

03:07

## **Лазерное зажигание в двигателях внутреннего сгорания: безыскровый поджиг**

© А.А. Андронов, В.А. Гурин, А.В. Маругин, А.П. Савикин,  
Д.Е. Святошенко, А.Н. Тихомиров, Ю.С. Уткин, В.Л. Химич

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского  
Нижегородский технический университет им. Р.Е. Алексеева  
Институт физики микроструктур РАН, Нижний Новгород  
E-mail: andron@ipmras.ru

Поступило в Редакцию 20 февраля 2014 г.

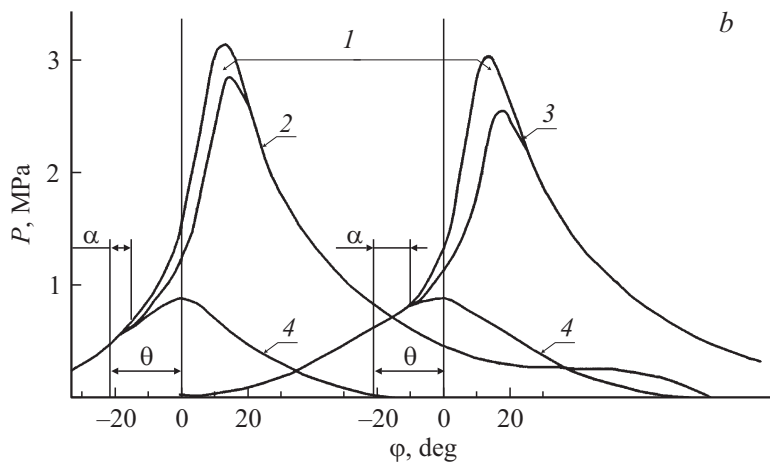
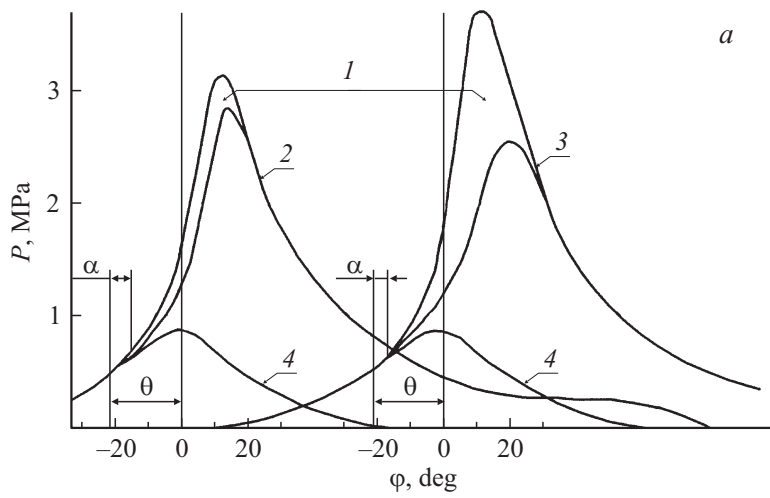
Реализовано лазерное зажигание в одноцилиндровом бензиновом двигателе. Получены индикаторные диаграммы (зависимость давления в цилиндре от угла поворота коленчатого вала) при зажигании электрической искрой и нано- и микросекундными импульсами Nd:YAG-лазера. Максимальная мощность микросекундных импульсов ниже критической для возникновения искры, а длина волны излучения находится вне пределов спектра поглощения углеводородных топлив. По-видимому, зажигание возникает из-за поглощения в остатках масла или нагара в камере сгорания, и работоспособность двигателя сохраняется. Такой, безыскровый, поджиг демонстрирует возможность применения компактных полупроводниковых квантовых каскадных лазеров на длинах волн около  $3.4\ \mu\text{m}$  (на которых велико поглощение в топливных смесях) в системах зажигания двигателей.

В настоящее время усилия мирового сообщества производителей двигателей внутреннего сгорания (ДВС) направлены на применение лазерных систем зажигания (ЛСЗ) в ДВС. Сфокусированный лазерный импульс вызывает лавинный пробой в топливной смеси ДВС с образованием плазменного очага, что определяет возможность интенсификации процесса воспламенения и сгорания топливных смесей в ДВС. В литературе приводятся многочисленные результаты, свидетельствующие о возможности реализации преимуществ ЛСЗ [1,2]. Вместе с тем эксперименты, проведенные в модельных условиях и на двигательных установках, часто в несопоставимых условиях, в настоящее время еще

не позволяют определить оптимальные для ДВС параметры лазерных импульсов.

В данной работе проведено сравнительное исследование лазерного зажигания (ЛЗ) и электроискрового зажигания (ИЗ) в бензиновом одноцилиндровом ДВС. В качестве источника лазерного излучения использовался импульсный Nd:YAG-лазер с ламповой накачкой и длиной волны  $1.06 \mu\text{m}$ , который мог работать как в режиме свободной генерации с импульсами длительностью около  $50 \text{ ms}$  (длинный импульс), так и в режиме синхронизации мод, с длительностью около  $15 \text{ ns}$  (короткий импульс) и энергией в импульсах до  $130 \text{ mJ}$ . Исследования проводились на одноцилиндровом ДВС 1Ч-8.5/11.5, степень сжатия 6.0, частота вращения  $900 \text{ min}^{-1}$ , коэффициент избытка воздуха 1.0, угол опережения зажигания ( $\Theta$ )  $25^\circ$ , индикаторное давление  $0.76 \text{ kPa}$ . При исследовании сравнивались индикаторные диаграммы в координатах „давление  $P$  (MPa)–угол поворота коленчатого вала  $\varphi$  (deg)“ при ЛЗ и ИЗ. Индикаторные диаграммы снимались с помощью пневмоэлектрического индикатора МАИ-2 на термочувствительной бумаге, закрепленной на барабане, вращающемся синхронно с валом двигателя. Искровой разряд, создающий отметки на бумаге, возникал всякий раз, когда текущее давление в цилиндре становилось равным противодавлению в пневмосистеме индикатора. Этот момент фиксировался специальным датчиком, воспринимающим давление в цилиндре и противодавление в пневмосистеме индикатора. Это же давление перемещало искровой разрядник вдоль образующей барабана с термобумагой, формируя в результате ось давлений на диаграмме. Таким образом, в каждом цикле сжатия–расширения на термобумаге возникали 2 отметки от искрового разряда. Увеличивая давление в пневмосистеме, можно пройти весь диапазон изменения давления в цилиндре и за много циклов получить индикаторную диаграмму. Лазерный луч поступал в камеру сгорания через систему зеркал и оптический элемент с фокусирующей линзой, устанавливаемый на место свечи зажигания. Линза формировала фокус луча в месте действия искрового разряда ИЗ.

На рисунке, *a*, представлены индикаторные диаграммы, снятые при ИЗ и ЛЗ с лазерным импульсом длительностью  $15 \text{ ns}$ . Мощность лазерного импульса составляет величину порядка  $8\text{--}9 \text{ MW}$ . Индикатор МАИ-2 формирует „облако“ точек, площадь которого на рисунке очерчена линиями, а его величина определяет неидентичность рабочих циклов. В ЛЗ с импульсом длительностью  $15 \text{ ns}$  разброс существенно



Индикаторные диаграммы для ИЗ и ЛЗ с лазерным импульсом длительностью 15 нс (а) и 50 мкс (б): 1 — область цикловой неидентичности; 2 — искровое зажигание; 3 — лазерное зажигание; 4 — линия сжатия–расширения.

больше, чем у ИЗ. В то же время следует отметить высокую скорость нарастания давления в циклах и меньший угол задержки воспламенения  $\alpha$ , т.е. очаг воспламенения не только успевает сформироваться за столь короткое время, но и обеспечивает высокой энергией весь топливоздушный заряд в цилиндре, сгорающий по законам турбулентного распространения пламени. Таким образом, ЛЗ с импульсом длительностью 15 ns может дать большее, чем ИЗ, пиковое давление в цикле, но и приводит к большему разбросу давлений по циклам, по-видимому, прежде всего из-за неоднородности смеси (а также из-за цикловой неидентичности лазерных импульсов). Скорее всего, причиной воспламенения в этом случае следует считать возникновение лазерного пробоя смеси, хотя не исключено и в этом случае влияние поглощения излучения в остатках масла или нагара в камере сгорания.

Индикаторные диаграммы, снятые при ИЗ и ЛЗ с лазерным импульсом длительностью 50  $\mu$ s, представлены на рисунке, *b*. Мощность лазерного импульса составляет 2.7 kW. Заметно увеличение (по сравнению с ИЗ) первой фазы сгорания, графически выраженного как задержка отрыва линии сгорания от линии сжатия (угол  $\alpha$ ). Соответственно больше и цикловая неидентичность (это характерно при затягивании сгорания), и меньше, по сравнению с ИЗ, скорость нарастания давления и максимальное давление в циклах. В этом случае естественно предположить, что лазер формирует очаг нагрева смеси без оптического пробоя, возможно, при меньшей температуре и в малом объеме, что и определяет задержку воспламенения и меньшую скорость распространения фронта пламени. Видимо, энергия, поглощаемая в топливной смеси, близка к минимально допустимой, поскольку введение ослабляющего фильтра в виде 3 кварцевых стекол (общий коэффициент пропускания 0.778) приводит к многочисленным пропускам в работе ДВС. Измерения минимальной энергии наносекундного лазерного импульса на длине волны 1.06  $\mu$ m, достаточной для работы ДВС, дают значение энергии 3–4 mJ [3,4]. Причем эти значения — это величина энергии, поступающей в область искры, а не энергия, поглощаемая в искре (в работе [4] сообщается о „разбрызгивании“ части энергии лазера областью искры). Близкие значения дает оценка энергии, необходимой для адиабатического разогрева смеси в объеме 0.5 mm<sup>3</sup> до температуры зажигания (принятой 500 K) при давлении 1 MPa. С другой стороны, проведенное нами измерение поглощения в такой смеси в газовой кювете дает ничтожное поглощение на длине волны около 1  $\mu$ m. Аналогичное измерение для жидкого бензина дает значение

коэффициента поглощения около  $0.1 \text{ cm}^{-1}$  на длине волны  $1.06 \mu\text{m}$ . И этого тоже недостаточно, как нам представляется, чтобы выделить энергию в  $1 \text{ mJ}$  в каком-то малом количестве топливно-капельной смеси. Возможно, поглощение связано с присутствием масла или нагара в камере сгорания или задействован какой-то нелинейный механизм поглощения. Так или иначе, ввиду того что при длинном импульсе энергия импульса находится на пределе зажигания и учитывая вышеприведенные данные и оценки минимальной энергии, необходимой для зажигания, можно считать, что поглощаемая энергия составляет  $1\text{--}3 \text{ mJ}$ . Насколько мы знаем, демонстрация работы ДВС при безысхотном лазерном (тепловом) поджиге в литературе отсутствует, хотя возможность теплового лазерного поджига обсуждалась [4].

Следует подчеркнуть, что энергия  $1\text{--}3 \text{ mJ}$  в импульсе уже доступна современным компактным полупроводниковым квантовым каскадным лазерам на длинах волн в диапазоне  $3.3\text{--}3.5 \mu\text{m}$  [5], где в углеводородных топливных смесях имеется сильное поглощение. Поэтому кажется несомненным, что исследование примесных каскадных лазеров в системах зажигания ДВС должно привести к интересным результатам.

Авторы выражают благодарность главному конструктору ОАО ЗМЗ М.А. Миронычеву за поддержку работы, разнообразные комментарии и обсуждения.

Работа выполнялась при поддержке гранта администрации Нижегородской области, при участии компании Интеллектуальные системы-НН (директор Д.А. Степанов).

## Список литературы

- [1] *Laura Marshal* // Photonic spectra. 2012. V. 43. P. 40.
- [2] *Ассовский И.Г., Рябиков О.Б., Кутунев В.Ф., Шабанов А.В.* // Труды НАМИ. 2011. В. 247. С. 64–75. (*Assovskiy I., Ryabikov O., Kutenev V., Shabanov A.* // Proc. NAMI. 2011. V. 247. P. 64–75.)
- [3] *Masaki Tsunekane, Takunori Taira, Takayuki Inohara, Kenji Kanehara* // Advanced Solid-State Photonics. San Diego, California United States, January 31, 2010–February 3, 2010.
- [4] *Mullett J.D., Dodd R.* // J. Phys. D: Appl. Phys. 2007. V. 40. P. 4730–4739.
- [5] *Bandyopadhyay N., Sliyken S., Bai Y., Razezghi M.* // Appl. Phys. Lett. 2012. V. 100. P. 212 104.