

УДК 629.113.539.538

## НЕРАВНОМЕРНОСТЬ ИЗНАШИВАНИЯ ОДНОИМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ И ЕГО РЕСУРС

А. С. Гребенников, С. А. Гребенников, СГТУ

В процессе эксплуатации двигателя между его одноименными элементами отмечается значительная разница показателей изменения их технического состояния.

В статье приводится анализ причин неравномерности изменения технического состояния одноименных элементов ДВС в процессе эксплуатации и обоснование зависимости ресурса двигателя от исходной неравномерности структурных параметров в подшипниках коленчатого вала и цилиндропоршневой группе.

На основании приведенного анализа даны рекомендации по управлению техническим состоянием одноименных элементов и прогнозированию ресурса ДВС.

Conditions of similar components of the engine would degrade during its operation, but their wear rate may be quite different.

This article discusses the reasons of irregular wear in similar components vs. engine run time. Engine life time is shown as a function of initial dimensional irregularity in crankshaft bearings and pistons.

Based on the above analysis, recommendations are offered on control of similar engine components' conditions and engine life time prediction.

Технико-экономические показатели ДВС определяются эффективностью функционирования систем зажигания и питания, цилиндро-поршневой группы (ЦПГ), кривошипно-шатунного (КШМ) и газораспределительного (ГРМ) механизмов. Каждый из них состоит из элементов, идентичных по конструкции с одинаковыми названиями. В процессе эксплуатации между одноименными элементами отмечается значительная разница показателей изменения технического состояния при одинаковой наработке как в группах ДВС одной модели, так и в отдельных их экземплярах. Высокий коэффициент вариации показателей технического состояния одноименных элементов ( $V = 0,3-0,7$  и более) приводит к снижению ресурса и эффективности работы механизма, в состав которого они входят; значительные погрешности в прогнозе ресурса ДВС при диагностировании искусственно сокращают периодичность выполнения профилактических и ремонтных работ.

Сведения об отрицательном влиянии неравномерности изнашивания одноименных элементов и рабочих процессов в цилиндрах ДВС на его ресурс, мощностные, экономические и экологические показатели приведены в работах [1, 2, 3, 6-11]. Для некоторых элементов ДВС нормативно-технической документацией предусмотрены ограничения на неравномерность их технического состояния (табл. 1).

Многие авторы указывают на сложность формирования заключения о техническом состоянии объекта диагностирования, состоящего из одноименных элементов со значительной вариацией структурных параметров между ними. По этой причине обеспечение работоспособности механизмов и систем ДВС, состоящих из одноименных элементов, осуществляется в основном по стратегии ожидания отказа. Затраты на устранение отказа при такой стратегии в несколько раз выше, чем при предупредительном ремонте на основе результатов диагностирования.

Поэтому для эффективного управления техническим состоянием ДВС необходим всесторонний анализ причин, вызывающих исходную неравномерность структурных параметров одноименных

## ПАРАМЕТРЫ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОДНОИМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Параметр	Единица измерения	Значение (допустимое)
Неравномерность значений компрессии по цилиндрам двигателя: бензинового	МПа	0,1
дизельного		0,2
Отличие частоты вращения коленчатого вала при последовательном отключении одного цилиндра из работы	мин <sup>-1</sup>	75
Неравномерность цикловой подачи топлива ТНВД	%	4–5
Асинхронизм искрообразования	град	3
Разность пробивного напряжения по свечам зажигания	кВ	2
Отличие плотности электролита по элементам АКБ	г/см <sup>3</sup>	0,01

элементов, и знание динамики ее изменения в процессе эксплуатации.

Цель статьи — анализ причин неравномерности изменения технического состояния одноименных элементов ДВС в процессе эксплуатации и обоснование зависимости ресурса двигателя от исходной неравномерности структурных параметров в подшипниках коленчатого вала и ЦПГ.

Неравномерность изнашивания одноименных элементов ДВС является следствием исходной неравномерности структурных параметров и рабочих процессов, обусловленной конструкцией, технологией изготовления и сборки ДВС.

Первопричинами флуктуации скорости изнашивания одноименных деталей в конкретном двигателе являются индивидуальные отличия их размеров, геометрической формы, величин исходных зазоров сопряжений, деформаций несущих элементов (головок блока, гильз цилиндров, коренных опор коленчатого вала), масс подвижных деталей, смещений геометрических осей. Совокупность геометрических отклонений индивидуальна для каждого одноименного сопряжения, что определяет различные условия их трения, изнашивания, а также величины объемов цилиндров и камер сгорания.

Суммирование накопленных погрешностей изготовления и сборки элементов КШМ по данным технических условий Заволжского моторного завода показало, что разность возможных величин зазоров между головкой блока и днищем поршня цилиндров двигателя ЗМЗ 402.10 и других колеблется от 0 до 0,41 мм. Такой размах зазора соответствует отклонениям степени сжатия в цилиндрах 0,4 ед. ( $\pm 0,2$  ед.). В двигателях ВАЗ-2108 аналогичный показатель равен 0,6 ед. ( $\pm 0,3$  ед.) [10], в дизельных двигателях — выше 0,6 (по данным Владимирского тракторного завода степень сжатия

в цилиндрах новых ДВС находится в пределах 15,5–17,6, причем только у 60% дизелей она составляет наиболее желаемую величину 16,5–17,0). Полагая, что зависимость интенсивности изнашивания цилиндров ДВС от степени сжатия близка к линейной, а разность степени сжатия на 0,1 единицы вызывает различия в значениях интенсивности изнашивания цилиндров на 2–3% [6], заключаем, что только по этой причине исходная неравномерность изнашивания цилиндров может превысить 10%.

Другим существенным фактором неравномерного изнашивания одноименных деталей ДВС являются различия условий работы каждой из них из-за несовершенства конструкции систем смазки, охлаждения, воздухо- и топливоподачи. Так, асимметричность воздушных потоков во впускных коллекторах двигателя 8Ч 12/12 (КамАЗ-740) способствует концентрации абразивных частиц в «тупиковых» 1 и 5 цилиндрах, поэтому их ресурс на 30–70% меньше и является определяющим для выполнения текущего ремонта ЦПГ. На неравномерность изнашивания подшипников коленчатого вала влияют расположение и порядок работы цилиндров двигателя. Известно, что нагруженность шатунных подшипников рядных двигателей выше, чем коренных. Для V-образных, наоборот, коренные опоры являются более нагруженными. Учитывая, что износ шатунных подшипников равномернее, чем в коренных, а допустимые зазоры в них выше, получаем, что для большинства автотракторных двигателей ресурс коленчатого вала до ремонта определяется износом коренных подшипников. Отмеченный многими исследователями преобладающий износ средних коренных подшипников коленчатого вала автотракторных двигателей вызван тем, что они более нагружены. Отличия нагрузок на коренные опоры достигают 40%

[9] и определяются сочетанием газовых и инерционных сил, передаваемых на кривошпы коленчатого вала в соответствии с порядком работы цилиндров. Для V-образных восьмицилиндровых двигателей со смещенным левым рядом цилиндров уменьшение неравномерности распределения усилий на коренные подшипники может быть достигнуто изменением порядка работы цилиндров с традиционного 1-5-4-2-6-3-7-8 на 1-5-7-2-6-3-4-8 [1]. Это позволит разгрузить максимально нагруженный четвертый коренной подшипник на 8–10%.

В рассмотренных примерах неравномерного изнашивания одноименных элементов ЦПГ и КШМ двигателей внутреннего сгорания (в силу теоретически обоснованных или выявленных в процессе эксплуатации причин конструктивно-технологического порядка) имеется конкретное место расположения «слабых» звеньев. Устранение или уменьшение влияния этих причин на неравномерность изнашивания одноименных сопряжений достигается совершенствованием конструкции, технологии изготовления и сборки ДВС.

Помимо рассмотренных конструктивных и технологических факторов, определяющих исходную неравномерность технического состояния одноименных сопряжений ДВС, на дальнейшее ее развитие существенную роль оказывает сфера технической эксплуатации, главным образом, через качество выполнения работ по техническому обслуживанию (ТО) и текущему ремонту (ТР).

Наблюдения авторов статьи за группой новых автомобилей ГАЗ-24 «Волга» с двигателем 4Ч 9,2/9,2 показали, что даже при соблюдении нормативов технической эксплуатации отличия показателей компрессии цилиндров и мощности механических потерь ДВС достигали соответственно 15 и 30%.

По конкретным ДВС значения износа одноименных элементов КШМ отличались на 10–55%, ЦПГ — 29–100%, ГРМ — 15–50%.

Неравномерность изнашивания одноименных элементов в процессе эксплуатации для большинства сопряжений увеличивается. В качестве иллюстрации к сказанному на рис. 1 представлены графики износа цилиндров и поршневых колец тракторного дизеля иностранного производства мощностью  $P_e = 27,7$  кВт при  $n = 1900$  мин<sup>-1</sup>, заимствованные из работы [12]. Как видно из рис. 1, неравномерность изнашивания — разность между максимальной и минимальной величинами износов — одноименных деталей ЦПГ в процессе эксплуатации увеличивается. При этом каждый элемент ЦПГ сохраняет свою позицию по интенсивности изнашивания, которая установилась после приработки. На заключительном этапе эксплуатации наблюдается тенденция к уменьшению интенсивности изнашивания гильз цилиндров. Об этом свидетельствуют экспериментальные данные и других источников [2, 3, 6, 11].

Различия в степени сжатия и герметичности камер сгорания, а также дестабилизация рабочих процессов цилиндров в процессе эксплуатации, вызванная несоответствием регулировочных параметров систем питания, зажигания, газораспределительного механизма их оптимальным значениям, приводят к тому, что мощность отдельных цилиндров может отличаться на 20% [4–7, 11].

Из 132 двигателей Д-50, СМД-14 [7], обследованных с индицированием всех цилиндров, у 60% ДВС неравномерность индикаторного давления в цилиндрах составляла 15–25%, максимального давления сгорания — 15–30%, средней температуры за такт расширения — 17–30%. Около 30% дви-

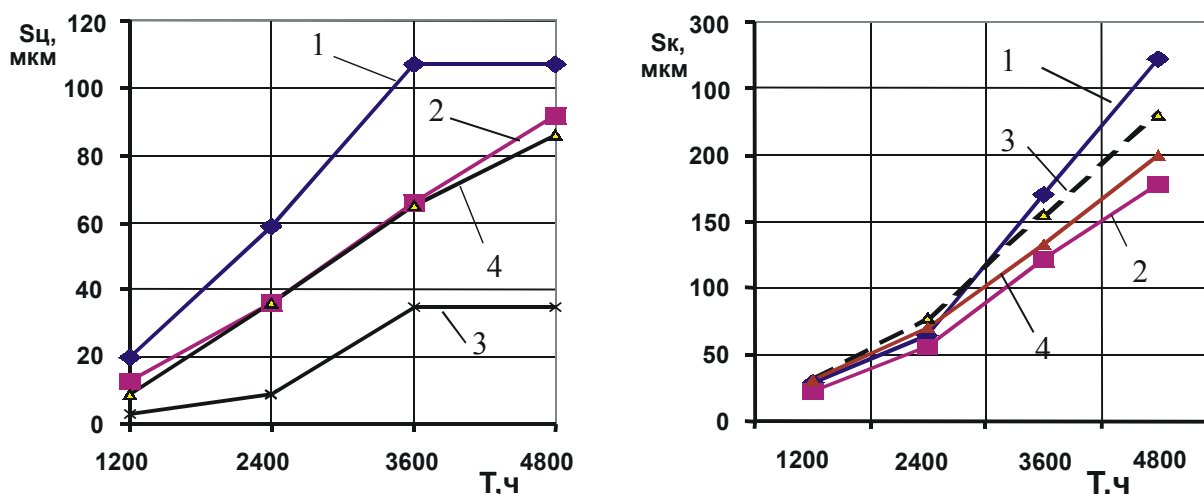


Рис. 1. Зависимость износа цилиндров  $S_{ц}$  и поршневых колец  $S_{к}$  двигателя от наработки  $T$  (1–4 — номера цилиндров)

гателей имели неравномерность скорости нарастания давления по цилиндрам от 20 до 60%. Основные причины неравномерности показателей работы цилиндров ДВС — отклонения угла опережения впрыска топлива, неравномерность его подачи, неисправности форсунок и нарушенная герметичность камер сгорания. Любые отклонения регулируемых параметров систем и механизмов двигателя от оптимальных их значений вызывают форсированный износ ЦПГ и КШМ [1, 6, 7].

Вот почему необходимо регулярно контролировать герметичность и равномерность работы цилиндров ДВС в процессе эксплуатации.

Строго отлаженный периодический контроль равномерности работы цилиндров двигателей 4Ч 9,2/9,2 автомобилей ГАЗ-24 «Волга» с последующим микрометрированием одноименных деталей ЦПГ и КШМ при поступлении их в первый ТР, показал прямую взаимосвязь неравномерности изнашивания одноименных сопряжений и ресурса двигателя от степени равномерности работы цилиндров [5]. При этом отмечена зависимость равномерности работы цилиндров и технико-экономических показателей ДВС от начальной (после приработки) разности компрессионных свойств цилиндров, предопределяющей максимально возможную степень приближения фактического рабочего процесса в цилиндрах к расчетному [4].

Наличие причинно-следственной связи неравномерности изнашивания одноименных элементов ДВС с показателями эффективности их работы указывает, что перенос среднестатистических нормативов технической эксплуатации на конкретные двигатели без учета фактической неравномерности изменения технического состояния его одноименных деталей и сопряжений не является рациональным и тем более оптимальным управляющим решением.

Для выявления потенциальных резервов управления техническим состоянием конкретного ДВС на основе диагностирования были выполнены аналитические и экспериментальные исследования по обоснованию взаимосвязи неравномерности изнашивания одноименных элементов и ресурса ДВС от исходной неравномерности их структурных параметров. Основой для ее аналитического описания послужили зависимости изнашивания динамически нагруженных и саморазгружающихся сопряжений от пробега, установленные профессором Ф. Н. Авдонькиным [2].

За значение неравномерности изнашивания  $S_n$  одноименных элементов принимается разность величин износа (зазора) между максимально  $S_{max}$  и минимально  $S_{min}$  изношенными одноименными деталями (сопряжениями) исследуемого ДВС

$$S_n = S_{max} - S_{min}. \quad (1)$$

Установлено, что для динамически нагруженных подшипников коленчатого вала значение неравномерности их изнашивания в процессе эксплуатации (по пробегу  $l$ ) увеличивается [5]

$$S_n = S_{n0} e^{b_n l}, \quad (2)$$

где  $S_{n0}$  — значение исходной неравномерности зазора в одноименных подшипниках после этапа приработки;  $b_n$  — коэффициент интенсификации неравномерности изнашивания.

Из формулы (2) следует, что при одинаковых значениях среднеарифметического исходного зазора  $S_{cp}$  в одноименных подшипниках коленчатых валов сравниваемых ДВС в двигателе с меньшей неравномерностью исходных зазоров  $S_{n0}$  достижение подшипниками значений предельного зазора  $S_n$ , установленного заводом-изготовителем ДВС, является наиболее вероятным событием, а их ресурс выше. Предельное значение  $S_n$  заводом-изготовителем определяется при испытаниях работы сопряжения по величине зазора, при котором давление масла в магистрали и толщина смазочного слоя в подшипнике снижаются до критического значения. Однако при этом не учитывается неравномерность зазоров в одноименных подшипниках.

В действительности с увеличением неравномерности исходных зазоров в подшипниках коленчатого вала значение предельно допустимого зазора  $S_{пн}$  и наработка на отказ ДВС уменьшаются. С достаточной для практики точностью значение предельно допустимого зазора (износа)  $S_{пн}$  с известными величинами среднего исходного зазора  $S_{cp}$  и их неравномерностью  $S_{n0}$  на прогнозируемом пробеге  $l$  определяется

$$S_{пн} = S_n - S_{cp} - 0,5 S_{n0} \cdot e^{b_n l}. \quad (3)$$

В соответствии с уравнением (3) ресурс подшипников будет уменьшаться не пропорционально значению исходной неравномерности  $S_{n0}$ , а по экспоненциальной зависимости. Это свидетельствует о важности сведения к минимуму начальной неравномерности значений структурных параметров и отклонений геометрической формы одноименных сопряжений, а также других параметров рабочих процессов, вызывающих различие давления на поверхности трения сопряжений, поскольку между интенсивностью изнашивания  $\alpha$  и давлением  $p$  существует пропорциональная связь [2]

$$\alpha = c p, \quad (4)$$

где  $c$  — коэффициент, зависящий от свойств смазки и истирающей поверхности.

Неравномерность макрогеометрических отклонений шеек коленчатого вала в процессе эксплуатации также прогрессирует:



$$\varepsilon_n = \varepsilon_{ho} \cdot e^{b_{не} l}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_n, \varepsilon_{ho}$  — значение неравномерности овальности (конусности) шеек коленчатого вала соответственно в текущий момент и после приработки;  $b_{не}$  — коэффициент интенсификации неравномерности овальности шеек.

При одинаковых зависимостях (2) и (3) трибологические процессы в коренных и шатунных подшипниках различны (рис. 2, 3). В шатунных подшипниках неравномерность изнашивания  $S_n$  увеличивается на всем периоде эксплуатации (рис. 2). При этом их ресурс, как правило, ограничивается сроком службы подшипника, имевшего максимальное значение исходного зазора.

В коренных подшипниках значение неравномерности зазоров на начальном этапе эксплуатации уменьшается. Это объясняется тем, что в отличие от шатунных, коренные подшипники коленчатого вала функционально зависимы. Вследствие этого на каждый коренной подшипник действуют различные по величине нагрузки от смежных с ними шатунных шеек. Большая часть нагрузки от шатунного подшипника передается на коренной подшипник с меньшим зазором, а по-

являющийся при этом прогиб вала способствует выдавливанию масляного слоя из него. В результате условия работы подшипника с меньшим зазором значительно ухудшаются: увеличиваются интенсивность изнашивания и степень искажения геометрической формы шейки и вкладышей. По этой причине в коренных подшипниках происходит «выравнивание» зазоров, уменьшение их неравномерности относительно исходной, до значения  $S_{Hmin}$  (рис. 3). По мере выравнивания зазоров в коренных подшипниках интенсивность изнашивания подшипников с первоначально меньшими зазорами по-прежнему остается выше из-за более значительных отклонений геометрической формы шеек, полученных на начальном этапе. Подтверждением такого двухстадийного механизма неравномерности изнашивания коренных подшипников служат данные табл. 2 [9].

Аналитически обоснованные зависимости (2), (3) и (5) подтверждены результатами стендовых и эксплуатационных испытаний [5], методика проведения которых предусматривала безразборные способы оценки неравномерности изнашивания одноименных сопряжений ДВС, а также эксперимен-

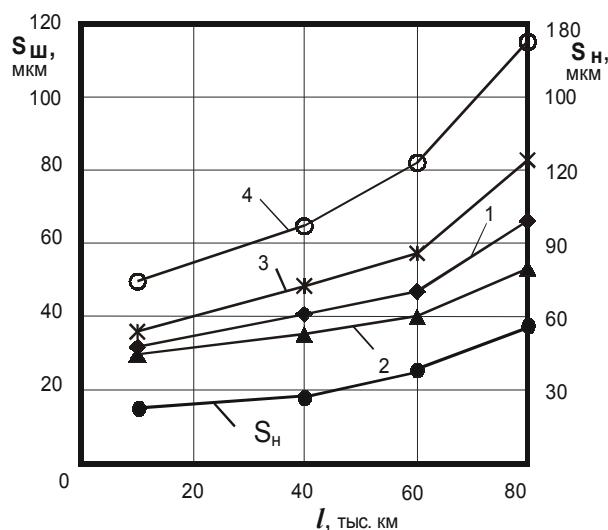


Рис. 2. Изменение зазора  $S_{ш}$  и их неравномерности  $S_n$  в шатунных подшипниках двигателя 4Ч 9,2/9,2 (ЗМЗ — 2401) по пробегу  $l$  в зависимости от исходного зазора (цифрами обозначены номера подшипников)

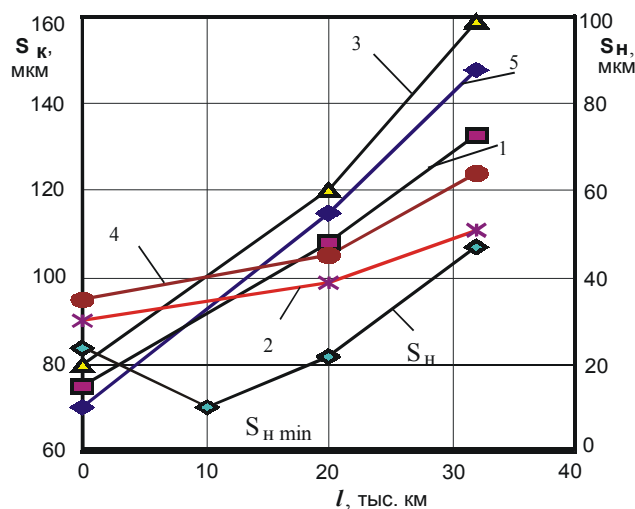


Рис. 3. Изменение зазора  $S_k$  в коренных подшипниках и их неравномерности  $S_n$  двигателя 4Ч 9,2/9,2 (ЗМЗ — 2401) от исходной неравномерности зазоров по пробегу  $l$  (цифрами обозначены номера подшипников)

Таблица 2

ИЗНОС (МКМ) КОРЕННЫХ ШЕЕК КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ЗМЗ-53 В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИСХОДНЫХ ЗАЗОРОВ В ПОДШИПНИКАХ [9]

Номер ДВС	Параметр	Номер коренных шеек				
		1	2	3	4	5
1	Исходный зазор / Износ шеек	65/52	77/48	75/46	80/45	62/52
2	Исходный зазор / Износ шеек	126/45	123/45	128/65	148/24	129/39
3	Исходный зазор / Износ шеек	306/123	300/117	232/125	204/137	206/152

тальными данными, полученными Ф. Н. Авдонькиным, Ш. М. Биликом, И. Б. Гурвичем, А. С. Денисовым, А. Д. Назаровым и другими.

Для саморазгружающихся сопряжений гильза цилиндра–поршневое кольцо, с учетом развивающейся в процессе эксплуатации ДВС овальности гильзы цилиндра и действия абразивных частиц пыли, поступающих с топливовоздушной смесью в зазор между поршневым кольцом и гильзой, получена логистическая зависимость износа сопряжения от пробега [5]

$$S_m = \frac{S_n}{1 + ae^{-bl}}, \quad (6)$$

где  $S_m$  и  $S_n$  — текущее и предельное значения износа гильзы;  $a$  и  $b$  — коэффициенты, характеризующие условия трения.

Поэтапно меняющийся механизм изнашивания сопряжения гильза цилиндра–поршневое кольцо

(6) подтвержден длительными эксплуатационными испытаниями со многими моделями ДВС, выполненными авторами статьи (рис. 4), и анализом результатов исследований М. А. Григорьева, А. С. Денисова, И. Б. Тартаковского, А. Seifert.

Экспоненциальный рост интенсивности изнашивания элементов ЦПГ в начальный достаточно длительный (60–120 тыс. км) период эксплуатации в соответствии с равенством (6) позволяет сделать вывод, что значение неравномерности изнашивания одноименных сопряжений ЦПГ в этот период также увеличивается (рис. 5) по зависимости, характерной для динамически нагруженных сопряжений

$$S_H = S_{H0} e^{b_H l}, \quad (7)$$

где  $S_{H0}$  — значение исходной неравномерности зазоров в сопряжениях ЦПГ;  $b_H$  — коэффициент интенсификации неравномерности изнашивания элементов ЦПГ, а следовательно, ресурс ЦПГ будет уменьшаться не

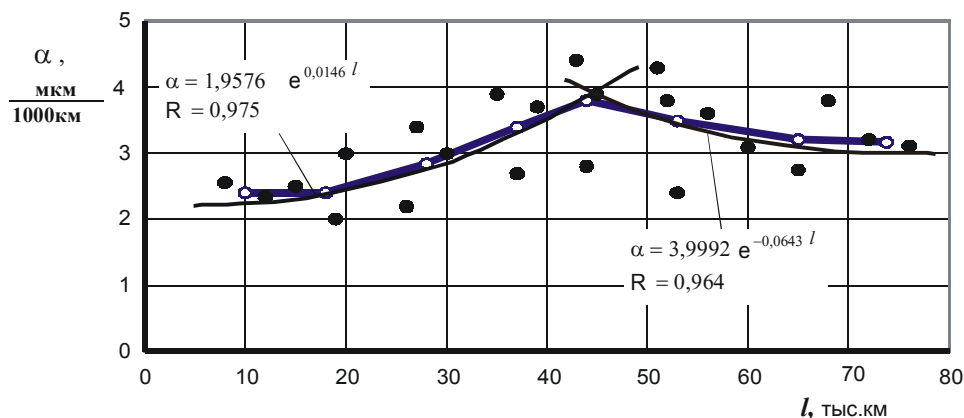


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания цилиндров а двигателя 4Ч 9,2/9,2 от пробега  $l$  (• — экспериментальные значения  $\alpha$ ; о — усредненные значения  $\alpha$ ;  $R$  — коэффициент корреляции)

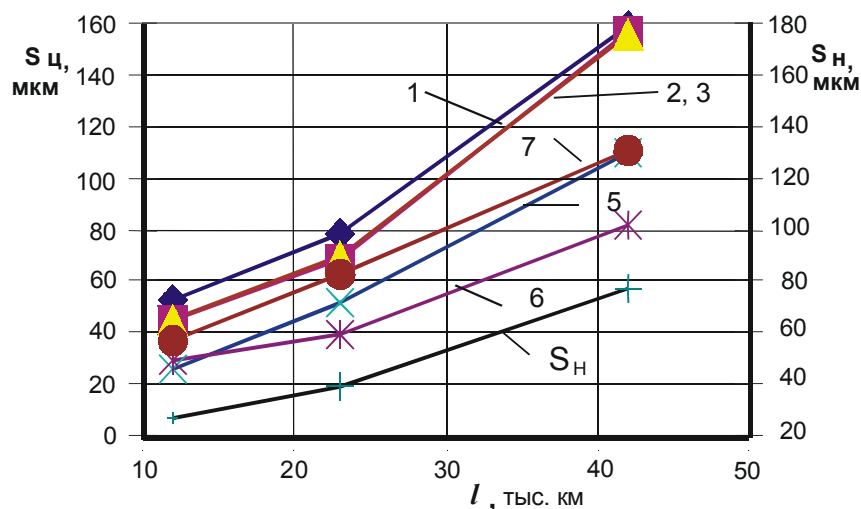


Рис. 5. Изменение износа  $S_{ц}$  цилиндров и их неравномерности изнашивания  $S_H$  двигателя ЗИЛ-130 по пробегу  $l$  (по данным М. А. Григорьева)

пропорционально исходной величине неравномерности  $S_{н0}$ , а по нарастающей экспоненте, как для подшипников коленчатого вала см. уравнение (3).

Таким образом, зависимости (2), (3), (6) позволяют повысить точность прогнозирования ресурса ДВС, так как учитывают неравномерность технического состояния одноименных элементов

КШМ и ЦПГ. Они также показывают, что уменьшение исходной неравномерности структурных и рабочих параметров в одноименных элементах ДВС в сфере производства и целенаправленные технические воздействия, устраняющие причины интенсивного ее развития в процессе эксплуатации, являются резервами повышения надежности и технико-экономических показателей работы ДВС.

## Литература

1. *Абрамивили М. М., Енукидзе Б. М.* Влияние порядка работы цилиндров V-образного восьмицилиндрового двигателя на загруженность опор коленчатого вала // Автомобильная промышленность, 1983. — № 8. — С. 8–9.
2. *Авдонькин Ф. Н.* Теоретические основы технической эксплуатации автомобилей. — М.: Транспорт, 1985. — 215 с.
3. *Билик Ш. М.* Макрогеометрия деталей машин. — М.: Машиностроение, 1972. — 344 с.
4. *Гребенников А. С.* Диагностирование ЦПГ по параметрам ее герметичности // Двигателестроение. — 1990. — № 6. — С. 29–30.
5. *Гребенников А. С.* Диагностирование автотракторных двигателей динамическим методом. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2002. — 196 с.
6. *Григорьев М. А., Пономарев Н. Н.* Износ и долговечность автотракторных двигателей. — М.: Машиностроение, 1976. — 248 с.

7. *Ждановский Н. С., Николаенко А. В.* Надежность и долговечность автотракторных двигателей. — Л.: Колос, Ленингр. отд-ние, 1974. — 223 с.
8. *Кугель Р. В., Кухтов В. Г.* Динамика изнашивания тракторных деталей // Вестник машиностроения. 1984. — № 5. — С. 12–16.
9. *Назаров А. Д.* Дисбаланс автомобильных и тракторных двигателей. — Ашхабад: Ылым, 1981. — 252 с.
10. *Плецев В. Ф.* Расчет допуска степени сжатия двигателей ВА3-2108 // Двигателестроение. — 1987. — № 7. — С. 12–14.
11. *Серов А. В.* Управление эффективностью и качеством работы машин в условиях эксплуатации. — М.: Изд-во стандартов, 1979. — 148 с.
12. *Тартаковский И. Б.* Полное уравнение износа цилиндров и поршневых колец // Тракторы и сельхозмашины. — 1969. — № 1. — С. 9–11.

Виктору Валентиновичу  
ЭФРОСУ  
75 лет



27 июня 2005 г. исполняется 75 лет  
заведующему кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»,  
заслуженному деятелю науки и техники РФ,  
лауреату Государственной премии СССР,  
почетному машиностроителю РФ,  
действительному члену Академии инженерных наук и Транспорта РФ,  
доктору технических наук, профессору  
Эфросу Виктору Валентиновичу

Коллектив Владимирского Государственного университета  
поздравляет юбиляра и желает ему здоровья  
и творческого долголетия