

**Ключові слова:** екологізація робочого циклу, внутрішньоциліндровий каталіз, каталітичні покриття, токсичність відпрацьованих газів.

The main directions in increasing the environmental efficiency of working cycle in ICE are considered. The most promising direction is in-cylinder catalysis. The influence of the catalytic coating in the combustion chamber of ICE on the level of environmental performance of engine is analyzed. The major directions and tasks that need to be solved for the overall improvement of these indicators are proved.

**Key words:** environmental efficiency, in-cylinder catalysis, catalytic coatings, exhausts gases emissions.

УДК 621. 43. 016

**А. В. ТРИНЁВ**, канд. техн. наук, доц. НТУ «ХПИ»;

**Е. В. СИНЯВСКИЙ**, студент НТУ «ХПИ»

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ИЗМЕНЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ЦИЛИНДРЕ АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ**

Уточнение математической модели теплонапряженного состояния деталей клапанного узла быстроходного дизеля при задании переменной механической нагрузки для переходных режимов сброс-наброс нагрузки осуществляется путем проведения моторного эксперимента и записи законов изменения давления в цилиндре ДВС в цифровой форме.

**Ключевые слова:** давление, измерительный комплекс, эксперимент, переходной режим, датчик.

**Введение.** Известно, что определение в моторном эксперименте законов изменения давления в цилиндрах ДВС является наиболее эффективным и точным средством для нахождения таких показателей как индикаторное давление, индикаторная мощность, жесткость рабочего процесса. Такие эксперименты, кроме уточнения параметров рабочего процесса, играют значительную роль и при исследовании теплонапряженного состояния (ТНС) деталей камеры сгорания (КС). Индикаторный давление является определяющим фактором при задании граничных условий (ГУ) задачи механики напряженно-деформированного состояния деталей КС. При этом в большинстве проведенных ранее исследований ТНС на установившихся режимах для оценки влияния механической составляющей задается максимальное давление цикла  $P_z$ , которое принимается постоянным на данном расчетном режиме. На переходных режимах этот параметр также является основным наряду с длительностью переходного режима.

Определение законов изменения давления в цилиндре ДВС проводится путем записи и обработки индикаторных диаграмм. Длительное время методика таких экспериментов предполагала использование осциллографов с

выводом информации на фотопленку или фотобумагу. Запись мгновенных значений давления в цилиндрах (одноцикловых диаграмм) осуществляется электрическими индикаторами, в состав которых входят датчики давления и регистрирующие устройства. Давление в цилиндрах записывают как функцию времени, угла поворота коленчатого вала ДВС, на поле диаграммы наносят отметки ВМТ или моменты впрыска топлива.

При разработке и уточнении математической модели (ММ) нестационарного ТНС клапанного узла основной интерес представляют, главным образом, эксперименты, связанные с моделированием переходных процессов сброса-наброса нагрузки, характерных для автотракторных ДВС. Переходные процессы сопровождаются резко нарастающим подводом тепловой энергии, резкими изменениями механической нагрузки – давление в цилиндре. В этих процессах отмечаются наибольшие амплитуды осциллирующих растягивающих напряжений, что в результате и приводит к накоплению повреждений и к выходу деталей КС из строя [1, 2]. Проблема заключается в точном задании законов изменения механической нагрузки во время переходного процесса. С учетом поставленной проблемы рассмотрим результаты ранее проведенных расчетно-экспериментальных работ.

**Анализ последних достижений и публикаций.** В работе [1] приведено описание моторного эксперимента с моделированием изменения индикаторного давления на переходных режимах сброс-наброс нагрузки тракторного дизеля Д-37Е. На рис. 1 показано характер изменения максимального давления  $P_z$  в цилиндре дизеля в переходном процессе наброса нагрузки от режима с  $n = 1950 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N_e = 2,6 \text{ кВт}$  до номинального режима с  $n = 1700 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N_e = 37 \text{ кВт}$ . Наброс нагрузки осуществляется за 0,33 с.

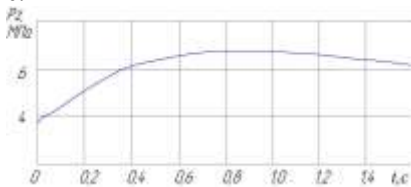


Рис. 1 – Изменение максимального давления  $P_z$  при резком набросе нагрузки [1]

В проведенном исследовании запись индикаторного давления (индикаторных диаграмм) на переходных режимах проводилась на осциллограф с последующей их обработкой.

В условиях эксплуатации переходные режимы часто являются комбинированными, состоят из процессов различных типов, при которых ДВС переходит от одного переходного процесса к другому без выхода на установившийся режим. При этом в исследовательских испытаниях из всей совокупности переходных процессов выбирают наиболее значимые и характерные (пуск, разгон за счет увеличения цикловой подачи, резкий наброс нагрузки). Известные методики таких исследований, описанные в работе [1], предполагают непрерывную

регистрацию на протяжении всего переходного процесса средних за цикл значений отдельных параметров (крутящего момента, частоты вращения, давления наддува, расхода воздуха, температуры деталей КС и др.) и периодическую регистрации внутренних цикловых колебаний других параметров (индикаторное давление, давление топлива перед форсункой).

Прогресс в области электроники, появление многоканальных быстродействующих аналого-цифровых преобразователей (АЦП) значительно расширили возможности современных аппаратных средств. Особенно значительное ускорение в исследовательских экспериментальных работах дало использование автоматизированных систем на базе ПК. При этом открываются большие возможности в оперативной регистрации и обработке быстроменяющихся процессов в ДВС. Так для исследования и доводки газового малолитражного быстроходного ДВС был разработан автоматизированный стенд для исследования рабочего процесса, описание которого приводится в работе [3]. Структурная схема измерительного комплекса представлена на рис 2.

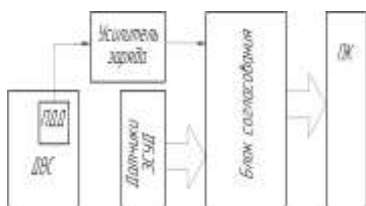


Рис. 2 – Структурная схема измерительного комплекса [3]

В данном случае сигналы штатных датчиков электронной системы управления двигателем (ЭСУД) и пьезоэлектрического датчика давления (ПДД) через усилитель заряды поступают в блок согласования, в котором происходит преобразование и нормирование сигналов по уровню. Далее с помощью АЦП сигналы оцифровываются и поступают в компьютер. Используется программное

обеспечение Power Graph, имеющее расширенные функции предварительной настройки. Это позволяет настроить канал измерения давления на отображение сигнала в МПа для адекватного восприятия сигнала в ходе эксперимента.

При выборе формы КС для быстроходных малолитражных дизелей (совместные исследования КП ХКБД, НТУ "ХПИ", ХНАДУ) на одноцилиндровом моторном стенде, эффективность вариантов оценивалась по изменению и индикаторных показателей, температуры и токсичности отработавших газов [4]. В экспериментах также определялось давление топлива перед форсункой, положение отметки ВМТ, мгновенная температура отработавших газов. Регистрация указанных параметров проводилась с использованием АЦП фирмы L-Card. Для измерения давлений использовались пьезодатчики. Обработка, визуализация и анализ поступающих от датчиков сигналов на АЦП проводились с помощью лицензионной версии программы Power Graph.

Таким образом, можно считать, что наиболее совершенным методом определения индикаторного давления и других быстроменяющихся величин является регистрация и обработка информации с помощью АЦП и ПК. Полученная уточненная информация о характере изменения механической нагрузки на детали КС, в частности клапанного узла, позволяет более точно учитывать влияние переходных режимов на ТНС этих деталей и прогнозировать их моторесурс.

**Цель и постановка задачи.** Целью исследования является уточнение нестационарной ММ напряженно-деформированного состояния деталей клапанного узла, определение роли механической составляющей на переходных режимах в возникновении дефектов и снижении ресурса узла.

Для достижения поставленной цели на экспериментальном этапе исследования предполагалось решить такие задачи:

- разработать схему измерительного комплекса для измерения индикаторного давления в одноцикловых диаграммах с использованием АЦП и ПК;
- отработать методику измерения индикаторного давления с помощью тензодатчиков и регистрации давления в цифровой форме;
- подготовить и провести моторный эксперимент на переходных и установившихся режимах.

**Методика проведения эксперимента.** Для измерения индикаторного давления были использованы тензометрический преобразователь давления Д1, отметчик ВМТ индуктивного типа Д2, усилитель тензометрический на несущей частоте 8АНЧ-23, АЦП и ПК. Структурная схема измерительного комплекса представлена на рис. 3.

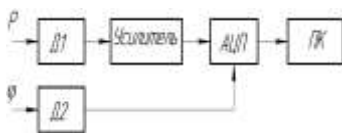


Рис. 3 – Структурная схема измерительного комплекса

Как известно, принцип работы тензодатчиков заключается в изменении электрического сопротивления проводника при его механическом деформировании. Основной характеристикой чувствительности материала проводника к механической деформации является отношение относительного изменения

сопротивления к относительному изменению длины проводника (коэффициент относительной чувствительности  $k$ ). Сопротивление тензорезистора должно быть стабильным во времени, иметь малый температурный коэффициент сопротивления. При этом допустимые значения напряжений не должны превышать 20 - 30% границы упругости материалов проводника и самой деформируемой детали. Конструкция тензорезисторного датчика, использованного в эксперименте показана на рис. 4. На кафедре ДВС НТУ "ХПИ" разработано несколько вариантов таких преобразователей,

которые успешно ранее применялись для записи индикаторного давления на автотракторных и тепловозных ДВС.



Рис. 4 –  
Тензометрический  
преобразователь

Датчик имеет жидкостное автономное охлаждение и устанавливается в индикаторный канал, специально выполненный в головке цилиндров дизеля.

В качестве датчика ВМТ использовался индукционный преобразователь с зубчатым ферромагнитным ротором. Для преобразователей этого типа характерна относительно высокая чувствительность, что позволяет проводить измерения незначительных перемещений, скоростей, ускорений, которые изменяются с частотой до 15 кГц, погрешность измерений не превышает 0,15 – 0,20%. Выходной сигнал датчика ВМТ непосредственно поступает на АЦП и в дальнейшем используется для синхронизации его работы.

Выходной сигнал от тензодатчика подается вначале на усилитель 8АНЧ-23 с несущей частотой 20 кГц. Аппаратура рассчитана на работу с тензорезисторами с номинальным сопротивлением от 250 до 400 Ом, схема включения – “полумост” или “полный мост”.

При использовании АЦП в экспериментальных исследованиях ДВС, в частности для записи одноцикловых индикаторных диаграмм, основным его режимом является режим аналогового осциллографа. С этой целью чаще используются конвейерные и сигма-дельта преобразователи, которые, согласно принятой классификации, относятся к АЦП последовательного и параллельно-последовательного преобразования. На основе проведенного анализа особенностей различных типов АЦП, а также с учетом практического опыта их использования при исследованиях ДВС и диагностировании, для проведения моторного эксперимента был выбран 12-ти разрядный АЦП USB Autoscope 2 с такими основными характеристиками: количество аналоговых входов – 8; количество каналов осциллографа – 1, 2, 4, 8 (на выбор); разрешение – 12 bit; диапазон измеряемых напряжений от  $\pm 15$  В до  $\pm 50$  кВ; операционные системы – Windows 98, Windows 2000/XP, Windows Vista/ Windows 7; возможности программного обеспечения – режим отображения + запись + измерения в реальном масштабе времени.

При построении программы эксперимента для переходных и установившихся режимов были учтены рекомендации, изложенные в работе [1]. Как отмечается, среди разнообразных и возможных в эксплуатации переходных процессов можно выделить такие наиболее характерные.

Во-первых, это переходные процессы, вызванные изменением цикловой подачи за счет перемещения регулирующего органа. В данном случае основным параметром, влияющим на характер переходного процесса,

является относительное изменение топливоподачи, а дополнительными – период (длительность) изменения топливоподачи и характер изменения крутящего момента от частоты вращения коленчатого вала.

Во-вторых, это переходные процессы, вызванные изменением момента сопротивления. Определяющим фактором в данном случае является относительное изменение цикловой подачи в зависимости от частоты вращения коленчатого вала или времени.

Программа моторных испытаний представлена в табл.

Программа моторных испытаний предполагала запись индикаторного давления на режиме, близком к холостому ходу, и на режимах, близких к номинальному. Предполагалась также регистрация процессов сброса и наброса нагрузки дизеля в пределах указанных режимов. При этом постоянной (по возможности) поддерживалась частота вращения коленвала как на установившихся, так и на переходных режимах. В табл. указаны:  $n$  – частота вращения коленчатого вала,  $\text{мин}^{-1}$ ;  $P_T$  – усилие на тормозном устройстве, кгс;  $M_e$  – эффективный крутящий момент,  $\text{Н}\cdot\text{м}$ ;  $N_e$  – мощность двигателя, кВт;  $\Delta t$  – длительность режима, с. Объект исследования – дизель СМД-25 (4ЧН12/14). Работу дизеля обеспечивали системы: запуска, нагрузки и прокрутки, воздухообеспечения с газотурбинным наддувом, охлаждения, смазки, управления работой дизеля, контрольно-эксплуатационных и специальных измерений.

Таблица – Программа моторного эксперимента

| № реж. | $n$ , $\text{мин}^{-1}$ | $P_T$ , кгс                                    | $M_e$ , $\text{Н}\cdot\text{м}$ | $N_e$ , кВт·час | $\Delta t$ , с |
|--------|-------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------|
| 1      | 2                       | 3                                              | 4                               | 5               | 6              |
| 1      | 1500                    | 75                                             | 526                             | 82,6            | 300            |
| 2      | 1500                    | Сброс нагрузки $P_T$ от 75 до 25 кгс           |                                 |                 | 10             |
| 3      | 1500                    | 25                                             | 175                             | 25,57           | 300            |
| 4      | 1500                    | Наброс нагрузки $P_T$ от 25 до 75 кгс          |                                 |                 | 10             |
| 5      | 1500                    | 75                                             | 526                             | 82,6            | 300            |
| 6      | 1500                    | Сброс нагрузки $P_T$ от 75 до 10 кгс           |                                 |                 | 10             |
| 7      | 1500                    | 10                                             | 70,3                            | 11              | 300            |
| 8      | 1500                    | Наброс нагрузки $P_T$ от 10 до 75 кгс          |                                 |                 | 10             |
| 9      | 1500                    | 75                                             | 256                             | 82,6            | 300            |
| 10     | 1500                    | Сброс нагрузки $P_T$ от 75 до 25 кгс до 10 кгс |                                 |                 | 20             |
| 11     | 1500                    | 10                                             | 70,3                            | 11              | 300            |
| 12     | 1500                    | 25                                             | 175                             | 25,57           | 300            |
| 13     | 1500                    | 10                                             | 70,2                            | 8,8             | 300            |
| 14     | От 1200 до 2000         | Наброс нагрузки $P_T$ от 10 до 75 кгс          |                                 |                 | 12             |
| 15     | От 2000 до 1200         | Сброс нагрузки $P_T$ от 70 до 25 кгс до 10 кгс |                                 |                 | 12             |

На начальном этапе исследования была проведена статическая тарировка тензодатчика с записью и обработкой сигнала на ПК. С этой целью

тензодатчик подключался к гидравлическому грузопоршневому стенду. Полученный сигнал после усиления и обработки в АЦП выводился на экран ПК (горизонтальная линия), определялся масштаб записи. Как правило, для определения масштаба записи к преобразователю давления прикладываются известные давления. Изменяя эти нагрузки в диапазоне, характерном для данного ДВС, отмечают соответствующие отклонения горизонтальных линий на экране осциллографа или ПК, составляют шкалу масштабов для преобразователя и определяют в результате коэффициент преобразования. Обработкой результатов тарирования в нашем случае был определен такой, который составил  $k = 101$ .

Необходимо отметить, что при моделировании переходных процессов с  $n = \text{const}$  наблюдались отклонения частоты вращения от заданной в программе  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ , что можно объяснить несовершенством моторного стенда, его непригодностью для моделирования переходных режимов с резкими сбросами - набросами нагрузки. В нашем случае использовалось гидравлическое нагрузочное устройство, которое отличается сравнительно высокой инерционностью. По этой причине в эксперименте удалось смоделировать относительно медленные переходные режимы с длительностью от 10 до 20 с. При этом выход на установившийся тепловой режим занимал от 240 до 360 с.

Отдельные результаты обработки полученных экспериментальных данных представлены на рисунках.

Так на рис. 5 показано характер изменения максимального давления  $P_z$  во времени на установившихся режимах № 3, 5, 7, 9 и 13.

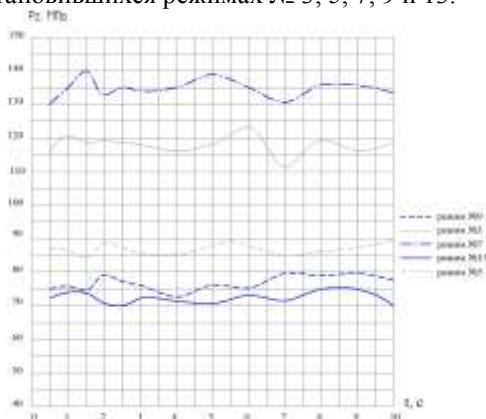


Рис. 5 – Изменение давления  $P_z$  на установившихся режимах

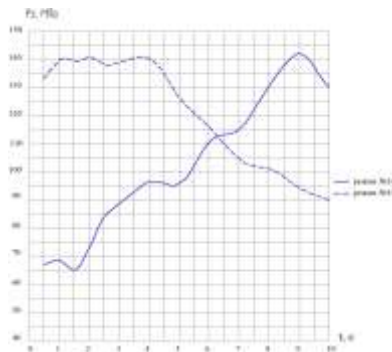


Рис. 6 – Изменение давления  $P_z$  на переходных режимах № 14 та № 15

На рис. 6 показано изменение максимального давления на переходных режимах № 14 № 15, протекающих с одновременным изменением нагрузки и частоты вращения дизеля.

Результаты проведенных моторных испытаний были в дальнейшем использованы для построения управляющих функций, которые задают законы изменения механической нагрузки (давления  $P_z$ ) в нестационарной ММ напряженно-деформированного состояния деталей клапанного узла быстроходного автотракторного дизеля.

**Выводы.** В результате проведенного экспериментального исследования можно отметить:

- разработана и реализована в моторном эксперименте методика регистрации в цифровой форме одноцикловых индикаторных диаграмм с использованием тензометрического преобразователя давления, АЦП и ПК;
- получены зависимости изменения давления  $P_z$  во времени для переходных и установившихся режимов, которые могут быть использованы для уточнения ММ ТНС деталей клапанного узла быстроходного автотракторного дизеля.

**Список литературы:** 1. Костин А. К. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник / А. К. Костин, Б. П. Пугачёв, Ю. Ю. Кочинев. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1989. - 284 с. 2. Современные дизели: повышение топливной экономичности и длительной прочности: Под ред. А. Ф. Шеховцова / Ф. И. Абрамчук, А. П. Марченко, Н. Ф. Разлейцев, Е. И. Третьяк, А. Ф. Шеховцов, Н. К. Шокотов. - К.: Техника, 1992. - 272 с. 3. Пойда А. Н. Автоматизированная система исследования и диагностирования автотракторных двигателей / А. Н. Пойда, Д. Г. Сивых / Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. Научно-техн. Журнал. – Харьков, НТУ "ХПИ" - 2003. - №1. – с. 125-132. 4. Грицюк А. В. Исследование двухфазного впрыскивания топлива в высокооборотном малолитражном дизеле серии ДТА / А. В. Грицюк, А. Н. Врублевский, А. А. Прохоренко, А. Н. Севастьянов // Двигатели внутреннего сгорания: Всеукр. Научно-техн. Журнал. – Харьков, НТУ "ХПИ" - 2010. - №2. – с. 13-18.

Поступила в редколлегию 24.04.2013

**Исследование законов изменения максимального давления в цилиндре автотракторного дизеля/ А. В. Тринёв, Е. В. Сияевский** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Транспортне машинобудування. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – № 31 (1004). – С. 116–123. – Бібліогр.: 4 назв.

Уточнення математичної моделі теплонапруженого стану деталей клапанного вузла швидкохідного дизеля при заданні змінного механічного навантаження для перехідних режимів скидання-накидання навантаження здійснюється шляхом проведення моторного експерименту і запису законів зміни тиску в циліндрі ДВС в цифровій формі.

**Ключові слова:** тиск, вимірювальний комплекс, експеримент, перехідний режим, датчик.

Clarification of the mathematical model of heat-stressed state of parts valve assembly speed diesel engine by setting the variable mechanical load transient load-on-reset is performed by means of a motor experiment and write the laws of change of pressure in the cylinder internal combustion engine in digital form..

**Key words:** pressure, measuring system, experiment, transition mode, the sensor.

## **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМАХ**

**В. П. ОЛЬШАНСЬКИЙ**, д-р. фіз.-мат. наук, проф. ХНТУСГ, Харків;  
**С. В. ОЛЬШАНСЬКИЙ**, канд. фіз.-мат. наук, доц. НТУ «ХПІ»

### **ПРО МОДЕЛІ КОЛИВАНЬ ОСЦИЛЯТОРА ЗМІННОЇ МАСИ**

В функціях Бесселя отримано розв'язок рівняння вільних коливань осцилятора, маса якого змінюється в часі за показниковим законом. Проаналізовано особливості коливань, які зумовлені змінною масою осцилятора.

**Ключові слова:** осцилятор змінної маси, коливання, показниковий закон, функції Бесселя.

**Вступ.** Є випадки, коли технологічним процесом передбачені зміни у часі маси певних елементів машин або технічних пристроїв. Це, зокрема, завантаження та розвантаження сипкими речовинами бункерів і кузовів вантажних автомобілів, заповнення рідинами мобільних цистерн та ін. Якщо маса, що змінюється у часі, є підресореною, то це впливає на коливання. Зазвичай, при повільному збільшенні або зменшенні маси, нехтують цим впливом, приймаючи сталими характеристики коливальної системи. Але є випадки порівняно швидкої зміни маси, коли треба враховувати вплив зміни маси на коливання. Саме на них орієнтоване це дослідження.

**Огляд публікацій з проблеми.** Одним із перших, хто вивчав коливальний рух тіла змінної маси був І.В. Мещерський [1]. Він у аналітичному вигляді одержав розв'язок рівняння малих вільних коливань математичного маятника, припускаючи, що маса маятника є лінійною функцією часу. Рух маятника описано за допомогою функцій Бесселя.