

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕЧЕНИЯ ГАЗА В СИСТЕМЕ ГАЗООБМЕНА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Д.В. Вяликов

vyalikovdv@mail.ru

SPIN-код: 9286-6087

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Совершенствование вычислительных алгоритмов требует наличия достоверных экспериментальных данных, в том числе в области моделирования газодинамических процессов в поршневых двигателях. В данной работе проведена оценка возможности использования шлирен-метода для исследования волновых процессов в системе газообмена двигателя внутреннего сгорания. Представлена схема экспериментальной установки, основанной на шлирен-методе с использованием одного сферического зеркала. Выполнен численный расчет течения газа во впускном трубопроводе и представлены графические зависимости температуры и плотности газа от угла поворота коленчатого вала поршневого двигателя. Определены требования к необходимому для исследования оборудованию и выполнено сравнение между удовлетворяющими требованиям аналогами.

Ключевые слова

Поршневой двигатель, моделирование, процессы газообмена, шлирен-метод, численный метод, волновые процессы, оптическая система, экспериментальный стенд

Поступила в редакцию 12.11.2020

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020

Введение. В настоящее время все больший интерес и внимание при проектировании механизмов и машин уделяют высокопроизводительным компьютерным методам, основанным как на общеизвестных законах физики, так и на полуэмпирических зависимостях [1–4]. В этой связи вопрос верификации той или иной модели на основе экспериментальных данных приобретает решающее значение.

Применительно к внутрицилиндровому процессу в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) одними из первых стали применять оптические методы исследования, которые со временем не потеряли свою актуальность, в том числе благодаря совершенствованию техники проведения экспериментов и оборудования для обработки результатов.

Оптические методы анализа — это физико-химические методы, основанные на оптических свойствах исследуемой системы, к которым относятся интенсивность излучения возбужденных атомов, поглощение монохроматического излучения, показатель преломления света и другие.

К этим методам относится группа шлирен-методов, которые позволяют визуализировать оптические неоднородности в прозрачных преломляющих сре-

дах за счет разницы в показателях преломления различных областей (рис. 1). Главными преимуществами этой группы являются возможность получать информацию об объекте исследования, не прибегая к физическому контакту с ним, наблюдение за протеканием процесса в режиме реального времени и простота применения. Также стоит отметить высокую точность анализа, которая позволяет успешно использовать шлирен-методы для исследования распространения факела пламени в процессе сгорания, процесса впрыска и распыления топлива, процессов детонации в цилиндре при использовании различных смесей и др. [5–7].

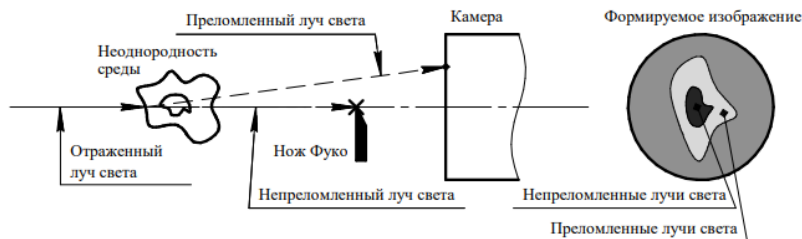


Рис. 1. Принцип обнаружения оптических неоднородностей газовых потоков

Одним из элементов внутрицилиндрового процесса является процесс наполнения и выпуска отработавших газов в системе газообмена двигателя. В работе [8] отмечается, что подбор длин и геометрии коллекторов позволяет увеличить наполнение цилиндров ДВС и улучшить его эффективные параметры. Настройка математических моделей нестационарного течения в газоздушных трактах имеет особую важность для многоцилиндровых двигателей (рис. 2).

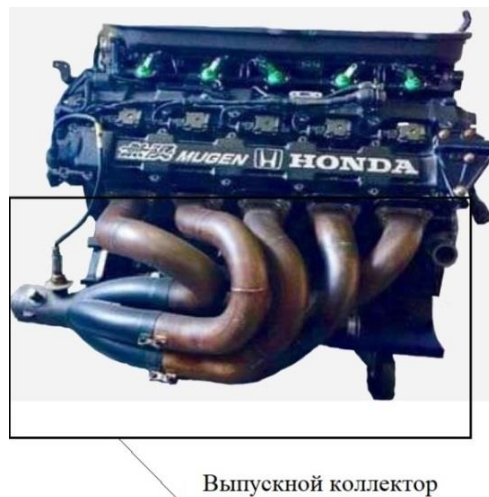


Рис. 2. Вид на выпускную систему современного двигателя HONDA V10 для «Формулы 1»

В этом смысле проведение экспериментальных исследований в областях газовой динамики с использованием оптических методов приобретает большое

значение, поэтому в данной работе выполнена оценка возможности проведения подобного исследования на примере двигателя HONDA GX390, а также предложена схема экспериментального стенда.

Схема разрабатываемой экспериментальной установки. Для оценки пульсаций давления, температуры и плотности в выпускном коллекторе двигателя HONDA GX390 предполагается использовать оптическую систему, основанную на шлирен-методе с одним сферическим зеркалом (рис. 3). В качестве исследуемой области рассмотрен удлиненный участок коллектора одноцилиндрового двигателя ДВС, выполненный из кварцевого стекла.

Исследуемым процессом является движение волн сжатия и разряжения, отраженных от клапанов двигателя, а также их периодичность. При этом основной задачей была разработка методики экспериментального исследования волновых процессов в газоздушных трактах ДВС.

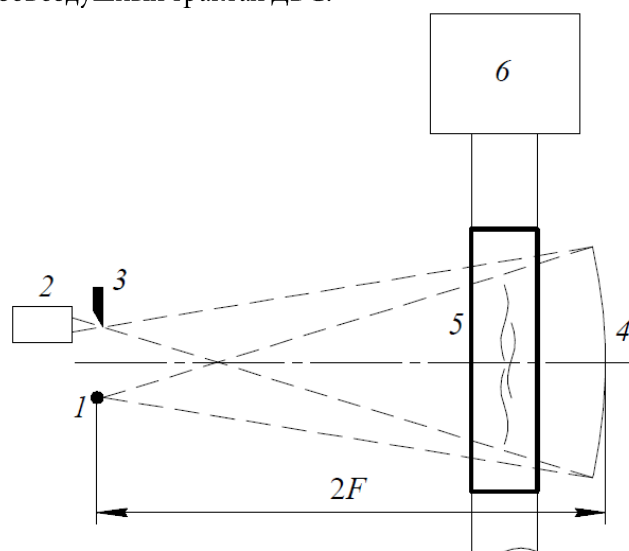


Рис. 3. Схема оптической системы со светодиодом:

- 1 — точечный источник света; 2 — высокоскоростная камера; 3 — нож Фуко;
 4 — сферическое зеркало; 5 — исследуемая область; 6 — ДВС;
 F — фокусное расстояние сферического зеркала

Важным аспектом при измерениях являются чувствительность метода к пульсациям плотности газа в газоздушных трактах ДВС. По данным [9], при использовании шлирен-метода, диапазон чувствительности составляет порядка $0,01\rho_{н.у.}$, где $\rho_{н.у.}$ — плотность воздуха при нормальных условиях.

Чувствительность схемы с ножом Фуко возрастает с уменьшением размера источника света и увеличением фокусного расстояния. На практике источник света не может быть сколь угодно малым, поскольку уменьшение размера приводит к снижению генерируемого светового потока.

Используя методы вычислительной газовой динамики, можно оценить уровень пульсаций плотности для исследуемого двигателя (табл. 1).

Двигатель HONDA GX390

Параметр	Единицы измерения	Значение
Диаметр цилиндра	см	8,8
Ход поршня	см	6,4
Степень сжатия	—	8
Номинальная частота вращения коленчатого вала	об/мин	3600
Мощность на номинальной частоте вращения	кВт	9,6
Диаметр выпускного коллектора	мм	33
Диаметр впускного коллектора	мм	26
Диаметр впускного клапана	мм	35
Диаметр выпускного клапана	мм	31

В работе использована методика, предложенная авторами [8, 10, 11] на основе одномерной модификации численного метода распада произвольного разрыва [12] с нестационарными газодинамическими функциями от числа Маха M . Это позволяет проводить сквозной маршевый счет волновых процессов без выделения разрывов с помощью однородного алгоритма [8].

Нестационарное течение совершенного газа в протяженных впускных трубах в одномерной постановке (система координат «длина — время», $x-t$) описывается системой основных уравнений газовой динамики [13]:

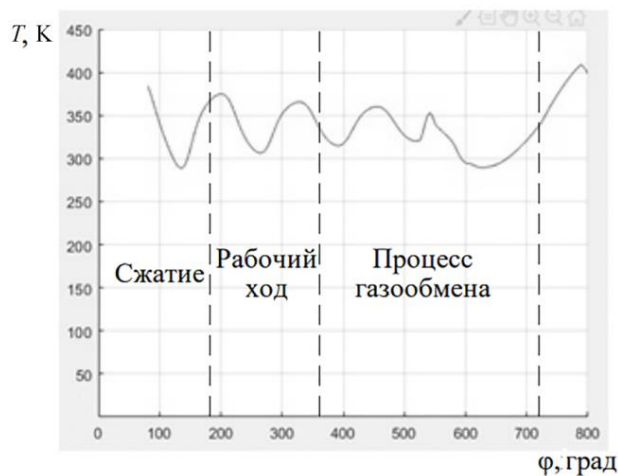
$$\begin{cases} \oint (\rho dx - \rho u dt) = 0; \\ \oint (\rho u dx - (p + \rho u^2) dt) = 0; \\ \oint \left(\rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) dx - \rho u \left(e + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} \right) dt \right) = 0, \end{cases}$$

где ρ — плотность; u — скорость; p — давление; T — температура; e — удельная внутренняя энергия, $e = C_v T$.

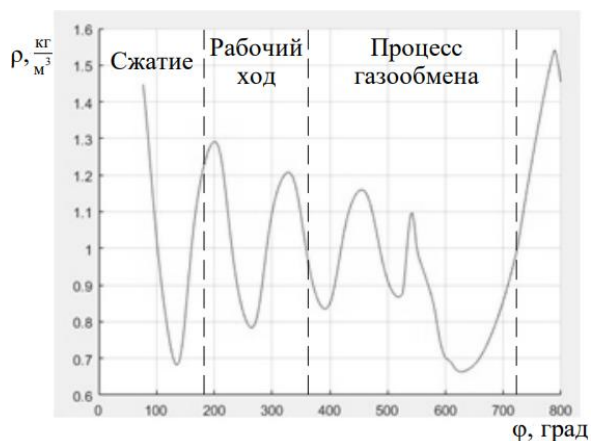
При численном расчете течения в трубе ее длина была разбита на отрезки Δx , расчетный шаг по времени Δt задан с использованием определенного максимально возможного сеточного числа Куранта $C_0 = a\Delta t/\Delta x$ (a — скорость звука), при котором обеспечивается устойчивость вычислительной процедуры (здесь $C_0 = 0,7$).

Результаты расчета в виде зависимостей температуры и плотности газа во впускном коллекторе от угла поворота коленчатого вала двигателя представлены на рис. 4.

Из графиков видно, что пульсации плотности в волновом процессе достигают $(0,3...0,5)\rho_{н,у}$, а это соответствует диапазону чувствительности шилрен-метода.



а



б

Рис. 4. Зависимость параметров газа от угла поворота коленчатого вала (град):

а — температура T , К; б — плотность ρ , кг/м³

Требования к оборудованию исследования. Следующим важным этапом является выбор источника света, поскольку яркость луча определяет освещенность изображения. Рассмотрим оптические схемы с применением светоизлучающего диода TDS-P003L4U14 мощностью 3 Вт при токе 0,7 мА [14] (рис. 5) и лазерного диода Q-BAINE 532MD-200-12V-XL мощностью 200 мВт при токе 850 мА (рис. 6).

Следует обратить внимание, что схемы подключения светоизлучающего диода и лазерного диода к источнику питания различаются, поскольку они рассчитаны на разное напряжение (3 и 12 В соответственно). Так, промежуточным звеном между источником питания и светоизлучающим диодом является плата TENSTAR ROBOT XL4015, а между источником питания и лазерным диодом — драйвер лазерного диода, необходимый для регулирования напряжения.

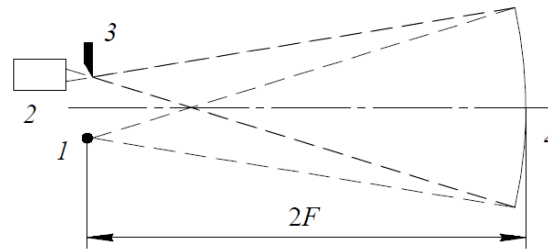


Рис. 5. Схема оптической системы со светоизлучающим диодом:

1 — светоизлучающий диод; 2 — высокоскоростная камера; 3 — нож Фуко; 4 — сферическое зеркало; F — фокусное расстояние сферического зеркала

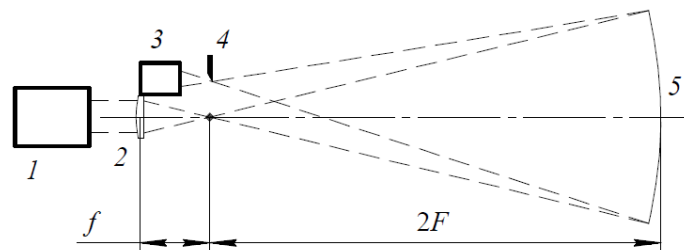


Рис. 6. Схема оптической системы с лазерным диодом:

1 — лазерный диод; 2 — собирающая линза; 3 — высокоскоростная камера; 4 — нож Фуко; 5 — сферическое зеркало; F — фокусное расстояние сферического зеркала; f — фокусное расстояние собирающей линзы

В работе [15] для просмотра на экране из матового стекла рекомендуют использовать оборудование с освещенностью не менее 50 люкс, поэтому выходная мощность источника должна быть порядка 100 люкс для системы, в которой половина луча отсекается ножом Фуко. Это требование особенно важно при использовании светодиодного источника света. В нашем случае световой поток диода TDS-P003L4U14 по паспортным данным составляет 200 лм, тогда освещенность сферического зеркала (при условии попадания на него всего светового потока):

$$E = \frac{\Phi}{A} = \frac{4\Phi}{\pi D^2} = 3000 \text{ люкс},$$

где D — диаметр сферического зеркала $D = 114$ мм; Φ — световой поток от светодиода.

Таким образом, предварительно по освещенности имеется достаточный запас для проведения экспериментов.

В настоящее время в работе используется сферическое зеркало от ньютоновского рефракторного телескопа диаметром $D = 114$ мм и фокусным расстоянием $F = 850$ мм. Зеркало установлено в спроектированную подставку, изготовленную на 3D-принтере методом послойного наплавления (рис. 7).

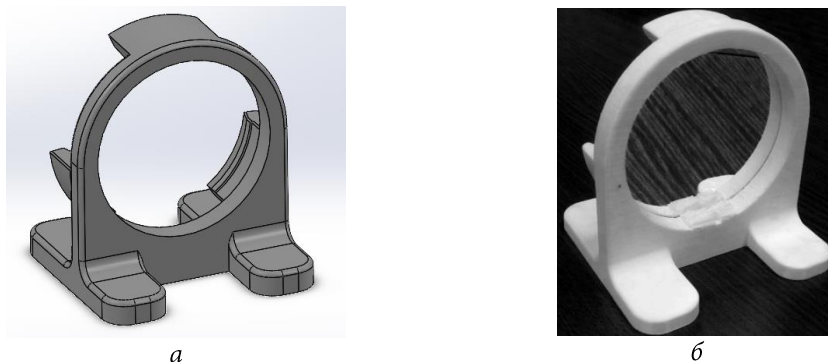


Рис. 7. 3D-модель крепления (а) и крепление в сборе с зеркалом (б)

В свою очередь, одним из ключевых элементов оптической системы с использованием лазерного диода является собирающая линза, располагающаяся непосредственно на пути распространения луча. При известных характеристика используемого зеркала, можно рассчитать допустимое фокусное расстояние собирающей линзы в соответствии с расчетной схемой на рис. 8.

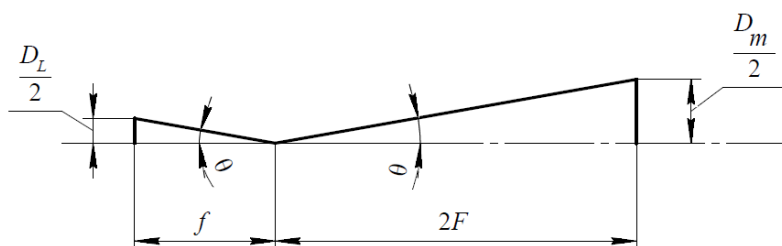


Рис. 8. Расчетная схема для определения фокусного расстояния собирающей линзы

В рамках данной работы $D_L = 5$ мм, $D_m = 114$ мм, $F = 850$ мм. Тогда можно записать

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \theta = \frac{D_m}{4F}; \\ \operatorname{tg} \theta = \frac{D_L}{2f} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{D_m}{4F} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{114}{4 \cdot 850} = 1,92^\circ; \\ f = \frac{2D_L F}{D_m} = \frac{2 \cdot 5 \cdot 850}{114} = 74,56 \text{ мм.} \end{cases}$$

Таким образом, для имеющейся оптической системы подходит собирающая линза с фокусным расстоянием $f = 74,56$ мм.

Теневые картины для потока воздуха от нагретой свечи, полученные в исследовании с использованием разных источников света, представлены на рис. 9.

Анализируя полученные изображения, можно сделать вывод, что картина, полученная с помощью светоизлучающего диода, получилась более контрастной, чем с помощью лазерного диода, однако освещенность изображения представляется недостаточной. В дальнейшем при проведении экспериментов это будет скорректировано использованием светодиода мощностью до 10 Вт.

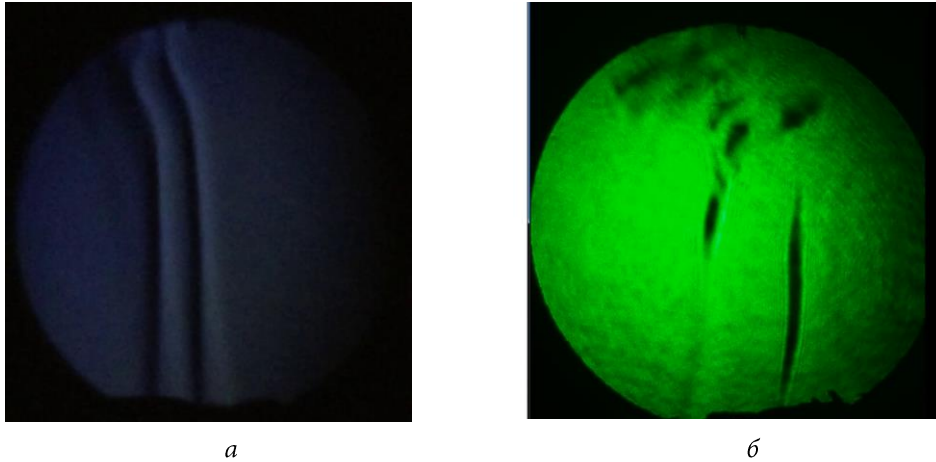


Рис. 9. Теневые картины, полученные с использованием разных источников света:
a — светоизлучающий диод; *б* — лазерный диод

Как было показано выше, скорость распространения волн в газовой среде определяется текущей скоростью звука, которая для номинального режима работы двигателя представлена на рис. 10.

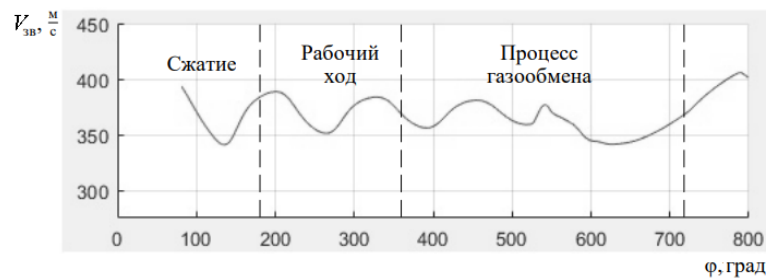


Рис. 10. Значения локальной скорости звука

Размер участка коллектора из кварцевого стекла не будет превышать диаметр доступного сферического зеркала (на текущий момент $D = 114$ мм). Таким образом, частота прохождения волной наблюдаемого участка составит

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{a}{D} \approx 3000 \text{ Гц.}$$

При этом желательно иметь минимум десять кадров с волной по длине, что определяет необходимую минимальную частоту съемки порядка 20...30 тыс. кадров в секунду. Этим требованиям удовлетворяют камеры Phantom v710 [16], Evercam 4000-128-M [17], Photron FASTCAM SA-Z Type 200K [18] и др. Их основные характеристики приведены в табл. 2.

Выводы. В работе рассмотрена возможность применения шлирен-метода для визуализации потоков газа в газоздушных трактах ДВС. Показано, что

структура потока газа с существующими уровнями пульсации плотности в достаточной мере подходит для фиксации приведенным оптическим методом.

Таблица 2

**Основные характеристики высокоскоростных камер,
необходимых для проведения исследования**

Характеристика	Phantom v710	Evercam 4000-128-M	Photron FASTCAM SA-Z Type 200K
Разрешение, пкс	1280×800	1280×860	1024×1024
Частота кадров при максимальном разрешении, к/с	7500	4,000	20,000
Предельное разрешение, пкс	128×32	1280×16	324×176
Частота кадров при предельном разрешении, к/с	685 600	85 000	224 000
Скорость затвора, мкс	1	1	1
Чувствительность ISO (для монохромного сенсора)	7 000	8 000	50 000

Выбранные элементы для установки: источники света, электропитания, сферическое зеркало, а также элементы управления позволят провести необходимые эксперименты для дальнейшего совершенствования расчетных математических моделей. При этом использование высокоскоростных камер связано не только с необходимостью фиксации возмущений, распространяющихся со скоростью звука, но и для повышения четкости изображения фиксируемых неоднородностей.

Предпочтительным вариантом источника света является светоизлучающий диод большой мощности не только из-за возможности получить более контрастную теневую картину, но и из-за усложнения оптической системы установки за счет добавления собирающей линзы, необходимой для использования лазерного диода в качестве источника света.

Заключение. Оптические методы анализа занимают важное место в исследовании внутрицилиндровых процессов в ДВС. Они позволяют не только качественно, но и количественно оценить процессы, которые нельзя увидеть невооруженным глазом. Полученные таким образом данные помогают лучше понять физические основы наблюдаемых явлений и дают возможность усовершенствовать соответствующие математические модели.

Оценивая скорость развития современных технологий в области высокоскоростной съемки и обработки полученных изображений, можно утверждать, что оптические методы анализа еще долгое время будут занимать одно из ведущих положений в исследовательских работах по улучшению рабочего процесса ДВС.

Литература

- [1] Чайнов Н.Д., ред. Конструирование двигателей внутреннего сгорания. М., Машиностроение, 2011.
- [2] Barchenko F.B., Bakulin V.N., Calculation of the thermal loading of the cylinder-piston group of the automobile engine. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 657–664. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1613-y>
- [3] Blinov A., Malastowski N., Myagkov L. Development of the model for a diesel engine catalytic converter. *E3S Web Conf.*, 2019, vol. 140, art. 06013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006013>
- [4] Chainov N.D., Myagkov L.L., Malastowski N.S., et al. Integrated approach for stress analysis of high performance diesel engine cylinder head. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 327, no. 5, art. 052010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052010>
- [5] Winklhofer E. Optical access and diagnostic techniques for internal combustion engine development. *J. Electron. Imaging*, 2001, vol. 10, no. 3, art. 588. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1375813>
- [6] Liu X., Fan Z., Liu F., et al. Optical experimental study on knock characteristics of hydrogen-air pre-mixture. *Proc. IEEE ICDMA*, 2010, pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.415>
- [7] Sankesh D., Lappas P. An experimental and numerical study of natural gas jets for direct injection internal combustion engines. *Fuel*, 2020, vol. 263, art. 116745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116745>
- [8] Гришин Ю.А., Семенчукова В.С. Численное моделирование нестационарного течения в системе "трубопровод-клапан-объем". *Мат. XX Межд. конф. ВМСППС*. М., МАИ, 2017, с. 428–430.
- [9] Павлов А.А., Павлов Ал.А., Голубев М.П. Применение самонаводящихся фильтров Цернике на основе эффекта насыщения для теневой диагностики газовых потоков. *Вестник НГУ. Серия: Физика*, 2014, т. 9, № 1, с. 15–28.
- [10] Semenchukova V., Grishin Y., Malastowski N. Mathematical modeling of a piston engine pneumatic start. *RusAutoCon.*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501794>
- [11] Гришин Ю.А., Семенчукова В.С. Применение нестационарных газодинамических функций в расчетной схеме численного метода распада разрыва. *Мат. XXI Межд. конф. ВМСППС*. М., МАИ, 2019, с. 51–53.
- [12] Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М., Наука, 1976.
- [13] Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. Ч. 1. М., Наука, 1991.
- [14] 3 watt Power LED. *tds-led.com: веб-сайт*. URL: <http://www.tds-led.com/product/html/?14.html> (дата обращения: 15.10.2020).
- [15] Holder D.W., North R.J. Schlieren methods. NPL notes on applied science. Vol. 31. Her Majesty's Stationery Office, 1963.
- [16] VEO 710. *phantomhighspeed.com: веб-сайт*. URL: <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/veo/veo710> (дата обращения: 15.10.2020).
- [17] Высокоскоростная камера Evercam 4000-128-M. *evercam.ru: веб-сайт*. URL: <https://evercam.ru/produksiya/7/217/> (дата обращения: 15.10.2020).
- [18] FASTCAM SA-Z. *photron.com: веб-сайт*. URL: <https://photron.com/fastcam-sa-z/> (дата обращения: 15.10.2020).

Вяликов Дмитрий Вячеславович — студент кафедры «Поршневые двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Маластовский Николай Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Поршневые двигатели», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Вяликов Д.В. Применение оптических методов в исследовании течения газа в системе газообмена двигателя внутреннего сгорания. *Политехнический молодежный журнал*, 2020, № 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-659>

**APPLICATION OF OPTICAL METHODS IN THE STUDY OF GAS FLOW
IN THE GAS EXCHANGE SYSTEM OF AN INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

D.V. Vyalikov

vyalikovdv@mail.ru

SPIN-code: 9286-6087

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**Abstract**

Improving computational algorithms requires reliable experimental data, including in the field of modeling gas-dynamic processes in piston engines. This work evaluates the possibility of using the schlieren method to study wave processes in the gas exchange system of an internal combustion engine. A schematic diagram is presented of an experimental setup based on the schlieren method using a single spherical mirror. A numerical calculation of the gas flow in the intake manifold is carried out and graphical dependences of the gas temperature and density on the angle of rotation of the crankshaft of the piston engine are presented. The requirements for the equipment necessary for the study are determined and a comparison is made between the analogs that meet the requirements.

Keywords

Piston engine, simulation, gas exchange processes, schlieren method, numerical method, wave processes, optical system, experimental stand

Received 12.11.2020

© Bauman Moscow State Technical University, 2020

References

- [1] Chaynov N.D., ed. *Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Control on combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2011 (in Russ.).
- [2] Barchenko F.B., Bakulin V.N., Calculation of the thermal loading of the cylinder-piston group of the automobile engine. *J. Eng. Phys. Thermophy.*, 2017, vol. 90, no. 3, pp. 657–664. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10891-017-1613-y>
- [3] Blinov A., Malastowski N., Myagkov L. Development of the model for a diesel engine catalytic converter. *E3S Web Conf.*, 2019, vol. 140, art. 06013. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201914006013>
- [4] Chainov N.D., Myagkov L.L., Malastowski N.S., et al. Integrated approach for stress analysis of high performance diesel engine cylinder head. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2018, vol. 327, no. 5, art. 052010. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/327/5/052010>
- [5] Winklhofer E. Optical access and diagnostic techniques for internal combustion engine development. *J. Electron. Imaging*, 2001, vol. 10, no. 3, art. 588. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.1375813>
- [6] Liu X., Fan Z., Liu F., et al. Optical experimental study on knock characteristics of hydrogen-air pre-mixture. *Proc. IEEE ICDMA*, 2010, pp. 54–59. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.415>
- [7] Sankesh D., Lappas P. An experimental and numerical study of natural gas jets for direct injection internal combustion engines. *Fuel*, 2020, vol. 263, art. 116745. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116745>

- [8] Grishin Yu.A., Semenchukova V.S. [Numerical modelling of non-stationary flow in “pipeline-valve-volume system”]. *Mat. XX Mezhd. konf. VMSPPS* [Proc. XX Int. Conf. VMSPPS]. Moscow, MAI Publ., 2017, pp. 428–430 (in Russ.).
- [9] Pavlov A.A., Pavlov Al.A., Golubev M.P. Use of self-induced Zernike filters based on saturation effect in gas flow Schlieren diagnostics. *Vestnik NGU. Seriya: Fizika* [Vestnik NSU. Series: Physics], 2014, vol. 9, no. 1, pp. 15–28 (in Russ.).
- [10] [10] Semenchukova V., Grishin Y., Malastowski N. Mathematical modeling of a piston engine pneumatic start. *RusAutoCon.*, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501794>
- [11] Grishin Yu.A., Semenchukova V.S. Primenenie nestatsionarnykh gazodinamicheskikh funktsiy v raschetnoy skheme chislenного metoda raspada razryva [Using nonstationary gas-dynamic functions in computation scheme of numerical method for decay of discontinuity]. *Mat. XXI Mezhd. konf. VMSPPS* [Proc. XXI Int. Conf. VMSPPS]. Moscow, MAI, 2019, pp. 51–53 (in Russ.).
- [12] Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., et al. Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki [Numerical solution of gas dynamics multidimensional problems]. Moscow, Nauka Publ., 1976 (in Russ.).
- [13] Abramovich G.N. Prikladnaya gazovaya dinamika. Ch.1 [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1991 (in Russ.).
- [14] 3 watt Power LED. *tds-led.com: website*. URL: <http://www.tds-led.com/product/html/?14.html> (accessed: 15.10.2020).
- [15] Holder D.W., North R.J. Schlieren methods. NPL notes on applied science. Vol. 31. Her Majesty’s Stationery Office, 1963.
- [16] VEO 710. *phantomhighspeed.com: website*. URL: <https://www.phantomhighspeed.com/products/cameras/veo/veo710> (accessed: 15.10.2020).
- [17] Vysokoskorostnaya kamera Evercam 4000-128-M [Evercam 4000-128-M high-speed camera]. *evercam.ru: website* (in Russ.). URL: <https://evercam.ru/produktsiya/7/217/> (accessed: 15.10.2020).
- [18] FASTCAM SA-Z. *photron.com: website*. URL: <https://photron.com/fastcam-sa-z/> (accessed: 15.10.2020).

Vyalikov D.V. — Student, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Malastovskiy N.S., Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Piston Engines, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Vyalikov D.V. Application of optical methods in the study of gas flow in the gas exchange system of an internal combustion engine. *Politekhnikheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2020, no. 12(53). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2020-12-659.html> (in Russ.).