

УДК 621.431.74 : 621.436.004.6

Безразборный контроль интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы дизелей

Е.П. Нечаев

Морская академия МГТУ, кафедра судовых энергетических установок

Аннотация. Представлен новый способ определения содержания железа в выпускных газах, разработанный и апробированный в лабораториях спектрального анализа и судовых двигателях внутреннего сгорания. Способ применим для контроля интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы дизеля для кратковременного режима обкатки.

Abstract. The new method of determining content of iron in the exhaust gases has been considered; it has been developed and approved in the laboratories of spectral analysis and vessel internal-combustion engines. The method can be applied for control of wear of components of cylinder-piston diesel group for the short-term regime of running-in.

Ключевые слова: безразборный контроль, обкатка, выпускные газы, смазочное масло, дизель
Key words: non-collapsible control, running-in, exhaust gases, lubricating oil, diesel

1. Введение

Необходимость разработки безразборного оперативного способа контроля интенсивности изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы (ЦПГ) дизеля в процессе приработки обоснована известным фактом: износ при обкатке может достигать 30 % от предельного за весь период эксплуатации (Владимиров, Гриншпун, 1982). Безразборное наблюдение за процессом приработки и оперативное вмешательство в обкатку обеспечивает не только безаварийность ввода дизеля в эксплуатацию, но и снижение начального износа деталей ЦПГ. В результате исследований по изучению информативности состава выпускных газов дизеля, проведённых в лабораториях судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и спектрального анализа, специально созданной при участии автора, был разработан новый экспрессный способ контроля интенсивности изнашивания деталей ЦПГ дизеля по содержанию железа (Нечаев и др., 1981).

2. Механизм попадания продуктов износа деталей ЦПГ в выпускные газы дизеля

Для обоснования представительности железа в выпускных газах, как наиболее информативного элемента продуктов износа деталей ЦПГ дизеля, прежде всего, необходимо выяснить механизм их переноса от рабочих поверхностей в выпускной коллектор. Решение поставленного вопроса невозможно без анализа условий работы исследуемых деталей.

Известно, что работа поршневых колец и цилиндрических втулок происходит в условиях высоких удельных давлений и температур при ограниченной смазке трущихся поверхностей (Венцель, Миронов, 1982). При этом температуры верхнего поршневого кольца находятся в пределах 250-420 °С и 200-260 °С – цилиндрической втулки в районе верхней мёртвой точки (ВМТ), удельные давления поршневых колец на втулку составляют 2,5-3,5 МПа (Асташкевич, 1972; Перч и др., 1984). В таких условиях микрочастицы износа трущихся поверхностей прирабатываемых деталей ЦПГ постоянно взаимодействуют с цилиндрическим маслом, играющим роль смазки и притирочной среды. При движении поршня вниз в подпоршневой области цилиндрической втулки большая часть смазочного масла с частицами износа деталей ЦПГ удаляется со стенок цилиндра в картер.

В процессах горения топлива и расширения газов смазочное масло, оставшееся на цилиндрической втулке над поршнем с продуктами износа деталей ЦПГ, интенсивно испаряется под действием высоких температур в камере сгорания. Одновременно следует отметить и то обстоятельство, что при перекачке поршня в мёртвых точках пропорционально частоте вращения наносятся знакопеременные удары по втулке цилиндра. Возникающая от этих ударов постоянная вибрация блока в процессе работы дизеля является фактором, способствующим отрыву частиц износа от рабочих поверхностей деталей ЦПГ. В подтверждение сказанному нами была составлена программа и проведён математический расчёт интенсивности испарения масла с деталей ЦПГ по циклам рабочего процесса (Нечаев, 1978). Расчёт показал, что основная масса смазочного масла в 4-тактном среднеоборотном дизеле испаряется в период горения топлива и расширения газов (от 150 до 270 град. п. к. в. цикла). Программа и результаты

расчётов приняты химмотологическим отделом Центрального научно-исследовательского Дизельного института (ЦНИДИ, г. Санкт-Петербург) по договору о творческом сотрудничестве.

Можно предположить, что в рассматриваемый период рабочего процесса в результате действия высокой температуры сгорания ~ 2000 °С происходит испарение и сгорание смазочного масла, содержащего продукты износа деталей ЦПГ с образованием аэрозоли, циркулирующей в камере сгорания. При движении поршня вверх с открытием выпускных клапанов газы с аэрозолями продуктов износа из камеры сгорания направляются в коллектор дизеля. По данным исследований (Faxvog, 1977), размеры аэрозолей в выпускных газах дизелей находятся в пределах 0,001-0,1 мкм. Подтверждением такой гипотезы являются экспериментальные данные американских учёных (Пинотти и др., 1967), которым удалось методом радиоактивных изотопов определить количественное соотношение продуктов износа, попадающих в выпускные газы и со смазочным маслом в картер дизеля. При этом установлено, что на частичных нагрузках $\approx 1/3$, а при полных нагрузках $\approx 2/3$ продуктов износа деталей ЦПГ дизелей уносится с выпускными газами. Наличие продуктов износа в выпускных газах дизелей подтверждается исследованиями Центрального научно-исследовательского института морского флота (ЦНИИМФ) (Дерюгина, 1971).

В лабораторных исследованиях нами выявлено, что количественное содержание продуктов износа в выпускных газах изменяется в соответствии с параметрами нагрузочно-скоростного режима работы дизеля (Нечаев, 1978). На основании этих данных можно предположить, что в картерное масло попадает ббльшая часть оставшихся продуктов износа деталей ЦПГ. Такие результаты свидетельствуют о высокой представительности содержания продуктов износа деталей ЦПГ в обеих средах-носителях (впускные газы и картерное масло) на любых нагрузочно-скоростных режимах.

На рисунке представлена качественная картина попадания продуктов износа в смазочное масло и выпускные газы дизеля.

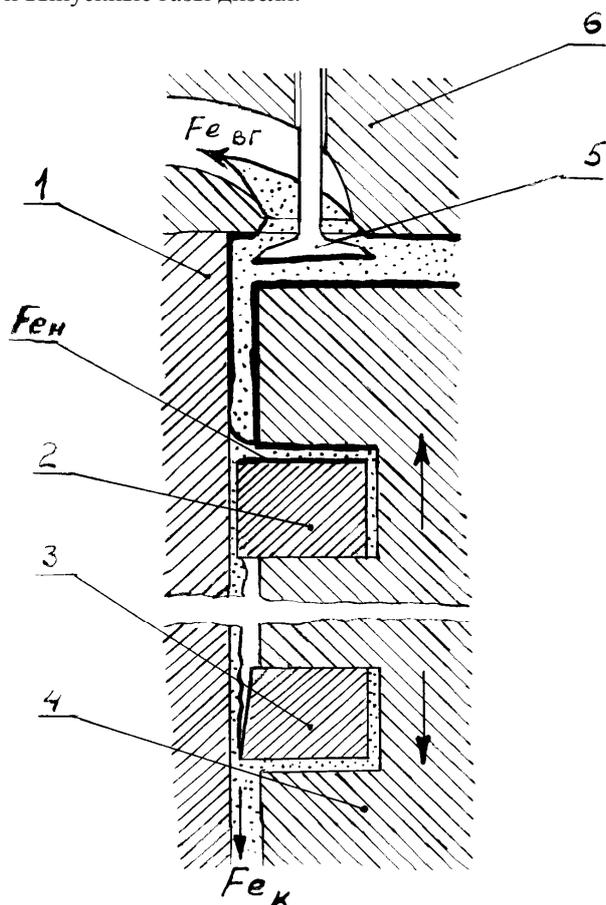


Рис. Механизм попадания продуктов износа деталей ЦПГ в смазочное масло и выпускные газы дизеля

1 – цилиндрическая втулка дизеля, 2 – верхнее поршневое кольцо, 3 – нижнее компрессионное кольцо, 4 – поршень, 5 – выпускной клапан, 6 – цилиндрическая крышка

Таким образом, установленный механизм попадания и количественного распределения продуктов износа деталей ЦПГ в выпускные газы и картерное масло дизеля является основанием для разработки экспрессного безразборного метода оценки интенсивности изнашивания деталей ЦПГ, что особенно актуально для контроля процесса приработки в режиме обкатки.

3. Обоснование и разработка экспрессного способа осаждения железа

Главную роль в получении своевременной информации об изменении интенсивности изнашивания деталей ЦПГ играет рациональный способ осаждения железа из выпускных газов дизеля. В этом направлении нами сделана попытка экспериментально оценить в лабораторных условиях существующие способы осаждения твёрдых частиц из аэрозолей. В специально созданной на судомеханическом факультете МГТУ лаборатории спектрального анализа, с использованием литературных источников, была проведена оценка существующих способов улавливания и анализа металлов аэрозолей с точки зрения возможности применения в судовых условиях.

Гравитационный способ осаждения. Используется свойство осаждения взвешенных частиц под воздействием силы тяжести при ламинарном движении газа. Экспериментальная проверка показала нецелесообразность такого способа улавливания из-за больших габаритных размеров осадительной камеры в ограниченном пространстве машинного отделения судна.

Способ сухого инерционного осаждения основан на принципе сохранения твёрдыми частицами прямолинейного движения при отклонении потока газа. Однако этот способ эффективен при размерах частиц более 0,1 мкм (*Стефановский и др.*, 1972). Следовательно, для улавливания продуктов износа, имеющих значительно меньшие размеры в выпускных газах дизелей (0,001-0,1 мкм), такое осаждение непригодно.

Электрическое осаждение считается одним из наиболее эффективных методов улавливания аэрозолей. Метод пригоден для частиц любых размеров, но для этого требуется напряжение 25 000-100 000 В, что является неприемлемым в судовых условиях из-за высоких напряжений и сложности оборудования.

Фильтрация. Этот метод применяется при осаждении твёрдых частиц неограниченных размеров при низкой стоимости оборудования и высокой способности осаждения.

Для результативной фильтрации необходимо соблюдать сочетание между размерами частиц износа с диаметром волокон фильтра и скоростью потока. В данном способе единой методики расчёта нет. Процесс осаждения обусловлен большим количеством типоразмеров фильтров, а точный теоретический расчёт фильтра связан со значительным числом переменных факторов. В свою очередь, создание оптимальных условий фильтрации продуктов выпуска связано с установкой и регулировкой дросселирующих устройств или объёмных расширителей, что может привести к искажению достоверности анализов. Всё это является причиной отказа применения данного метода в судовых условиях, однако фильтрацию мы успешно применяли в последующих лабораторных исследованиях.

Мокрое улавливание. Сущность данного способа заключается в том, что в поток газа оросителем впрыскивается жидкость, которая захватывает твёрдые частицы из потока и вместе с ними направляется в отделитель. В таком виде улавливание частиц, с нашей точки зрения, неприемлемо в судовых условиях из-за громоздкой и сложной конструкции системы улавливания, а также большого расхода дефицитной в морских условиях пресной воды. Помимо этого, трудности возникают и в процессе отделения частиц износа от большого количества воды.

Однако идея осаждения железа на каплях жидкости перспективна и может быть использована для водяных паров выпускных газов, количественное содержание которых у дизелей составляет около 5 %. При этом не требуется дополнительного орошения, а только лишь охлаждение выпускных газов. Такой метод мокрого улавливания вполне реализуем для заводских и судовых условий (*Нечаев*, 1978).

Итак, из всех рассмотренных способов осаждения продуктов износа из выпускных газов был выбран метод мокрого улавливания. В лабораторных исследованиях выявлено, что количественное содержание продуктов износа в выпускных газах изменяется в соответствии с параметрами нагрузочно-скоростного режима работы дизеля (*Нечаев*, 1999).

Таким образом, способ мокрого улавливания, который был принят за основу для отработки методики на судовых дизелях, является наиболее целесообразным.

4. Экспериментальная лабораторная установка способа осаждения железа

Для изучения возможности использования способа мокрого улавливания частиц железа в выпускных газах дизеля нами была создана лабораторная установка на базе одноцилиндрового отсека Ч 17,5/24 (NVD-24).

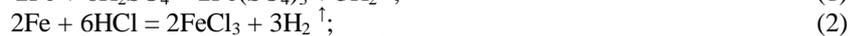
Разработанный способ осаждения продуктов износа и анализа на содержание железа по предложенной схеме состоит в следующем.

Отбираемые из газоотборного патрубка цилиндра выпускные газы имеют перед запорным краном температуру в пределах 200-150 °С. Проходя медную газоподводящую трубку, они охлаждаются до ~100 °С и направляются в водяной стеклянный холодильник. В холодильнике продукты выпуска

интенсивно охлаждаются снаружи циркулирующей водой до 20-25 °С. В этом случае капли образовавшегося конденсата захватывают частицы износа и осаждаются на стенках холодильника. Для торможения потока и улучшения осаждения внутренняя трубка холодильника выполнена из ряда последовательных конусообразных сужений и расширений. Затем конденсат стекает в сборник. С помощью разработанного способа достигнуто осаждение на стенках холодильника до 10 % продуктов износа деталей ЦПГ.

Применительно к данному устройству был разработан также способ смывания и количественного определения содержания железа. Смыв осевшего железа со стенок холодильника осуществлялся растворами нескольких кислот. В лабораторном эксперименте было апробировано три кислоты: серная, соляная и азотная.

Растворение железа в перечисленных кислотах идёт по следующим реакциям:



Эксперименты по растворению железа кислотами различных концентраций показали, что оптимальным с точки зрения техники безопасности, наименьшего времени растворения и последующего спектрального анализа является 20 %-й раствор азотной кислоты при минимальном её расходе 25 мг.

Количественное определение железа в полученном растворе апробировано известными физико-химическими методами (пламенной фотометрии и колориметрическими) с целью выбора наиболее целесообразного из них для применения в стендовых и судовых условиях.

Колориметрический метод основан на химической реакции взаимодействия родонита аммония с раствором, содержащим ионы железа Fe^{+3} , в результате чего возникает красное окрашивание с яркостью, пропорциональной содержанию железа в пробе.

Колориметрический способ определения железа является достаточно оперативным – время проведения анализа пробы не превышало 2 мин.

На этом принципе возможно осуществление экспрессного анализа двумя способами:

- грубо визуально по стандартным цветовым шкалам;
- точно с помощью фотоэлектроколориметра.

Визуальный способ является наиболее простым, не требующим никакого аппаратного обеспечения. При этом способе окраска испытуемого раствора $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3$ визуальна сравнивается с серией стандартных окрашиваний цветовой шкалы. При этом точность определения концентрации железа не превышает 10 % (Перч и др., 1984). Метод был нами апробирован и в силу своей простоты и оперативности рекомендован для грубой экспрессной оценки интенсивности изнашивания деталей ЦПГ в судовых условиях (Нечаев и др., 1978).

Способ фотоэлектроколориметрирования применяется для более точных анализов проб. С этой целью нами был апробирован фотоэлектроколориметр "ФЭК-М". Чувствительность прибора на содержание железа составляет 0,57 мг/м³ при точности измерения 5 %, что приемлемо для количественного определения продуктов износа по содержанию железа в режиме обкатки. Прибор компактен, прост в обслуживании и, после приобретения определённого навыка, может быть использован для оперативного контроля процесса обкатки ЦПГ дизеля в лабораторных, стендовых и судовых условиях.

Метод пламенной фотометрии основан на фотометрическом излучении элементов в пламени, позволяет производить измерения количественного содержания железа в пробах с высокой оперативностью и точностью (10⁻⁹ %). С этой целью нами опробован пламенный фотометр "ПФМ".

Для наиболее эффективного использования пламенной фотометрии при обработке проб, полученных способом мокрого улавливания, необходимо было отработать следующие вопросы:

- выбрать состав промывочной смеси, обеспечивающей наилучшую разрешающую способность пламенного фотометра;
- определить оптимальную температуру пламени и на основании этого подобрать газ для питания горелки;
- подобрать наилучший фильтр для определения спектра железа;
- подобрать оптимальные параметры работы пламенного фотометра для анализа проб на содержание железа.

При отработке метода необходимо было вначале подобрать горючий газ. Для горелок в приборах "ПФМ" используют: водород, бутан и ацетилен в смеси с воздухом или кислородом. При анализе проб наиболее важным параметром пламени является температура горения, которая для анализа на железо была определена из условий ионизации железа в пламени по реакции



При этом константа ионизации определена по уравнению:

$$K = \frac{[\text{Fe}^{+2}] \cdot [\text{e}^{-}]^2}{[\text{Fe}^{\circ}]} ; \quad (5)$$

$$\lg K = -5040 \frac{U}{T} + 2,5 \lg T - 6,49 + \lg \frac{g\text{Fe}^{+2}}{g\text{Fe}^{\circ}} , \quad (6)$$

где K – константа ионизации; U – энергия ионизации; T – абсолютная температура пламени; g – статистический вес.

Решением уравнения (6) относительно T найдена температура пламени для ионизации железа: $T = 2\,300$ К. Исходя из этого, для питания прибора "ПФМ" был выбран газ ацетилен, температура горения которого в воздухе $2\,500$ К.

Определяющим фактором в работе пламенного фотометра является тонкость распыла анализируемого раствора. Для этого величина среднего размера капли рассчитывалась по уравнению

$$d = \frac{583\sqrt{\sigma}}{U\sqrt{\gamma}} + 507 \left(\frac{\eta}{\sigma \cdot \gamma} \right)^{0,45} \cdot \left(\frac{1000g}{V} \right), \quad (7)$$

где d – диаметр капли (м); U – скорость потока газа (м/сек); V – скорость потока жидкости (м/сек); γ – плотность раствора (кг/м³); σ – поверхностное натяжение жидкости (н/м²); η – коэффициент вязкости раствора.

Анализ уравнения (7) показывает, что со снижением поверхностного натяжения уменьшается диаметр капель и улучшается распыл. Учитывая это, нами было исследовано влияние на качество распыла различных добавок в промывочную смесь, в результате чего оптимальной была принята добавка 5%-й уксусной кислоты, дающая наилучшие результаты по распылу анализируемых проб на содержание железа.

Поскольку в настоящем эксперименте использовался серийный прибор "ПФМ", предназначенный для анализа щелочных и щелочноземельных металлов, то для изучения проб на содержание железа в нём был установлен светофильтр типа ЗУФС-6 для выделения из пламени спектра железа, определяемого по линиям $(372; 386) \cdot 10^{-6}$ м.

С учётом этого обстоятельства была выбрана для растворения железа, осаждаемого на стенках холодильника, из трёх рассмотренных кислот – азотная, т.к. спектр азота среди других кислотных остатков наиболее удалён от анализируемой области. В этом случае исключаются помехи при анализе спектра железа.

Для анализа на железо прибор "ПФМ" был откалиброван по раствору $\text{FeCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в промывочной смеси с построением тарировочного графика в зависимости от величины фототока, регистрируемого по гальванометру прибора, а также от количественного содержания железа в пробе. С помощью такого графика по интенсивности фототока при сжигании проб, полученных мокрым осаждением из продуктов выпуска, легко определяется количественное содержание железа. Продолжительность обработки одной пробы на пламенном фотометре не превышала 5 мин.

Опытным путем для отработываемой схемы мокрого улавливания продуктов износа определён порог чувствительности для прибора "ПФМ" с учётом количественного содержания железа. Для взятия пробы требуется минимальное время работы двигателя 45 мин с одновременным осаждением продуктов износа в газоотборнике. При этом количественное содержание железа, осаждённого в пробоотборнике в единицу времени, соответствует интенсивности изнашивания деталей ЦПГ. Контролируя таким образом режим обкатки, можно оценивать приработку деталей цилиндро-поршневой группы дизеля.

В итоге полное время отбора (45 мин) и анализа (5 мин) пробы по разработанной методике составило 50 мин. Такая продолжительность определения интенсивности изнашивания приработываемых деталей ЦПГ – наименьшая среди всех рассмотренных. Так, например, известный существующий способ отбора и анализа проб спектральным способом проводится в течение 6-8 часов (Кюрегян, 1966).

Одновременно следует отметить преимущество разработанной методики: отбор проб из газоотводящих цилиндрических патрубков до общего коллектора позволяет контролировать интенсивность изнашивания деталей ЦПГ каждого цилиндра. Такое техническое решение имеет существенное преимущество перед методом анализа смазочного масла, отобранного из циркуляционной системы, куда попадают продукты износа всех деталей дизеля. Это особенно важно в случае обкатки после аварийного ремонта при замене деталей отдельных цилиндров.

Проведённые экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

– для режимов обкатки дизелей в судовых и стендовых условиях наиболее приемлемым является метод мокрого улавливания продуктов износа с последующим анализом проб на содержание железа с помощью цветовой шкалы и фотоэлектроколориметра;

– для более точных анализов проб и определения количественного содержания железа в режиме обкатки дизелей в лабораторных и заводских условиях рекомендуется метод пламенной фотометрии.

5. Заключение

Результаты лабораторных исследований убедительно показывают существенные преимущества разработанного в МГТУ нового способа контроля процесса обкатки дизелей на основе комплексного анализа продуктов износа в выпускных газах и смазочном масле. Результаты визуального осмотра и взвешивания поршневых колец подтверждают эффективность безразборного способа контроля износа. Экспрессный анализ проб позволяет наблюдать за интенсивностью изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы и оперативно вносить изменения в режим обкатки дизеля.

Литература

- Fahvog F.R.** New laser particle sizing instrument. *SAE Prepr.*, N 770140, 6 p., 1977.
- Асташкевич Б.М.** Механизм изнашивания деталей цилиндро-поршневой группы тепловозных дизелей. *Сб. ст. Повышение износостойкости деталей ДВС. Под ред. М.М. Хрущёва, М., Гос. НИИ Машиностроения*, с. 5-12, 1972.
- Венцель С.В., Миронов Е.А.** Спонтанные процессы, протекающие на смазанных поверхностях трения. *Трение и износ*, т. 3, № 1, с. 100-107, 1982.
- Владимиров В.А., Гриншпун Н.Е.** Обкатка судовых дизелей. *М., Транспорт*, 159 с., 1982.
- Дерюгина Л.А.** Оценка динамики износа деталей ЦПГ малооборотных дизелей без разборки цилиндров. *Техническая эксплуатация флота: Судовые силовые установки. Труды ЦНИИ мор. флота*, вып. 142, с. 43-49, 1971.
- Кюрегян С.К.** Оценка износа двигателей внутреннего сгорания методом спектрального анализа. *М., Машиностроение*, 152 с., 1966.
- Нечаев Е.П.** Диагностика по продуктам износа и эксплуатационное легирование дизелей. *М., Рыб. хоз-во, ВНИЭРХ*, вып. 2, 40 с., 1999.
- Нечаев Е.П. и др.** Результаты исследований по поиску оптимальной обкатки судового вспомогательного дизеля. *Труды Калинингр. техн. ин-т рыб. пром-сти и хоз-ва*, вып. 77, с. 12-16, 1978.
- Нечаев Е.П.** Контроль режимов обкатки дизеля по содержанию железа в выхлопе. *Рыб. хоз-во, ЦНИИТЭИРХ*, вып. 4, с. 12-18, 1978.
- Нечаев Е.П., Олейников Б.И., Панков А.М.** Способ диагностики дизеля. А.с. 800749 СССР, МКИ G 01 L 23/22. № 2707760; заявл. 04.01.79; опубл. 30.01.81, Бюл. № 4. *Открытия. Изобретения*, № 4, с. 40, 1981.
- Перч В.Д., Петриченко Р.М., Шабанов А.В.** Мгновенная сила трения поршневого уплотнительного кольца. *Двигателестроение*, № 3, с. 7-9, 1984.
- Пинотти П., Джонс Д., Стивенсон С.** Исследование износа радиоактивного поршневого кольца на судовом дизеле мощностью 6000 э.л.с. *Сб. ст. Судовые малооборотные дизели с турбонаддувом. Под ред. Н.Н. Иванченко, Л.*, с. 373-391, 1967.
- Стефановский Б.С., Скобцов Е.А., Корси Е.К.** Испытания двигателей внутреннего сгорания. *М., Машиностроение*, 368 с., 1972.