

## ИЗМЕРЕНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ШАТУННОМ ПОДШИПНИКЕ АВТОМОБИЛЬНОГО ДИЗЕЛЯ

В.Н. Никишин, к.т.н., С.В. Сибиряков  
Камская инженерно-экономическая академия (КамПИ)

Приведены сравнительные результаты измерений гидродинамического давления в шатунном подшипнике стандартными пьезоэлектрическим датчиком и разработанными мембранным и стержневым тензометрическими датчиками. Определены максимальные гидродинамические давления в шатунном подшипнике в зависимости от нагрузки на шатун.

Экспериментальные исследования параметров подшипников скольжения являются весьма сложными и проблемными, связанными с малой толщиной масляной пленки. Определение гидродинамического давления производится двумя методами — расчетным и экспериментальным. Проблема состоит в том, что имеются трудности в оценке достоверности обоих методов.

В работах [1–5] представлены результаты расчетов и экспериментов по гидродинамическому давлению в масляном слое. Так, например в работе [2] сравниваются данные расчета и эксперимента. Измеренное максимальное гидродинамическое давление по результатам эксперимента находится в пределах 50–117 МПа. При этом температура масла изменяется от 15 до 60 °С, а удельное давление от 14 до 28 МПа. Исследования, выполненные для дизеля DDAD серии 92 [5] показали, что расчетные значения максимального гидродинамического давления в масляном слое коренного подшипника находятся в пределах 179–349 МПа.

В работе [6] использовались проволочные датчики из манганина и изотана. Эти датчики реагируют не только на давление, но и на деформацию корпуса подшипника. Поэтому было необходимо фиксировать отдельным датчиком деформации постели подшипника и вычитать их. Процедура вычленения из смешанного сигнала полезного сигнала гидродинамического давления масляной пленки является весьма сложной. Максимальное гидродинамическое давление для коренного подшипника бензинового двигателя получено ниже 40 МПа.

В работе [3] для тракторного дизеля 8ЧВН15/16 (8ДВТ–330) ( $n_{ном} = 1700$  об/мин,  $p_{me} = 0,885$  МПа,  $p_{зmax} = 10,3$  МПа) получены экспериментальные

значения гидродинамического давления в шатунном подшипнике для вкладыша с канавкой 25 МПа, а без канавки  $\approx 45$  МПа. Расчетные значения максимального гидродинамического давления, определенные приблизительно для этого же дизеля [4], составили 240 МПа.

Для коренных опор [7] расчетные значения максимального гидродинамического равны 80–235 и 15–83 МПа в зависимости от номера коренной опоры.

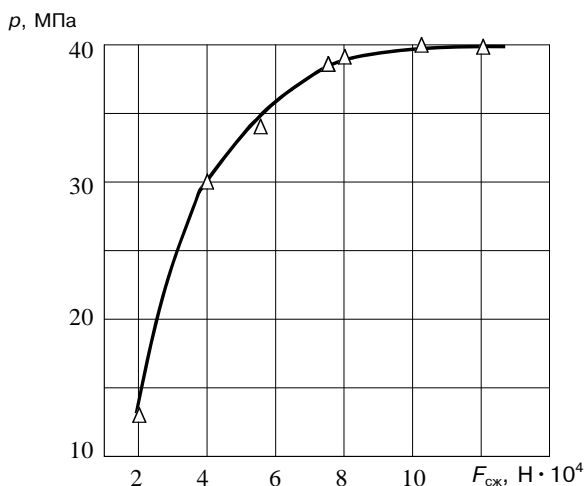
Таким образом, исходя из приведенных результатов расчетов и измерений, проблема определения гидродинамического давления в масляной пленке подшипников сохраняет актуальность и важность.

Для решения этой проблемы был апробирован стандартный пьезоэлектрический датчик и разработаны два новых метода измерений гидродинамического давления в масляном слое.

Измерение гидродинамического давления в шатунном подшипнике пьезоэлектрическим датчиком давления, проводилось на специальном безмоторном стенде. Для исследований использовался стандартный датчик 7QP2500a фирмы AVL. В кривошипной головке шатуна (КГШ) устанавливались два датчика по оси шатуна: вверху и внизу. Объем соединительного канала составил 14,13 мм<sup>3</sup>. На стержень шатуна наклеивался тензодатчик для измерения действующего усилия. Температура масла на входе в вал поддерживалась в диапазоне 90–91 °С. Частота вращения вала постоянная 1320 об/мин. Давление масла на входе в вал равнялось  $p_m = 0,51$  МПа.

В результате измерений на безмоторном стенде были получены максимальные значения гидродинамического давления  $p$  в зависимости от нагрузки сжатия  $F_{сж}$  (рис. 1). Зависимость максимального гидродинамического давления от нагрузки на шатун не линейная. При нагрузке от 20 до 80 кН гидродинамическое давление резко растет, после 80 кН — повышение незначительное. В диапазоне 100–120 кН гидродинамическое давление практически не увеличивается. При этом максимальное значение равно 40 МПа.

Пьезоэлектрический датчик имеет ряд недостатков, к которым можно отнести большие габариты, ведущие к снижению жесткости КГШ и невозможности одновременной установки не-



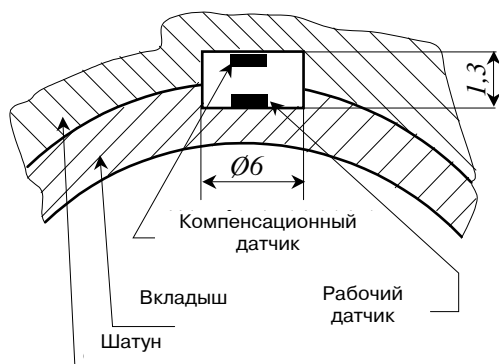
**Рис. 1.** Зависимость максимального гидродинамического давления в центре верхнего шатунного вкладыша от нагрузки на шатун:

датчик — пьезоэлектрический

скольких датчиков, а также большой объем измерительного канала, несравнимый с толщиной масляной пленки.

Измерение гидродинамического давления в шатунном подшипнике были также выполнены тензометрическим мембранным датчиком давления. Для его установки с тыльной стороны вкладыша выполнено торцевое углубление диаметром 6 мм (рис. 2). Толщина чувствительного элемента мембраны выбиралась исходя из двух условий: обеспечения достаточной чувствительности тензорезистора и минимального искажения смазочного слоя при деформации мембраны.

Для измерений использовался тензорезистор типа КФ5П1-0,5-100-А-12, который крепился клеем ВС-350. Ось тензочувствительности вкладыша ориентировалась вдоль оси шатунной шейки. При этом предполагалось, что чувствительность датчика к деформациям корпуса подшипника будет минимальной. Исходя из этого допущения сигнал, воспринимаемый датчиком, должен быть пропорционален прогибу мембраны под воздействием гидродинамического давления.



**Рис. 2.** Схема установки тензометрического мембранного датчика давления с компенсацией деформации корпуса подшипника

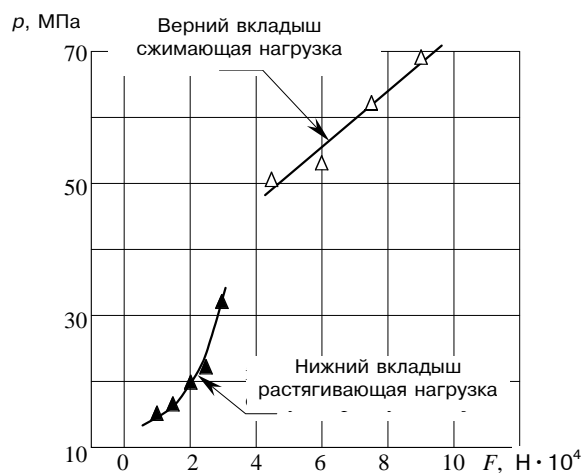
Для тарировки датчиков было изготовлено специальное приспособление. Тарировка осуществлялась непосредственно на вкладыше, установленном в шатун.

Для определения чувствительности датчиков изменялась глубина торцевого углубления от 1,2 до 2,5 мм. Оказалось, что она не влияет на результаты измерений, поэтому было принято решение не дорабатывать вкладыш, а тензодатчики наклеивать на наружную поверхность вкладыша, на постели шатуна делать торцевое углубление.

Для компенсации деформаций корпуса подшипника на постели шатуна в торцевое углубление наклеивался компенсационный тензорезистор по типу такой же, как и рабочий (см. рис. 2).

Как показали исследования, компенсационный датчик не выполнил свои функции и не устранил дрейф «0» в показаниях тензодатчика в зависимости от температуры. При тарировке датчики показали хорошую линейность. Температурный дрейф «0» значителен и составил 0,6 МПа/°С в интервале 24–140 °С. При прохождении маслоподводящего отверстия через датчик наблюдается сброс давления до значения, соответствующего давлению подачи масла. Это положение было использовано для корректировки дрейфа «0», и поскольку результаты измерений фиксировались в цифровом виде, программно производилась корректировка «0».

При проведении измерений на вкладыши шатуна наклеивались 14 датчиков (по 7 на каждый вкладыш). На рис. 3 представлены результаты измерений максимального гидродинамического давления в подшипнике в зависимости от нагрузки на шатун. Для верхнего вкладыша представлена зависимость гидродинамического давления от усилия сжатия, для нижнего вкладыша — от усилия растяжения. Для усилия сжатия 90 кН максимальное гидродинамическое



**Рис. 3.** Зависимость максимального гидродинамического давления верхнего и нижнего шатунных вкладышей от нагрузки на шатун

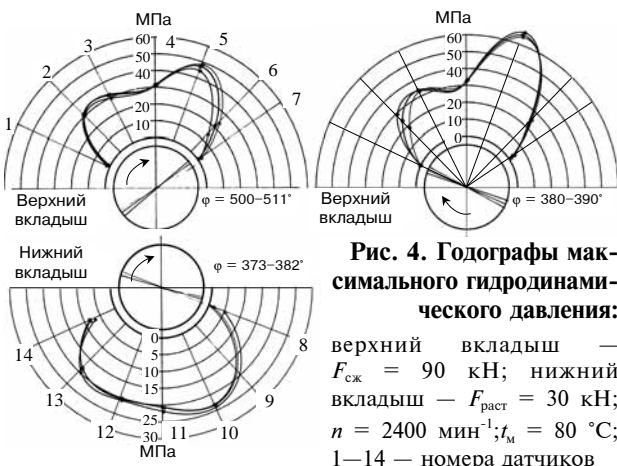
давление зафиксировано около 70 МПа. Для сравнения пьезоэлектрический датчик при этой же нагрузке показывал менее 40 МПа, то есть почти в 2 раза меньше.

По измеренным данным построены полярные диаграммы гидродинамического давления (рис. 4). Форма полярной диаграммы гидродинамического давления зависит от положения в данный момент времени маслоподводящего отверстия. Для верхнего вкладыша полярная диаграмма представляет собой как бы две полусинусоиды, каждая с углом охвата примерно в 90°. Пик гидродинамического давления смещен на 20° по ходу вращения вала от оси шатуна. Второй пик меньшей величины смещен в противоположную сторону от оси шатуна на 30°. В целом угол охвата гидродинамического давления составляет 120°.

Для нижнего вкладыша угол охвата также примерно равен 120°. Пик давления смещен от оси шатуна на 20° в сторону, противоположную вращению вала.

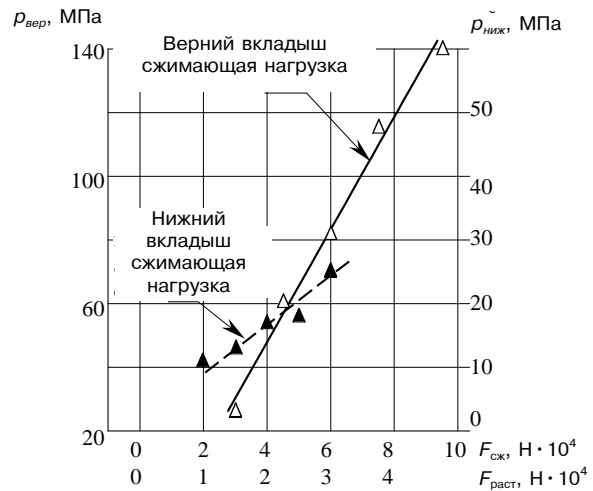
Метод измерения с помощью мембранных датчиков давления позволяет избавиться от вредных объемов в канале измерения, тем самым повысить достоверность измерения гидродинамического давления в масляной пленке. Однако при этом существуют большие сложности при обработке сигнала, связанные с деформацией корпуса подшипника и температурным дрейфом «0».

Чувствительным элементом стержневого датчика для измерения гидродинамического давления в шатунном подшипнике является стержень, на который наклеивается тензодатчик КФ5П1-1-100-В-12. Деформация стержня происходит под действием гидродинамического давления через вкладыш. При этом не изменяются условия монтажа вкладыша. Тарировка стержневого датчика осуществляется аналогично мембранному. Результат тарировки показал, что чувствительность датчика к температуре существует, но дрейф «0» незначительный. При изменении температуры на 40 °С дрейф «0» составил 4%.



**Рис. 4. Годографы максимального гидродинамического давления:**

верхний вкладыш —  $F_{сж} = 90$  кН; нижний вкладыш —  $F_{раст} = 30$  кН;  $n = 2400$  мин<sup>-1</sup>;  $t_m = 80$  °С; 1–14 — номера датчиков



**Рис. 5. Зависимость максимального гидродинамического давления верхнего и нижнего шатунных вкладышей от нагрузки на шатун, измеренного стержневым датчиком:**

$n = 2500$  об/мин

Измеренная величина максимального гидродинамического давления составила около 140 МПа, что значительно выше, чем при измерении другими датчиками давления.

Погрешность измерения давления определяется:

- > техническими характеристиками регистрирующей аппаратуры и первичных преобразователей;
- > качеством изготовления датчика и его монтажа;
- > влиянием внешних условий на характеристики датчика и регистрирующей аппаратуры.

Суммарная погрешность измерений гидродинамического давления стержневым датчиком оценивается величиной < 3%.

Зависимость максимального гидродинамического давления от нагрузки на шатун представлена на рис. 5.

Для верхнего вкладыша от нагрузки сжатия  $F_{сж}$ , для нижнего — от растяжения  $F_{раст}$ . Обе зависимости приблизительно достаточно линейные. Это подтверждает достоверность разработанной методики измерений.

**Литература**

1. Балюк В.К., Рождественский Ю.В., Ветров М.К., Фалеев Л.Н. Пути повышения несущей способности коренных опор тракторного дизеля // Двигателестроение. — 1989. — № 2. — С. 47–48, 54.
2. Глезер Х. Максимальное гидродинамическое давление смазочного слоя в сложнагруженных подшипниках скольжения // Двигателестроение. — 1981. — № 9. — С. 13–17.
3. Попов В.Н., Суркин В.И., Попов Г.П. Повышение работоспособности шатунных подшипников тракторного дизеля // Двигателестроение. — 1982. — № 12. — С. 3–4.

4. Рождественский Ю.В., Ахтямов М.К., Балюк Б.К., Фалеев Л.Н. Опыт доводки шатунных подшипников тракторных двигателей типа 8ЧВН15/16 // Двигателестроение. — 1988. — № 8. — С. 51–53.

5. Goenka Pawan K., Stumbo Richard F. A method for

determining optimum crankshaft oil-hole location // SAE. — 1986. — № 860357. — P. 99–104.

6. Philipp U., Essers U. Druck und Wegmessungen an hydrodynamischen Lagern von Verbrennungsmotoren // VDI BERICHTE Nr. 681, 1988, S. 101–117.

## НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

### ДИЗЕЛЬ М721-01 ОАО «ЗВЕЗДА» ПРИНЯТ КОМИССИЕЙ ОАО РЖД

Шестицилиндровый дизельный двигатель подвагонного расположения М721-1 ОАО «Звезда» разработан по программе импортозамещения для новых российских рельсовых автобусов типа РА-2, создаваемых ЗАО «Метровагонмаш». Двигатель М721-01 соответствует требованиям, предъявляемым к дизельным двигателям силовых установок нового поколения: экономичность, надежность, ремонтпригодность, тяговые качества, безопасность и экологические показатели. Он оснащен электронной системой регулирования частоты вращения и мощности, электронной системой регулирования подачи топлива и др.

Дизели М721-01 приспособлены для работы на отечественных горючесмазочных материалах, а близость производителя делает доступным и экономически эффективным их обслуживание и ремонт.

Приемочная комиссия ОАО РЖД в состав которой вошли представители ЗАО «Метровагонмаш», Московской железной дороги, ФГУП ВНИИЖТ, ФГУП ВНИКТИ, ВНИИЖГ приняла результаты 200-часовых приемочных испытаний опытного образца двигателя М721-01 и признала его соответствующим техническим требованиям ОАО РЖД.

На рельсовый автобус РА-2 модели 750.05 с дизелем М721-01 ОАО «Метровагонмаш» (г. Мытищи, Московская обл.) получил сертификат соответствия нормам безопасности от Регистра сертификации на федеральном железнодорожном транспорте.

Рельсовые автобусы РА-2 созданы для пассажирских перевозок на участках неэлектрифицированных железнодорожных путей с интенсивным пассажиропотоком на расстояние до 50 км, а также для пригородного и межрегионального сообщений. Они заменят на российских железных дорогах устаревший дизельный моторовагонный подвижной состав чешского, венгерского, прибалтийского производства с двигателями ОАО «Звезда».

В планах дальнейшего развития этого вида транспорта — создание на базе одновагонного



РА-2 дизель-поездов, состоящих из двух, трех, четырех вагонов с подвагонным размещением силовой установки на базе форсированного горизонтального дизеля М721-01.

Подвагонное горизонтальное расположение двигателя позволяет максимально эффективно использовать внутреннее пространство автобуса для размещения пассажирского салона.

В конструкции рельсового автобуса РА-2 применены следующие современные технические решения:

- кузов повышенной коррозионностойкости из нержавеющей стали;
- пневматическое подрессирование с регулированием уровня пола;
- негорючие облицовочные материалы;
- ударопрочные лобовые стекла с обогревом;
- сдвижные уплотняемые двери;
- система отопления и принудительной вентиляции пассажирского салона;
- двойные оконные стеклопакеты и теплоизоляция, снижающие уровень шума;
- система безопасности движения, включающая: автоматическую локомотивную сигнализацию, устройство контроля бдительности машиниста, антиблокировочную систему торможения, контрольно-диагностическую систему управления, блокировку управления при смене кабины;
- санитарные блоки (экологически чистые туалетные системы);
- кондиционер в кабине машиниста;
- маршрутные указатели и информационные табло в салонах;
- система обнаружения пожара.