5 \text{ Нм}$;
- $n_3 = 2500 \pm 150 \text{ мин}^{-1}$; $M_{кр3} = 25 \pm 5 \text{ Нм}$;
- $n_4 = 3000 \pm 150 \text{ мин}^{-1}$; $M_{кр4} = 50 \pm 5 \text{ Нм}$;
- $n_5 = 3500 \pm 150 \text{ мин}^{-1}$; $M_{кр5} = 60 \pm 5 \text{ Нм}$.

Время работы на каждом режиме определялось временем, затрачиваемым на регистрацию параметров, и составляло не менее 5 мин. После завершения работы на каждом режиме осуществлялся переход на режим холостого хода, $n_0 = 1000-1100 \text{ мин}^{-1}$.

На каждом рабочем режиме измерительными системами проводилась регистрация следующих параметров:

- крутящий момент на валу гидротормоза $M_{кр}$, Нм;
- частота вращения коленчатого вала n , мин^{-1} ;
- напряжение на выходе каждого канала ИСМП $V_{ИСМП}$, В;
- температура катушек индуктивности вихревых датчиков $T_{ИКТк}$, °С;
- ЭДС на термопаре ХА ИСМП $V_{ИКТМ}$, В;
- температура холодного спая термопары ХА ИСМП $T_{ТХС}$, °С.

Оцифровка сигналов осуществлялась высокоскоростным АЦП РЮ-821, находящимся в составе ЭВМ. Опрос каждого датчика ИСМП осуществлен с частотой не менее 150-160 кГц. Помимо этих из-

мерений проводился визуальный контроль параметров, характеризующих работу двигателя:

- температура охлаждающей жидкости $T_{бс}$, °С;
- температура масла $T_{м}$, °С;
- давление масла в системе смазки $P_{м}$, кгс/см^2 ;
- температура отработавших газов $T_{ог}$, °С.

Обработка результатов исследований

В результате проведения экспериментальных исследований на каждом режиме работы двигателя получены цифровые сигналы, однозначно связанные с соответствующими зазорами между поршнем и цилиндром. Предварительный анализ результатов исследований выявил, что помимо сигналов, генерируемых чувствительными элементами ИСМП, осциллограммы содержат также электромагнитные шумы, сетевые наводки и характеризуются достаточно широким спектром представленных частот (до 150 кГц). Осциллограммы необработанных сигналов ИСМП на режиме холостого хода (частота вращения коленчатого вала - $n_1 = 1098 \text{ мин}^{-1}$; крутящий момент $M_{кр1} = 5,3 \text{ Нм}$) представлены на рис. 8.

Для исключения шумов и помех из анализируемых сигналов при обработке результатов был применен цифровой фильтр Чебышева I-го рода. Отличительной особенностью такого фильтра является крутой спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и наличие характерных пульсаций на частотах полос пропускания. Величина верхней границы полосы пропускания составляла 100 Гц.

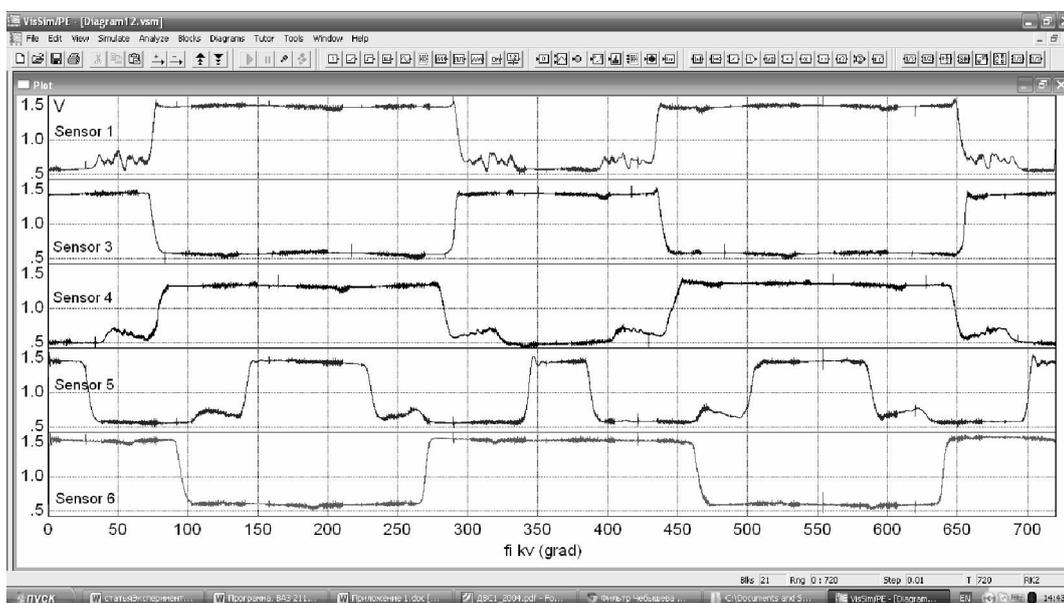


Рис. 8. Осциллограммы сигналов вихревых датчиков на режиме холостого хода

Совместно с этим, на основании известных статических характеристик ИСМП, проведена расшифровка сигналов от вихрековых датчиков с учетом температурного режима их работы. Таким образом, получены функции изменения зазоров

между поршнем и цилиндром на всех режимах, предусмотренных программой исследований. Величины зазоров на режиме холостого хода представлены на рис. 9.

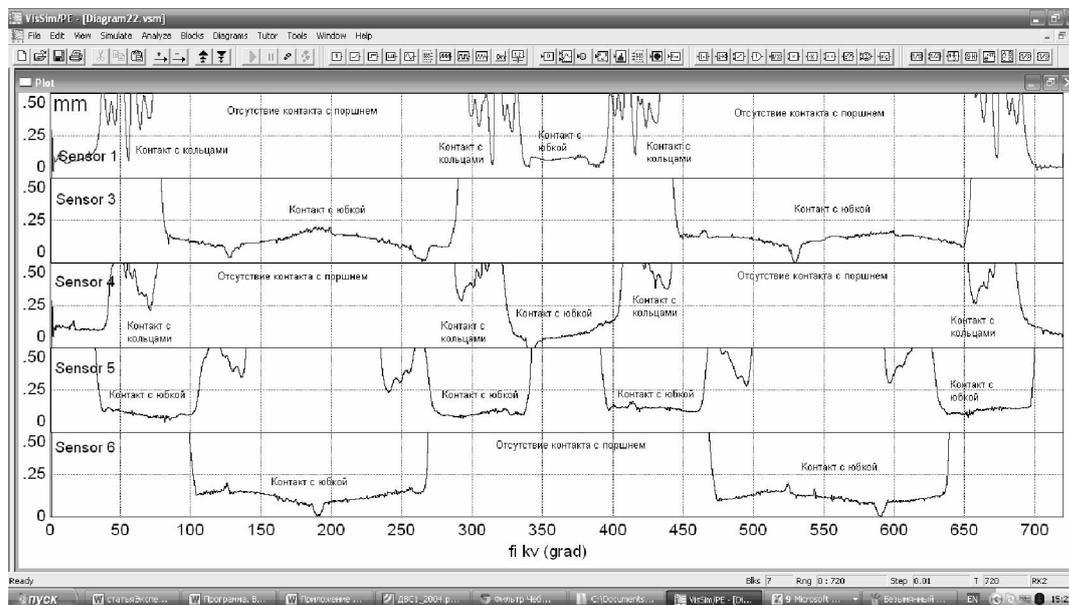


Рис. 9. Зазоры между поршнем и цилиндром на режиме холостого хода

Анализ полученных результатов позволяет достаточно четко выделить в сигналах участки, соответствующие электромагнитному контакту датчиков, как с юбкой поршня, так и поршневыми кольцами. Также установлено, что локальные зазоры между поршнем и датчиками №1 и №4 заметно меньше среднего уровня зазоров и составляют 0,06-0,08 мм. Этот факт свидетельствует о наличии перекосов поршня в окрестностях ВМТ.

Заключение

В результате экспериментальных исследований получены зазоры между поршнем и цилиндром в двигателе ВАЗ 21083 на различных режимах работы. Дальнейшие исследования будут направлены на выявление вероятных пятен контакта сопряжения «поршень-цилиндр», исследование процессов перекладки поршня и верификацию математических моделей. На основании этих работ предполагается разработка рекомендаций к оптимальному профилированию боковой поверхности юбки энергосберегающего поршня.

Список литературы:

1. Доценко, В.Н. Математическая модель движения поршня ДВС с учетом гидродинамических сил и момен-

тов, возникающих в смазочном слое между поршнем и цилиндром / В.Н. Доценко, И.Н. Москаленко // Двигатели внутреннего сгорания. – 2009. – № 2. – С. 57-59. 2. Рождественский, Ю.В. Современные конструкции поршней для тепловых двигателей: учеб. пособие / Ю.В. Рождественский, К.В. Гаврилов; Мин-во образования и науки Российской Федерации, Южно-Уральский гос. Университет. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2009. 3. Яметов, В.А. Руководство по ремонту, эксплуатации и обслуживанию. Автомобили ВАЗ-2108, ВАЗ-21081, ВАЗ-21083, ВАЗ-2109, ВАЗ-21091, ВАЗ-21093, ВАЗ-21099 [Текст]: Руководство по ремонту / В.А. Яметов, С.Н. Косарев, Л.А. Мельникова; – М.: РусьАвтокнига, 2002. – 384 с. 4. Испытания двигателей внутреннего сгорания: учеб. для вузов / И.Я. Райков. – М.: «Высш. школа», 1975. – 320 с.

Bibliography (transliterated):

1. Docenko, V.N. Matematicheskaja model' dvizhenija porshnja DVS s uchetom gidrodinamicheskikh sil i momen-tov, vznikajuvih v smazochnom sloe mezhdu porshnem i cilindrom / V.N. Docenko, I.N. Moskalenko // Dvigateli vnutrennego sgoranija. – 2009. – № 2. – S. 57-59. 2. Rozhdestvenskij, Ju.V. Sovremennye konstrukcii porshnej dlja teplovyh dvigatelej: ucheb. posobie / Ju.V. Rozhdestvenskij, K.V. Gavrilov; Min-vo obrazovanija i nauki Rossijskoj Federacii, Juzhno-Ural'skij gos. Univer-sitet. – Cheljabinsk: Izd-vo JuUrGU, 2009. 3. Jametov, V.A. Rukovodstvo po remontu, jekspluatcii i obsluzhi-vaniju. Avtomobili VAZ-2108, VAZ-21081, VAZ-21083, VAZ-2109, VAZ-21091, VAZ-21093, VAZ-21099 [Tekst]: Rukovodstvo po remontu / V.A. Jametov, S.N. Kosarev, L.A. Mel'nikova; – M.: Rus'Avtokniga, 2002. – 384 s. 4. Ispytanija dvigatelej vnutrennego sgoranija: ucheb. dlja vuzov / I.Ja. Rajkov. – M.: «Vyssh. shkola», 1975. – 320 s.