#### УДК 621.431.73.019.2

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛАЗЕРНОГО ЗАЖИГАНИЯ В ДВС

### Уткин Ю.С.<sup>1</sup>, Герасимов А.Р.<sup>1</sup>, Гурин В.А.<sup>1</sup>

 $^{1}$ ФГБОУ ВПО "Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева", Нижний Новгород, Россия (603950, Нижегородская область, г. Нижний Новгород, ГСП-41, ул. Минина, 24), e-mail: nntu@nntu.nnov.ru

Приведено описание экспериментальной установки для сравнительного исследования лазерного зажигания (ЛЗ) и электроискрового зажигания (ИЗ) в двигателях легкого топлива. Установка предназначена для оценки воспламеняющей способности лазерных импульсов, генерируемых различными лазерами. Эффективность лазерного зажигания оценивается путём снятия и обработки индикаторных диаграмм рабочего процесса в ДВС в режимах ЛЗ и ИЗ. Индикаторные диаграммы снимаются с помощью пневмоэлектрического стробоскопического индикатора. Индикатор позволяет фиксировать диаграммы в координатах «давление – угол поворота коленчатого вала». Установка создана на базе одноцилиндрового ДВС 1Ч- 8.5/11.5. В двигателе реализован ряд конструктивных мер для обеспечения высокой стабильности и воспроизводимости режимов его работы. В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный Nd:YAG лазер с ламповой накачкой и длиной волны 1.06 µm. Описаны блок-схема установки, методика исследований и некоторые их результаты.

Ключевые слова: лазерное зажигание, искровое зажигание, двигатель внутреннего сгорания, индикаторная диаграмма.

# EXPERIMENTAL SETTING FOR RESEARCH LASER IDNITION IN COMBUSTING ENGINES

### Utkin Y.S.<sup>1</sup>, Gerasimov A.R.<sup>1</sup>, Gurin V.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, Russia (603950, Nizhny Novgorod, street K. Minin, 24), e-mail: nntu@nntu.nnov.ru

Description over of the experimental setting is brought for comparative research of the laser ignition and spark ignition in the engines of easy fuel. Setting is intended for an estimation to igniting ability of the laser impulses generated by different lasers. Efficiency of the laser ignition is estimated by a removal and analysis of indicator-diagrams of working process in ICE in the modes of laser and spark ignition. Indicator-diagrams are taken off by means of electropneumatic strobing indicator. An indicator allows to fix diagrams in coordinates "pressure is a corner of turn of crankshaft". Setting is created on the base of single-cylinder ICE. In an engine the row of structural measures is realized for providing of high stability and producibility of his office hours. As a source of laser radiation impulsive was used Nd:YAG laser with the lamp pumping and long waves of 1.06  $\mu$ m. This work is described flowchart of setting, methodology of researches and some results.

Keywords: laser ignition, spark ignition, internal-combustion engine, indicator-diagram

#### Ввеление

В настоящее время усилия учёных и инженеров мирового сообщества двигателистов в значительной мере направлены на применение лазерных систем зажигания (ЛЗ) в двигателях лёгкого топлива.

Уникальные свойства сфокусированного лазерного излучения, вызывающего оптический пробой в газовой среде с образованием мощного плазменного очага, определяют возможность интенсификации процесса воспламенения и сгорания топливных смесей в ДВС.

Это, в свою очередь, позволяет расширить пределы обеднения топливо-воздушных зарядов, снизить межцикловую неидентичность рабочих процессов и концентрацию токсичных компонентов в отработавших газах [1, 4].

В научных публикациях по этой тематике приводятся многочисленные результаты, свидетельствующие о возможности реализации преимуществ лазерного зажигания ЛЗ [5, 6]. Вместе с тем, эксперименты, проведённые на модельных и двигательных установках, часто в несопоставимых условиях, в настоящее время ещё не позволяют определить оптимальные для ДВС параметры лазерных импульсов.

Эта ситуация аналогична ситуации в хронологии развития искровых систем зажигания (ИЗ) во второй половине прошлого века. Испытания большого разнообразия схем ИЗ в широком спектре конструктивных и режимных особенностей реальных двигателей показывали, зачастую, несопоставимые результаты.

В настоящее время ИЗ достигло, по-видимому, апогея своего развития, а параметры искровых разрядов являются общепринятыми.

Поиск оптимальных параметров лазерных импульсов для целей зажигания в ДВС ещё весьма далёк от завершения.

#### Цель работы

Определённый опыт в исследовании воспламеняющей способности высоковольтных разрядов и влияние их параметров на рабочий процесс в ДВС, полученный в результате многолетней работы в этом направлении с применением уникальной аппаратуры, в частности [2, 3], позволил определить стратегию исследований лазерного зажигания. По мнению авторов, оценка воспламеняющей способности лазерных импульсов, генерируемых различными лазерными установками, должна проводиться в строго идентичных условиях путём сравнения результатов с эталонной искровой системой зажигания. Очевидно, что только в этом случае можно исключить существенное влияние на результаты исследований морфологических и режимных факторов, присущих модельным разновидностям двигателей. Реализуя этот подход, авторы разработали и создали экспериментальную установку для исследования лазерного зажигания в искровом двигателе внутреннего сгорания, описание которой приводится ниже.

#### Описание экспериментальной установки

В состав экспериментальной установки входят три основных функциональных блока: двигательная установка ИТ9-2, пневмоэлектрический стробоскопический индикатор МАИ-2 и лазерная аппаратура. Промышленно выпускаемая испытательная установка ИТ9-2 предназначена для оценки детонационной стойкости бензинов и находит широкое применение в лабораториях контроля качества светлых нефтепродуктов. Установка ИТ9-2

состоит из малоразмерного одноцилиндрового четырёхтактного двигателя с искровым зажиганием, асинхронного электродвигателя для поддержания постоянных оборотов и запуска двигателя и различных систем, агрегатов и приборов, служащих для обеспечения высокой стабильности и воспроизводимости режимов работы ДВС.

Основные технические данные установки ИТ-2: рабочий объём цилиндра – 0,65 дм<sup>3</sup>, степень сжатия – переменная, от 4 до 10, число оборотов двигателя – 900 мин<sup>-1</sup>, питание топливом – от карбюратора с регулированием состава смеси, охлаждение – жидкостное, термосифонно-испарительного типа, мощность электродвигателя 7 кВт.

Индикатор МАИ-2, разработанный в Московском авиационном институте, предназначен для индицирования поршневых машин (двигателей внутреннего сгорания, паровых машин, компрессоров и др.) с частотой вращения коленчатого вала до 5000 мин<sup>-1</sup> и изменением рабочего давления от 15 МПа до 600 мм. рт. ст. вакуума.

В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный Nd:YAG лазер с ламповой накачкой и длиной волны 1.06 μm, который мог работать как в режиме свободной генерации с импульсами длительностью около 50 mS, так и в режиме синхронизации мод, с длительностью импульса около 15 nS и энергией в импульсах до 130 mJ.

Развёрнутая блок-схема установки представлена на рис. 1. Маховик двигателя 1 клиноременной передачей связан с асинхронным электродвигателем 2. Он является средством запуска двигателя 1 и при его работе нагружающим электротормозом, поддерживающим постоянную частоту вращения коленчатого вала двигателя. Система зажигания 3 со свечой 4 является штатной для установки ИТ9-2, момент искрообразования которой определяется прерывателем 18. Свеча 4 при испытаниях в режиме искрового зажигания устанавливалась в резьбовое отверстие головки блока двигателя, где находится оптический блок 9, необходимый при работе в режиме лазерного зажигания. Переключатель "ИЗ-ЛЗ" позволяет обеспечить запуск системы искрового зажигания и лазерной установки от прерывателя 18, т.е. гарантировать идентичность углов опережения зажигания в режимах ИЗ и ЛЗ.

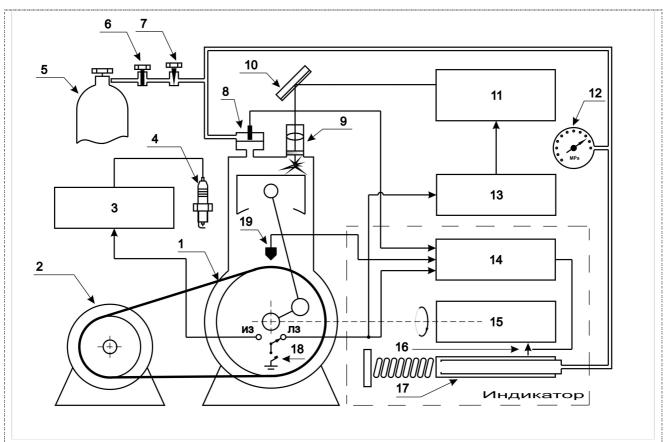


Рис.1. Блок-схема экспериментальной установки:

1- одноцилиндровый двигатель; 2 – асинхронный электромотор; 3 – система зажигания 4 – свеча зажигания; 5 – баллон сжатого газа; 6, 7 – краны управления давлением; 8 – датчик давления; 9 – оптический блок; 10 – зеркало; 11 – лазерная установка; 12 – манометр; 13 – блок синхронизации; 14 – генератор высоковольтных импульсов; 15 – барабан с термобумагой; 16 – искровой разрядник; 17 – плунжерное устройство; 18 – прерыватель системы зажигания; 19 – датчик в.м.т.

Индикаторные диаграммы рабочего процесса двигателя снимались с помощью пневмоэлектрического индикатора модели МАИ-2. Прибор включает в себя баллон сжатого газа 5, пневмосистему из трубопроводов, кранов управления 6,7, манометра 12, датчика давления мембранного типа 8 и регистрирующее устройство с узлами 14, 15, 16, 17. При индицировании двигателя в надмембранную полость датчика 8 через кран наполнения 6 подают медленно растущее давление газа из баллона. (Кран 7 сброса давления закрыт). Когда текущее давление в цилиндре немного превысит противодавление в датчике, его контактное устройство замыкается и даёт электрический сигнал, включающий генератор высоковольтных импульсов 14. Последний формирует короткий искровой разряд в разряднике 16, который оставляет видимую точку на термочувствительной бумаге. Термобумагу закрепляют на барабане 15, приводимом в синхронное вращение с КВ двигателя. Если скорость изменения противодавления в датчике много меньше скорости изменения давления в цилиндре двигателя, то в каждом цикле две точки соответствуют

практически одному уровню противодавления — на линиях сжатия и расширения. Увеличивая давление в пневмосистеме можно, таким образом, пройти весь диапазон изменения давления в цилиндре и за много циклов получить стробоскопическую индикаторную диаграмму. Разрядник 16 плунжерного устройства 17 перемещается вдоль образующей барабана 15 под действием того же давления, что и в датчике 8, чем достигается пропорциональность перемещения разрядника давлению в датчике. Таким образом формируется многоточечная кривая, где образующая барабана является осью давлений, а его развёртка — осью угла поворота.



Рис. 2. Узел записи диаграммы индикатора МАИ – 2

Кроме того, индикатор МАИ-2 позволяет получать отметки момента искрообразования, положения поршня в верхней мертвой точке (в.м.т.) и линий уровней давлений при тарировке прибора. На рис. 2 приведена фотография записывающей части индикатора в процессе работы. Виден искровой разряд, фиксирующий на термобумаге вращающегося барабана отметку текущего давления в цилиндре двигателя.

В состав лазерной установки 11 входит импульсный лазер ЛТИ-205 с высоковольтными блоками питания и водяной системой принудительного охлаждения. Контроль энергии и мощности лазерного излучения осуществлялся измерительным прибором ИМО-2Н. Блок синхронизации 13 формирует импульсы запуска лазерной установки синхронно с работой прерывателя системы зажигания двигателя. Лазерный луч через поворотное зеркало 10 поступает в оптический блок 9, в котором имеется защитное стекло и линза, выполненные из оптического кварцевого стекла. Положение линзы в оптическом блоке регулируется по вертикали, что позволяет совмещать фокус лазерного излучения с местом действия искрового разряда свечи зажигания. Этим достигается

идентичность пространственного положения первичного очага воспламенения в камере сгорания при сравнительных испытаниях ИЗ и ЛЗ. На Рис. 3 представления фотография элементов оптической системы установки. Видна штанга с поворотным зеркалом и оптический блок, установленный на место свечи зажигания. Линза оптического

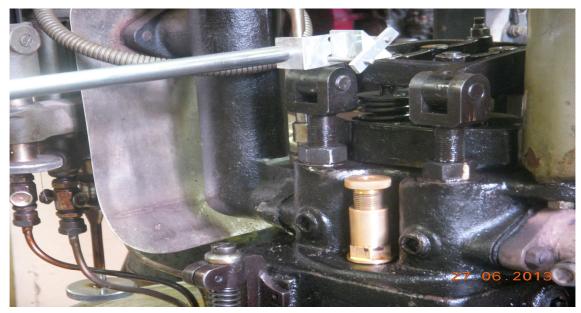


Рис. 3. Элементы оптической системы установки.

блока расположена внутри верхнего цилиндра оптического блока, вращением которого регулируется положение точки её фокуса в камере сгорания.

#### Методика проведения исследований

Методология исследований эффективности лазерного зажигания, как указано выше, основана на проведение экспериментов в строго идентичных режимных условиях работы двигателя одной модели. Подобный подход оправдал себя в прошлом при сравнительных испытаниях различных систем искрового зажигания. При этом минимизируется влияние многочисленных факторов, связанных с неоднозначностью условий испытаний. Методика проведения сравнительных исследований ИЗ и ЛЗ предполагает следующие действия:

- устанавливается режим искрового зажигания двигателя установки;
- двигатель выводится на стационарный тепловой режим;
- на основании опытных данных предыдущих испытаний выбираются и фиксируются оптимальные значения состава топливной смеси, угла опережения зажигания, степени сжатия;
- измеряются показатели токсичности отработавших газов двигателя;
- снимается индикаторная диаграмма рабочего процесса.
- установка переводится в режим лазерного зажигания (замена свечи на оптический блок, настройка аппаратуры и оптической системы);
- двигатель выводится на стационарный тепловой режим;

- измеряются показатели токсичности отработавших газов двигателя;
- снимается индикаторная диаграмма рабочего процесса;
- при наличии возможности изменяются параметры лазерного излучения и снимаются соответствующие диаграммы;
- проводится анализ полученных результатов.

#### Результаты испытания установки

На рис. 4 представлены индикаторные диаграммы, полученные при искровом и лазерном зажигании в соответствии с вышеизложенной методикой.

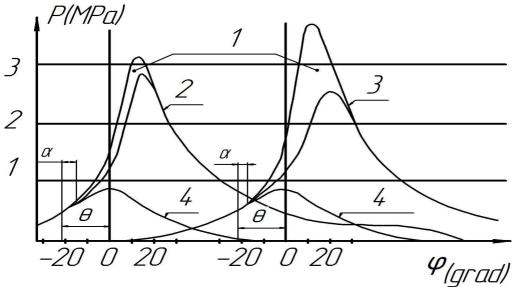


Рис.4. Индикаторные диаграммы: 1 – область цикловой не идентичности; 2 – искровое зажигание; 3 – лазерное зажигание; 4 – линия сжатия – расширения. Длительность лазерных импульсов 15 nS, энергия порядка 130 mJ.

Индикатор МАИ-2 даёт на термобумаге «облако» точек, которое на рисунке очерчено линиями области цикловой неидентичности, как характеризующие разброс «качества» последовательных рабочих циклов. Из сравнения величины этого разброса на уровне давления в цилиндре 2 МПа видно, что цикловая неидентичность при ЛЗ существенно больше, чем при ИЗ ( $11^0$  против  $4^0$  угла  $\phi$  при ИЗ). Вместе с тем в отдельных «хороших» циклах заметно уменьшение задержки воспламенения а, высокие градиент и пиковое давление цикла при одинаковом угле опережения зажигания  $\theta$ . То есть налицо проявление известных преимуществ воспламенения лазерной искрой, но нестабильность этих эффектов однозначного объяснения на данном этапе не имеет. Можно предположить, в частности, наличие спонтанной модуляции мощности лазерных импульсов, выводящей энергетику излучения за границу оптического пробоя. При этом существенную роль может цикловая неоднородность состава топливной смеси в первичном играть

воспламенения. Однако, обсуждение результатов предварительных экспериментов выходит за рамки настоящей работы.

#### Заключение

Проведённые испытания экспериментальной установки для исследования лазерного зажигания в ДВС позволяют утверждать, что авторами создан адекватный инструмент для объективной оценки эффективности лазерного зажигания в двигателях легкого топлива.

Авторы выражают благодарность член-корр РАН, главному научному сотруднику Института физики микроструктур А.А.Андронову и доценту кафедры «Квантовой радиофизики и лазерных систем» ННГУ им. Н.И.Лобачевского А.П. Савикину за представление в наше распоряжение лазера ЛТИ-205 и помощь в работе с ним.

#### Список литературы

- 1. Ассовский И.Г., Рябиков О.Б., Кутунев В.Ф. Шабанов Ф.В. К вопросу воспламенения и сгорания обедненных смесей в ДВС с принудительным зажиганием новый этап // Труды НАМИ. 2011. № 247. С. 64-75.
- 2. Уткин Ю.С. Система зажигания для карбюраторных двигателей // А.С. СССР. № 661134. кл. F02P3/06. 1979. Бюл.№ 17.
- 3. Уткин Ю.С. Устройство отключения свечей зажигания двигателя внутреннего сгорания// А.С. СССР № 802593. кл. F02P17/00. 1981. Бюл.№ 5.
- 4. Marshal L. Laser car ignition dream // Photonic spectra. 2012. Sept. P. 40-43.
- 5. Mullett J.D. Doddetal R. Influence of beam energy, mode and focal length on control of laser ignition an internal combustion engine // J. of Phys. D: A ppl. Phys. 2007. Vol.40. P. 4730-4739.
- 6. Masaki Tsunekane, Takunori Taira, Takayuki Inohara, and Kenji Kanehara. Efficient Ignition of a Real Automobile Engine by a High Brightness, Passively Q-Switched Cr:YAG/Nd:YAG Micro-Laser// Advanced Solid-State Photonics. 2010. Jan 31, Feb 3.

#### Рецензенты:

Орлов Л.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автомобили и тракторы» Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Н.Новгород.

Кузьмин Н.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт» Нижегородского технического университета им. Р.Е. Алексеева, г. Н. Новгород.