

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петриченко Р. М. Конвективный теплообмен в поршневых машинах. – Л.: Машиностроение, 1979. – 232 с.
2. Петриченко Р. М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в двигателях внутреннего сгорания: Учеб. пособие. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. – 244 с.
3. Элементы САПР ДВС: Алгоритмы прикладных программ: Учеб. пособие / Под общ. ред. Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.
4. Попов В. М. Теплообмен в зоне контакта разъемных и неразъемных соединений. – М.: Энергия, 1971. – 216 с.

Статья поступила в редакцию 6.06.2007

---

УДК 534.647:621.432 (001.8)

А. П. Науменко

### МЕТОДОЛОГИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ПОРШНЕВЫХ МАШИН

*На основе анализа основных достижений в области теоретических и экспериментальных исследований по определению основных дефектов и неисправностей поршневых машин, а также на основе анализа параметров виброакустического сигнала поставлена проблема контроля технического состояния поршневых машин и определены основные задачи в области диагностики и мониторинга технического состояния поршневых компрессоров и двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены основные источники виброакустических колебаний поршневых машин, и предложена модель виброакустического сигнала.*

Критерием, определяющим качество эксплуатации и обслуживания поршневых машин (ПМ) различного назначения, является использование максимального их ресурса, с одной стороны, при обеспечении безопасности в случае аварийных и непредсказуемых остановок ПМ с заданным уровнем последствий и потерь и, с другой стороны, при заданном уровне затрат на ремонт и восстановление работоспособного состояния ПМ.

Уровни последствий, потерь и затрат определяются исходя из назначения и областей применения ПМ. Так, при использовании ПМ, например ДВС, в общегражданских целях (автомобильном, железнодорожном транспорте и т.п.) на первый план выходит вторая составляющая – уровень затрат на ремонт и восстановление. Для ПМ, используемых на морском и речном флотах, в зависимости от вида

объектов значительную роль играет первая составляющая — обеспечение безопасности — при достаточно большом весе второй. В тех сферах применения ПМ, в которых безопасность при отказе ПМ играет определяющую роль, например в авиации, первая составляющая доминирует.

Существует достаточно большая сфера применения ПМ, где безопасность их эксплуатации служит первостепенным и определяющим фактором. Это ПМ потенциально опасных производств — предприятий нефтегазохимического комплекса (НХК). Внезапная и аварийная остановка оборудования производств НХК создает не только угрозу появления значительных экономических потерь от простоев и восстановления их работоспособности, но и угрозу экологических и техногенных аварий и катастроф. В связи с этим важен не только достоверный, но и своевременный диагноз, который мог бы обеспечить безаварийную эксплуатацию с максимальным использованием ресурса заменяемых узлов и деталей. Достичь этого можно только обеспечив постановку диагноза с интервалом времени меньшим, чем интервал развития неисправности. Для оборудования НХК этот интервал составляет от нескольких минут до часов, дней, недель, месяцев [1, 2].

Поэтому в существующих экономических условиях именно первая составляющая определяет объемы капиталовложений в развитие методов и средств контроля технического состояния (ТС) ПМ, чтобы обеспечить их безопасную безаварийную эксплуатацию.

Анализ эффективности различных методов диагностирования ПМ показывает, что при высокой достоверности определения неисправностей вибраакустическим (ВА) методом полнота диагностирования, например ДВС, достигает 70...80 % [3, 4].

Таким образом, сегодня весьма актуальной является проблема безаварийной, безопасной эксплуатации парка ПМ, в частности ДВС и ПК НХК, с максимальным использованием их ресурса. Решением этой проблемы является разработка и внедрение технологии мониторинга ТС ПМ методами ВА-диагностики путем выявления набора диагностических признаков (ДП), соответствующих видам ТС и основным неисправностям ПМ, создания и исследования нормативно-методической базы ДП и программно-аппаратных средств автоматических систем мониторинга для безопасной эксплуатации машин и управления ТС.

Теоретические и экспериментальные исследования по определению основных дефектов и неисправностей ПМ путем анализа параметров ВА-сигнала достаточно широко проводились различными научными школами в 60–80-е годы прошлого века. Эти работы, как правило, основывались на стендовом моделировании различных неисправностей и дефектов отдельных деталей узлов и механизмов и выявлении закономерностей изменения ВА-сигнала [5–10].

В последние 15 лет исследования в области диагностирования ПМ НХК проводятся путем широкомасштабной промышленной эксплуатации в нашей стране, ближнем и дальнем зарубежье стационарных систем мониторинга состояния динамического оборудования КОМПАКС [1, 2]. Теоретический и практический опыт по анализу ВА-сигналов [12], а также разработка программно-аппаратных средств [1] позволили создать методологию диагностирования динамического оборудования, которая дает возможность накапливать опыт диагностирования ПМ [1, 2, 11].

Поршневая машина представляет собой сложную газомеханическую систему и является мощным и многофакторным источником ВА-сигналов, который имеет три основные составляющие.

1. Неуравновешенность движущихся и вращающихся масс — силы инерции возвратно-поступательно движущихся масс, центробежные силы инерции и моменты этих сил.

2. Газодинамические процессы — силы давления газов, протекание газа при впуске и выпуске, вспышка топлива.

3. Соударение и трение между элементами и деталями механизмов.

Сравнительно простым в эксплуатации является оценка состояния ПМ по общему уровню ВА-сигнала. Увеличение глубины диагностирования достигается более сложными алгоритмами обработки сигналов [1, 2, 12], т.е. частотно-временной селекцией сигнала (когерентный анализ), анализом и сравнением параметров сигнала в различных диапазонах частот, оценкой статистических и взаимных характеристик параметров ВА-процессов и др.

Детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) характеризуются такими структурными параметрами, как зазоры между поршнем и кольцом по высоте канавки, в стыках поршневых колец, между цилиндром и поршнем [6, 8–10, 13, 14].

На рабочем режиме или при прокручивании ПМ происходит переделка поршня в зазоре с одной стороны гильзы на другую с высокой скоростью. В результате удара возникают упругие колебания стенок гильзы и цилиндра, которые являются источником ВА-колебаний. С изменением зазоров в сопряжениях “поршень–гильза” различных типов ПМ при начальных и предельных зазорах энергия ВА-колебаний интенсивно изменяется в достаточно узких полосах частот (таблица), что определяется резонансными частотами ВА-каналов корпуса ПМ.

При использовании временной селекции амплитуда ВА-импульса достаточно информативна для оценки зазоров, однако зависимость фазового параметра ВА-импульса от зазора в сопряжении “поршень–гильза” при работе двигателя на различных режимах является иногда более чувствительным ДП, особенно при прокручивании двигателя (см. таблицу).

Таблица

Изменение параметров ВА-сигналов при возникновении различных неисправностей

Цилиндро-поршневая группа	Подшипники КШМ	Параметры	СМД-14	СМД-62	ГАЗ-51	ЗИЛ-130	ЯМЗ-238-ВН	ЯМЗ-236	ЯМЗ-240	Д-37М	Д-50
			1	1,6-4	1,6-4	1,5-1,6	1,4-1,5	4-6,3		1,6-1,7	2-4
			2	3	3			2-10			
Система газораспределения			3	3-12	4-5			2-4			3-12
			1	0,5-2		1-1,2	1,2-1,4	1-3			0,5-2
			2		3						1,7-2,3
Топливная аппаратура			3	2-3	2-3	5-6		2-3,5		1,8	2-3
			1	7-10	5-9	12-15		8-20	8-10	8-20	10-12
			2		12						
Индикация			3	1,5-2,6	3-4						1,5-2,6
			1	12-18							7-16
			4	3							
			3	2							
			1	12-18						14-18	7-16
			2	3						2-3,5	
			3	2							

\* 1 – диапазон частот, в котором наиболее интенсивно изменяется вибрация, кГц;  
 2 – смещение по углу поворота вала пика виброимпульса, град; 3 – изменение амплитуды или общего уровня ВА-сигнала, раз; 4 – изменение длительности виброимпульса, раз.

Таким образом, выделяя информативные параметры ВА-сигнала по времени и частоте, измеряя их энергию, максимальную амплитуду, фазовые значения, можно оценить величину зазора между поршнем и гильзой цилиндра и некоторые другие структурные параметры, характеризующие состояние деталей ЦПГ двигателя. При этом для повышения устойчивости измерений весьма эффективно использование кепстрального анализа и линеаризации [15].

Параметры ВА-колебаний при оценке состояния поршневых колец являются функцией двух переменных — степени износа и скоростного режима декомпрессированного двигателя. При этом, с увеличением износа колец ВА-импульсы формируются при меньшей частоте вращения вала [6].

Структурными параметрами подшипниковых узлов *кривошипно-шатунного механизма* (КШМ) являются зазоры в подшипниках ко-

ленчатого вала и во втулке поршневой головки шатуна, осевой зазор в коренных подшипниках. Эти параметры определяют несущую способность подшипникового узла и давление в слое масла, условия трения и тепловыделения, расход масла [6, 8–11, 13].

На рабочих режимах вследствие изменения нагрузки на подшипники коленчатого вала центр шейки перемещается по сложной траектории. Вместе с тем, во время импульсного изменения линейной скорости вследствие воздействия процесса сгорания в сопряжении появляются удары, вызывающие деформации и ударное возбуждение ВА-колебаний от соударяющихся деталей. Скорость соударения и, следовательно, импульс удара и характеристики ВА-колебаний зависят в основном от зазора в подшипнике, характера индикаторной диаграммы и соотношения возмущающих сил в целом.

Результаты исследований различных ДВС показывают, что среднее значение максимальной амплитуды ВА-импульса в диапазоне частот, генерируемого шатунными и коренными подшипниками, с изменением зазора от начального до предельного увеличивается в 2...5 раз (см. таблицу).

При диагностировании механизма *газораспределения* к структурным параметрам относят зазоры между направляющими втулками клапана и его стержней, в подшипниках распределительного вала, между клапаном и приводом клапана [6, 8–10, 13]. С изменением теплового зазора существенно меняется интенсивность вибрации крышки головки блока в области проверяемого клапана. Для выделения ВА-импульсов, формируемых посадкой и подъемом клапанов, необходимо производить временную селекцию в соответствии с фазами газораспределения (см. таблицу).

К основным диагностическим параметрам *топливной аппаратуры* двигателей следует отнести цикловую подачу топлива  $\Delta g_n$  и угол опережения (зажигания) начала подачи топлива  $\varphi_n$ . При различных параметрах работы топливной аппаратуры (давление начала впрыска,  $\Delta g_n$ ,  $\varphi_n$ ) вибрационные характеристики форсунки существенно изменяются и на отдельных режимах тесно связаны с показателями работы системы высокого давления.

Сравнение характеристики топливоподачи и ВА-колебаний форсунки при различных подачах показывает, что огибающая ВА-импульса форсунки хорошо согласуется с осциллограммами подъема иглы форсунки, давления в трубопроводе высокого давления, характеризующего закон подачи. Энергия ВА-колебаний наиболее активно и закономерно изменяется при изменении регулировок топливного насоса (см. таблицу) [16]. Изменение  $\Delta g_n$  и  $\varphi_n$  приводит к изменению продолжительности, а также интенсивности ВА-колебаний в несколько раз [6].

Индикаторная диаграмма ДВС, ПК несет большую информацию о рабочем процессе, ТС и нагрузке ПМ. Получение диаграммы традиционными средствами с помощью датчиков давления, устанавливаемых в полость камеры сгорания или сжатия, отличается большой трудоемкостью, связанной, например, для дизельного двигателя, со сверлением отверстия в головке блока цилиндров. В то же время при обоснованном выборе места установки пьезоакселерометра на блок головки цилиндров ВА-сигнал адекватно характеризует индикаторную диаграмму. При этом количественные характеристики индикаторной диаграммы пропорциональны параметрам ВА-сигнала с точностью до коэффициентов, учитывающих конструктивные особенности двигателя, свойства материала головки, свойства способа крепления пьезоакселерометра [5, 10]. Измерение и анализ параметров ВА-сигнала, генерируемого силами давления газов, позволяет в эксплуатационных условиях определять жесткость протекания рабочего процесса [6].

Все используемые сегодня методы анализа ВА колебаний можно разделить на пять групп (рис. 1), наиболее развитым и исследованым из которых является выделение сигнала во временной области

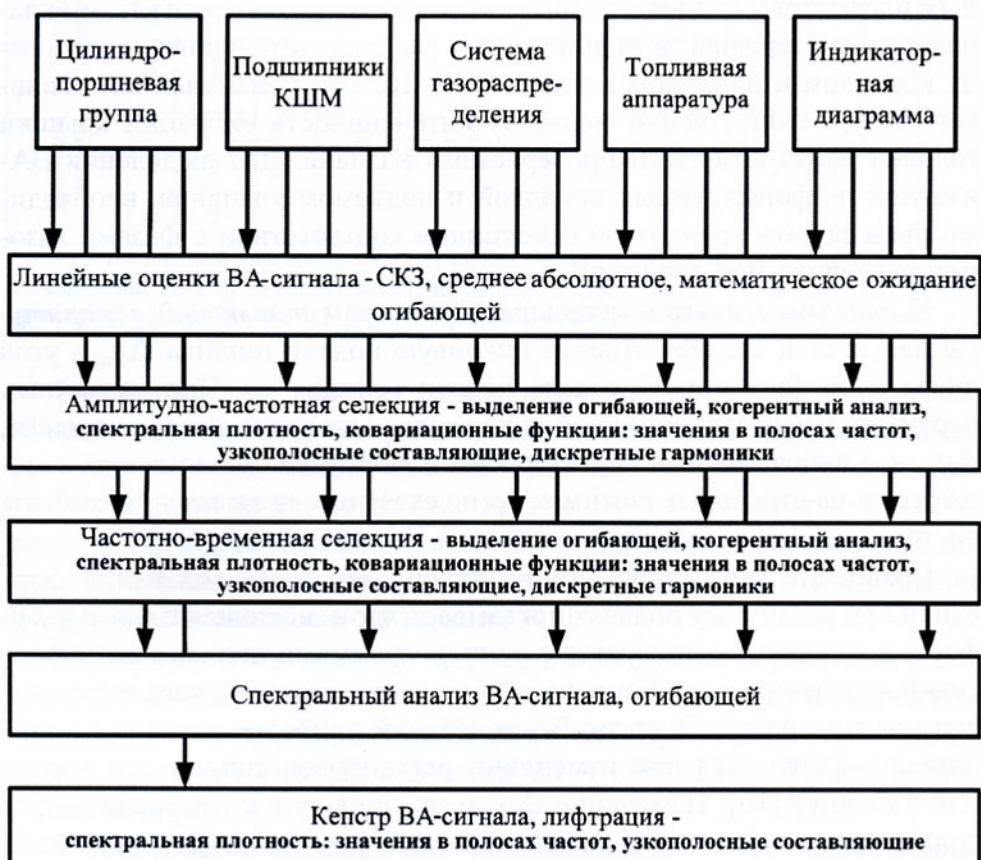


Рис. 1. Методы анализа ВА-сигнала

по углу поворота вала. При этом сигнал предварительно выделяется в определенной области частот и детектируется. Таким образом, анализгибающей во временной области является сегодня одним из основных методов контроля состояния элементов механизмов ПМ, который весьма эффективно используется и в системах КОМПАКС [1, 2].

Проведенный анализ результатов теоретических и практических исследований показывает, что источниками ВА-активности машин и механизмов являются различные силовые, чаще всего, статистически независимые воздействия (рис. 2). Все существующие источники можно с достаточной степенью условности разделить на импульсные (ударные) вынуждающие воздействия  $F_s$  (например, взаимодействие зубчатых пар, открытие и закрытие клапана), полигармонические вынуждающие воздействия  $F_g$  (например, момент несбалансированных масс) и шум  $F_n$ , возникающий вследствие трения контактирующих деталей или газогидродинамики.

Нелинейные взаимовлияния в механической системе взаимодействующих элементов приводят к перемножению и суперпозиции всех силовых взаимодействий  $F_g$ ,  $F_s$ ,  $F_n$  с весовыми функциями в виде импульсных характеристик  $h_g^s$ ,  $h_s^n$ ,  $h_n^g$ , соответствующих каждой паре силовых воздействий:

$$F_g^s = F_s F_g h_g^s, \quad F_s^n = F_n F_s h_s^n, \quad F_n^g = F_g F_n h_n^g.$$

При этом, импульсная характеристика  $h_g^s$  определяет степень взаимовлияния  $F_g$  и  $F_s$ ,  $h_s^n$  — степень взаимовлияния  $F_s$  и  $F_n$ ,  $h_n^g$  — степень взаимовлияния  $F_n$  и  $F_g$ . В результате формируются три группы силовых воздействий на элементы, детали, узлы машины (см. рис. 2):

$$F_{g\Sigma} = F_g + F_g F_n h_n^g + F_s F_g h_g^s, \quad F_{s\Sigma} = F_s + F_n F_s h_s^n + F_s F_g h_g^s,$$

$$F_{n\Sigma} = F_n + F_n F_s h_s^n + F_g F_n h_n^g.$$

Импульсные (ударные) вынуждающие воздействия  $F_{s\Sigma}$  возбуждают колебания  $S_{s\Sigma}$  на собственных (резонансных) частотах колебаний корпуса ПМ, элементов, деталей, узлов с учетом импульсной характеристики  $h_s(t)$  гармонические вынуждающие воздействия  $F_{g\Sigma} - S_{g\Sigma}$  с  $h_g(t)$ ; шум от трения, газогидроакустический шум  $F_{n\Sigma} - S_{n\Sigma}$  с  $h_n(t)$ . Математически колебательные процессы можно описать следующим образом (см. рис. 2):

$$\|S_\Sigma(t)\| = \begin{vmatrix} S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_n^s(t)] & S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_g^s(t)] \\ S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_n^g(t)] & S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_s^g(t)] \\ S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_s^n(t)] & S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_g^n(t)] \end{vmatrix}.$$

Анализ механизма формирования ВА-сигнала показывает, что, кроме источника ВА-колебаний, на параметры этих колебаний влияет передающая среда, которая включает пути (элементы) распространения

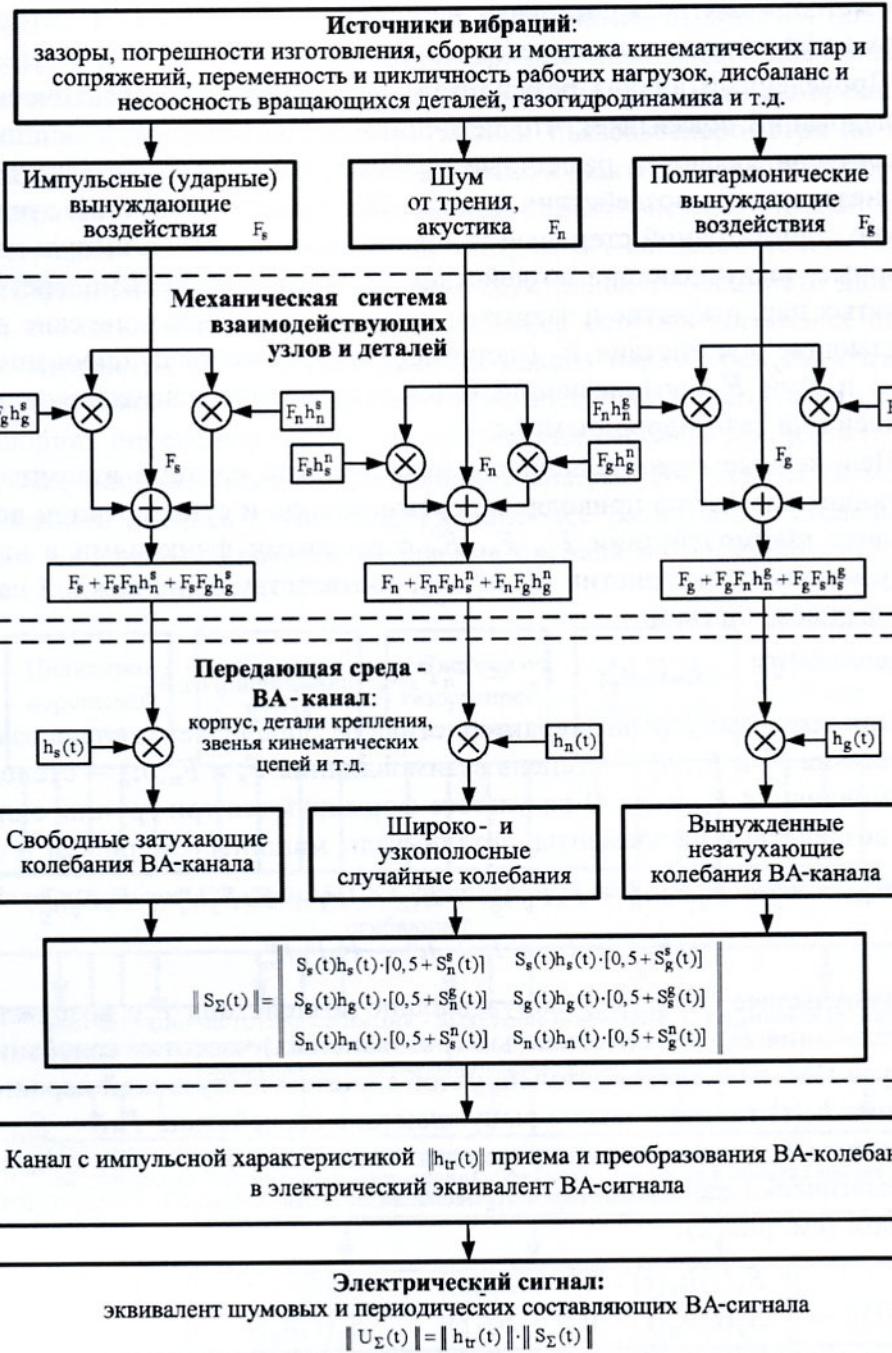


Рис. 2. Механизм формирования ВА-сигнала

колебаний до места приема колебаний, элементы передачи колебаний первичному преобразователю и свойства непосредственно чувствительного элемента первичного преобразователя (вибродатчика). С учетом импульсной характеристики канала преобразования, усиления  $h_{tr}(t)$  получим выражение, описывающее электрический сигнал на выходе датчика как эквивалент шумовых и периодических составляющих (ШПС) [1, 2] ВА-сигнала:

$$\|U_\Sigma(t)\| = \|h_{tr}(t)\| \cdot \|S_\Sigma(t)\| = \begin{vmatrix} h_{str}(t) & 0 & 0 \\ 0 & h_{gtr}(t) & 0 \\ 0 & 0 & h_{ntr}(t) \end{vmatrix} \times \\ \times \begin{vmatrix} S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_n^s(t)] & S_s(t)h_s(t) \cdot [0,5 + S_g^s(t)] \\ S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_n^g(t)] & S_g(t)h_g(t) \cdot [0,5 + S_s^g(t)] \\ S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_s^n(t)] & S_n(t)h_n(t) \cdot [0,5 + S_g^n(t)] \end{vmatrix},$$

где  $h_{str}(t)$ ,  $h_{gtr}(t)$ ,  $h_{ntr}(t)$  — импульсные характеристики канала от места приема ВА-сигнала до преобразования его в электрический сигнал для свободных затухающих, вынужденных незатухающих, широкополосных и случайных узкополосных колебаний ВА-канала соответственно.

В дальнейшем, ШПС, представляющие собой суммы колебательных процессов трех основных видов силовых воздействий и их взаимно модулированных компонентов, обрабатываются методами аналого-вой и цифровой обработки сигналов, включающими методы теории детерминированных и стохастических процессов.

Таким образом, на основе анализа теоретических и экспериментальных исследований в области ВА-диагностики ПМ сформирована модель ВА-колебаний ПМ (см. рис. 2) и представлены методы анализа этих колебаний (см. рис. 1) в целях формирования ДП-дефектов и неисправностей элементов, узлов, механизмов ПМ, в частности ДВС и ПК.

Предложенная модель и систематизированные методы анализа ВА-колебаний ПМ, а также описание ВА-сигналов в виде смеси ШПС [1, 2], ортогональность ускорения, скорости, перемещения ВА-колебаний и изменений их во времени, установленная в работах В.Н. Костюкова, позволяют сформировать направления дальнейших исследований в области диагностики ПМ и найти решение поставленных задач.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. К о с т ю к о в В. Н. Мониторинг безопасности производства. – М.: Машиностроение, 2002. – С. 93–103.

2. К о с т ю к о в В. Н., Б о й ч е н к о С. Н., К о с т ю к о в А. В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®) / Под ред. В.Н. Костюкова. – М.: Машиностроение, 1999. – 163 с.
3. С и д о р о в В. И., К о н ш и н В. М., Т у ч и н с к и й Ф. И. Эффективные методы экспресс-диагностирования машин // Строительные и дорожные машины. – 2001. – № 1. – С. 37–39.
4. С т а н и с л а в с к и й Л. В. Техническое диагностирование дизелей. – Киев, Донецк: Вища школа, 1983. – 136 с.
5. А л л и л у е в В. А., С о л о в'єв В. И. Исследования вибраакустических каналов цилиндропоршневой группы двигателя внутреннего сгорания // Записки ЛСХИ. – 1974. – Т. 229. – С. 29–33.
6. Диагностика автотракторных двигателей / Под ред. Н.С. Ждановского. Изд. 2-е, перераб. и доп. – Л.: Колос, 1977. – 264 с.
7. К а р п о в Л. И. Диагностика и техническое обслуживание тракторов и комбайнов / Под ред. Н.С. Ждановского. – М.: Колос, 1972. – 320 с.
8. Л у к а н и н В. Н. Шум автотракторных двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машиностроение, 1971. – 272 с.
9. П а в л о в Б. В. Акустическая диагностика механизмов. – М.: Машиностроение, 1971. – 224 с.
10. Т е х н и ч е с к а я эксплуатация машинно-тракторного парка / В.А. Аллилуев, Д.А. Ананьев, В.М. Михлин. – М.: Агропромиздат, 1991. – 367 с.
11. К о с т ю к о в В. Н., Н а у м е н к о А. П. Практика вибраакустической диагностики поршневых машин (статья) // Сб. науч. трудов по проблемам двигателестроения, посвященный 175-летию МГТУ им. Н.Э. Баумана / Под ред. Н.А. Иващенко, Л.В. Грехова. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – С. 30–35.
12. В и б р а ц и я в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 5. Измерения и испытания. – Под ред. М.Д. Генкина, 1981. – 496 с.
13. Г е н к и н М. Д., С о к о л о в а А. Г. Вибраакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
14. З и н ч е н к о В. И., З а х а р о в В. К. Снижение шума на судах. – Л.: Судостроение, 1968. – 140 с.
15. Д о ц е н к о Ю. Г. Разработка метода вибродиагностики деталей цилиндропоршневой группы двигателя на основе кепстрального анализа // Автореф. дис... канд. техн. наук. – М.: МАДИ (ТУ), 1996. – 20 с.
16. Диагностирование дизелей / Е.А. Никитин, Л.В. Станиславский, Э.А. Улановский и др. – М.: Машиностроение, 1987. – 224 с.

Статья поступила в редакцию 6.06.2007

## Авторы сборника “Двигатели внутреннего сгорания”



Николай Антонович Иващенко родился в 1940 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1968 г. Д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Крупный ученый в области моделирования процессов в двигателях внутреннего сгорания, автор около 200 научных работ, в том числе 12 учебников и монографий. Лауреат премии МГТУ им. Н.Э. Баумана, заслуженный деятель науки, действительный член Академии проблем качества РФ, председатель учебно-методической комиссии по специальности “Двигатели внутреннего сгорания”.

N.A. Ivashchenko (1940) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1968. D. Sc. (Eng.), professor, head of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Laureate of Prize of the Bauman Moscow State Technical University, Honored Worker of Science, full member of the RF Academy For Quality Problems, chairman of teaching-methodical commission on the specialty “Internal combustion engines”. Author of about 200 publications including 12 textbooks and monographs in the field of simulation of process in internal combustion engines.



Владимир Сергеевич Рогов родился в 1937 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1961 г. Канд. техн. наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 39 научных работ в области двигателей внутреннего сгорания, соавтор трех учебников, учебного пособия и трех авторских свидетельств. Победитель конкурса на лучшую научную работу по освоению природных ресурсов Западной Сибири и Тюменской области.

V.S. Rogov (1937) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1961. Ph. D. (Eng.), assoc. professor, deputy head of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Winner of the competition for the best scientific work on developing natural resources of West Siberia and Tyumen region. Author of 39 publications including 3 textbooks, an educational book, and 3 author's certificates in the field of internal combustion engines.



Андрей Сергеевич Кулешов родился в 1956 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1979 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Поршневые двигатели” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 40 научных работ в области математического моделирования и оптимизации рабочих процессов ДВС, смесеобразования и сгорания в дизелях, турбонаддува и термодинамического анализа ДВС.

A.S. Kuleshov (b. 1956) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1979. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Reciprocating Engines” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 40 publications in the field of mathematical simulation and optimization of working processes of internal combustion engines, carburetion and combustion in diesels, turbo-supercharging and thermodynamical analysis of internal combustion engines.



Александр Петрович Науменко родился в 1961 г. В 1984 г. окончил Омский политехнический институт в 1984 г. и аспирантуру кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1990 г. Канд. техн. наук, начальник учебного центра и лаборатории неразрушающего контроля, эксперт в области промышленной безопасности. НПЦ "Динамика". Автор более 70 научных, включая 10 авторских свидетельств и патентов РФ, 5 учебных пособий в области исследования методов диагностики и мониторинга технического состояния поршневых машин, включая поршневые компрессоры опасных производств и двигатели внутреннего сгорания.

A.P. Naumenko (b. 1961) graduated from the Omsk Polytechnic Institute in 1984. Ph.D. (Eng.), chief of the educational center and non-destructive testing laboratory of the Scientific and Production Center "Dinamika", expert in the field of industrial safety. Author of more than 70 publications including 10 author's certificates and patents of the Russian Federation, 5 educational books in the field of study of methods of diagnostics and monitoring of technical state of the reciprocating machines including reciprocating compressors for dangerous industrial productions and internal combustion engines.



Филипп Борисович Барченко родился в 1982 г., окончил в 2005 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Аспирант кафедры "Поршневые двигатели" МГТУ им. Н.Э. Баумана.

F.B. Barchenko (b. 1982) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2005. Post-graduate of "Reciprocating Engines" department of the Bauman Moscow State Technical University.

Андрей Иванович Потапов родился в 1972 г, окончил Тольяттинский политехнический институт в 1995 г. Инженер-конструктор систем управления двигателем ОАО "Димитровградский автоагрегатный завод", аспирант МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специализируется в области топливной аппаратуры и систем управления двигателями.

A.I. Potapov (b. 1972) graduated from the Togliatti Polytechnic Institute in 1995. Engineer-designer of engine control systems of the open joint-stock company "Dimitrovgradskiy avtoagregatny zavod", post-graduate of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of fuel apparatus and engine control systems.

Леонид Вадимович Грехов родился в 1951 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры "Поршневые двигатели" МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 114 научных работ в области топливной аппаратуры дизелей.

L.V. Grekhov (b. 1951) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1974. D. Sc. (Eng.), professor of "Reciprocating Engines" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 114 publications in the field of fuel apparatus of diesels.

# ВЕСТНИК

МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
имени Н.Э. Баумана

2007

СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК  
«Двигатели внутреннего сгорания»

*Посвящается 100-летию специальности*



СЕРИЯ  
**«МАШИНОСТРОЕНИЕ»**

**Главный редактор И.Б. ФЕДОРОВ  
Зам. главного редактора Т.И. ПОПЕНЧЕНКО  
Ответственный секретарь В.А. ТОВСТОНОГ**

**Редакционная коллегия:  
А.М. АРХАРОВ, В.Ф. ГОРНЕВ,  
К.Е. ДЕМИХОВ (главный редактор серии),  
В.Г. КИНЕЛЕВ, К.С. КОЛЕСНИКОВ, А.И. ЛЕОНТЬЕВ,  
О.С. НАРАЙКИН, М.И. ОСИПОВ, А.А. ПОЛУНГЯН,  
В.А. СВЕТЛИЦКИЙ, С.Т. СУРЖИКОВ,  
Г.П. ТРЕГУБОВ, В.И. УСЮКИН, К.В. ФРОЛОВ,  
И.Н. ШИГАНОВ, Е.Г. ЮДИН**

**Редакторы Е.А. ПЕТРОВА, Л.Ю. КЛОКОВА**

**Корректор Н.Е. АЛЕКСЮК**

**Художественное и графическое оформление С.С. ВОДЧИЦА,  
Н.Г. СТОЛЯРОВОЙ**

**Адрес редакции:**

**105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**Телефоны: (495) 263-62-60; 263-60-45; 263-67-98**

**Факс: (495) 261-45-97**

**E-mail: press@bmstu.ru**

**© МГТУ им. Н.Э. Баумана**

**Вестник Московского государственного технического университета. 2007**

# ВЕСТНИК

МОСКОВСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА  
имени Н. Э. Баумана

2007

Специальный выпуск  
Серия "Машиностроение"

Научно-теоретический  
и прикладной журнал  
широкого профиля

Издаётся с 1990 г.

Издательство МГТУ  
им. Н.Э. Баумана

## СОДЕРЖАНИЕ

Иващенко Н. А., Базанчук Г. А., Рогов В. С. 100 лет специальности "Двигатели внутреннего сгорания" в МГТУ им. Н.Э. Баумана .....	7
Кулецов А. С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 1. Расчет распределения топлива в струе .....	18
Кулецов А. С. Многозонная модель для расчета сгорания в дизеле. 2. Расчет скорости тепловыделения при многоразовом впрыске .....	32
Аntonюк П. Н. Распределение по размерам капель распыливаемой жидкости	46
Кавтарадзе Р. З., Гайворонский А. И., Федоров В. А. К вопросу применения закона теплоотдачи Ньютона при моделировании периодического теплообмена в поршневых двигателях .....	51
Кавтарадзе Р. З., Гайворонский А. И., Онищенко Д. О., Федоров В. А., Шибанов А. В. Расчетно-экспериментальное исследование теплового состояния поршня быстроходного дизеля, конвертированного на природный газ .....	70
Барченко Ф. Б., Иващенко Н. А. Расчет давления между поршневыми кольцами двигателя внутреннего сгорания .....	80
Науменко А. П. Методология виброакустической диагностики поршневых машин .....	85
Потапов А. И., Грехов Л. В., Малкин А. В. Разработка системы непосредственного впрыскивания бензина для малоразмерного отечественного двигателя .....	95
Девягин С. Н., Марков В. А., Микитенко А. В. Метод организации направленного движения воздушного заряда в камере сгорания дизеля ...	103
Иващенко Н. А., Марков В. А., Ефанов А. А., Зенин А. А., Девягин С. Н. Сравнительный анализ альтернативных топлив для дизелей	122
Еникеев Р. Д. Газодинамические методы снижения шума выпуска газа в двигателях внутреннего сгорания .....	138
Путинцев С. В., Анискин С. А., Иванов О. В. Моделирование параметров динамики, гидродинамики и трибологии поршня двигателя внутреннего сгорания .....	150
Вагнер В. А., Гвоздев А. М. Результаты испытания дизеля ВАЗ-341 на смеси дизельного топлива и диметилового эфира .....	157
Мягков Л. Л., Маластовский Н. С. Моделирование теплового состояния крышки цилиндра дизеля .....	162
Краснокутский А. Н., Трифонов Ю. Ю. Расчет коэффициентов концентрации напряжений в коленчатых валах транспортных двигателей .....	178

Маслов Ю. Л., Уйминов А. А., Лавров П. Б. Энергоустановка мощностью 8 кВт на древесных и растительных отходах на базе конвертируемых бензиновых агрегатов серии АБ .....	185
Иващенко Н. А., Маслов Ю. Л. Газопоршневые двигатели как источники энергии для больших городов .....	187
Баранов А. В., Вагнер В. А. Улучшение смазочных свойств масел при использовании солей мягких металлов .....	195
Авторы сборника "Двигатели внутреннего сгорания" .....	198
Рефераты статей .....	205
<b>CONTENTS</b>	
Ivashchenko N. A., Bazanchuk G. A., Rogov V. S. 100 Years Since Foundation of "Internal Combustion Engines" Specialty in Bauman Moscow State Technical University .....	7
Kuleshov A. S. Multi-zone Model for Calculation of Combustion in Diesel: 1. Calculation of Fuel Distribution in Jet .....	18
Kuleshov A. S. Multi-zone Model for Calculation of Combustion in Diesel: 2. Calculation of Heat Release Rate in Multiple Injection .....	32
Antonyuk P. N. Drop Size Distribution of Sprayed Fluid .....	46
Kavtaradze R. Z., Gaivoronskiy A. I., Fyodorov V. A. Concerning Problem to Apply Newton Law of Heat Emission in Modeling of Periodic Heat Exchange in Reciprocating Engines .....	51
Kavtaradze R. Z., Gaivoronskiy A. I., Onishchenko D. O., Fyodorov V. A., Shibanov A. V. Calculation and Experimental Studies of Thermal State of High-speed Diesel Piston Converted for Natural Gas .....	70
Barchenko F. B., Ivashchenko N. A. Calculation of Pressure between Piston Rings of Internal Combustion Engine .....	80
Naumenko A. P. Methodology of Vibration-acoustic Diagnostics of Reciprocating Machines .....	85
Potapov A. I., Grekhov L. V., Malkin A. V. Development of System of Direct Benzene Injection for Domestic Small-size Engine .....	95
Devyanin S. N., Markov V. A., Mikitenko A. V. Method of Organization of Directed Movement of Air Charge in Diesel Combustion Chamber ..	103
Ivashchenko N. A., Markov V. A., Yefanov A. A., Zenin A. A., Devyanin S. N. Comparative Analysis of Alternative Fuels for Diesels .....	122
Yenikeev R. D. Gas-dynamical Methods to Lower Noise from Discharge of Internal Combustion Engines .....	138
Putintsev S. V., Anikin S. A., Ivanov O. V. Modeling of Parameters of Dynamics, Hydrodynamics and Tribology of Piston of Internal Combustion Engines .....	150
Vagner V. A., Gvozdev A. M. Results of Tests of Diesel "VAZ-341" Operating on Mixture of Diesel Fuel and Dimethyl Ether .....	157
Myagkov L. L., Malastovskiy N. S. Simulation of Thermal State of Diesel Cylinder Head .....	162
Krasnokutskiy A. N., Trifonov Yu. Yu. Calculation of Coefficients of Stress Concentration in Crankshafts of Transport Engines .....	178
Maslov Yu. L., Uyminov A. A., Lavrov P. B. Electric Power Plant of 8 kWt Power Operating on Wood and Vegetable Wastes Based on Converted Benzene Aggregates of AB Series .....	185
Ivashchenko N. A., Maslov Yu. L. Gas Reciprocating Engines as Energy Sources for Large Cities .....	187
Baranov A. V., Vagner V. A. Improvement of Lubricating Properties of Oils by Using Salts of Soft Metals .....	195
Authors of the collected articles "Internal Combustion Engines" .....	198
Abstracts of Papers .....	205