

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-14-20

Особенности рабочего процесса поршневого двигателя при работе на керосине

Ю.Е. Хрящёв, О.Н. Соколов

Ярославский государственный технический университет

Features of the Piston Engine Working Process when Working on Kerosene

Y.E. Khryashchov, O.N. Sokolov

Yaroslavl State Technical University

Для малой авиации многоцелевого назначения поршневые двигатели более эффективны, чем газотурбинные. Основное техническое требование, предъявляемое к таким двигателям, — безотказность при наилучшей топливной экономичности. При этом в нормах по содержанию вредных веществ в отработавших газах авиационных поршневых двигателей регламентировано только отсутствие видимого дымления. При разработке авиационных поршневых двигателей многоцелевого назначения обеспечение их многотопливности, включая работу на керосине ТС-1 и дизельном топливе, является актуальной задачей. Однако проблема настройки алгоритмов управления двигателем при работе на керосине ТС-1 практически не изучена. В целях доводки алгоритмов управления проведены исследования протекания рабочего процесса на таком топливе. Показано влияние последовательности этапов рабочего процесса двигателя на формирование периода задержки воспламенения. На основе анализа факторов, влияющих на период задержки воспламенения, сформирована карта значений углов опережения впрыскивания топлива. По экспериментальным данным принята энергия активации предпламенных реакций, составляющая 23...28 кДж/моль для керосина ТС-1.

Ключевые слова: авиационный поршневой двигатель, рабочий процесс, керосин, период задержки воспламенения, алгоритмы управления, индикаторная диаграмма

For aircraft in light multi-purpose aviation, piston engines are considered more efficient than gas turbine. The main technical requirement for such engines is to ensure trouble-free operation with the best possible fuel efficiency. At the same time, there are no requirements to emission of harmful substances in exhaust fumes except for the absence of visible smoke. When developing multi-purpose aircraft piston engines, it is important to ensure their multi-fuel operation, including operation on TS-1 kerosene and diesel fuel. But the issues associated with setting engine control algorithms for operation on TS-1 kerosene are practically unexplored. In order to refine the control algorithms, the flow of the working process using such fuel was studied in this work. The effect of sequencing the working process stages on the formation of the ignition delay period was shown. Based on the

analysis of the factors affecting the ignition delay period, a map of the fuel injection advance angle values was generated. According to the experimental data, the activation energy of pre-flame reactions was adopted, which for kerosene TS-1 was 23–28 kJ/mol.

Keywords: aviation piston engine, working process, ignition delay period, control algorithms, experimental research, indicator diagram

Известно, что для малой авиации многоцелевого назначения поршневые двигатели более эффективны, чем газотурбинные, вследствие лучшей топливной экономичности и массогабаритных параметров летательного аппарата. Последнее объясняется необходимостью применения с газотурбинными двигателями понижающего редуктора. К настоящему времени зарубежными производителями легкой поршневой авиации (такими как Teledine, Continental, Rotax) накоплен опыт производства и доводки авиационных поршневых двигателей (АПД). Но в России такого опыта нет ни для АПД, ни для двигателей, работающих на керосине по циклу с воспламенением от сжатия.

Основным техническим требованием, предъявляемым к таким двигателям, является обеспечение безотказности работы при наилучшей топливной экономичности. При этом в нормах по содержанию вредных веществ в отработавших газах АПД регламентировано только отсутствие видимого дымления.

Работы по их доводке и настройке АПД сводятся к исследованию внутрицилиндрового процесса с учетом следующих особенностей:

- мощность двигателя до 400 кВт;
- основное топливо — керосин ТС-1, который отличается от традиционного дизельного топлива (ДТ) значениями кинематической вязкости, плотности, температуры испарения, поверхностного натяжения, цетанового числа, энергии активации предпламенных реакций и другими параметрами, способными повлиять на впрыскивание, смесеобразование и сгорание [1–5];
- максимальная частота вращения коленчатого вала $n = 3700 \dots 3800 \text{ мин}^{-1}$ (причем во взлетном режиме она достигает 4000 мин^{-1}) при максимальном крутящем моменте;
- эксплуатация на высотах до 4000 м;
- отсутствие системы рециркуляции отработавших газов.

Упомянутые особенности оказывают влияние на период задержки воспламенения (ПЗВ), динамику нарастания давления, максимальные давление и температуру в цилиндре и др.

Объектом исследования являлся АПД с воспламенением от сжатия, основным топливом которого служит керосин ТС-1 (ГОСТ 10227–86).

Техническая характеристика АПД с воспламенением от сжатия

Ход поршня/диаметр цилиндра, мм	88/90
Номинальная мощность, кВт	220
Номинальная частота вращения, мин^{-1}	4000
Крутящий момент при номинальной мощности, Н·м	525
Рабочий объем, л	3,284
Число цилиндров	6
Степень сжатия	18:1
Максимальное давление сгорания, МПа	17

Цель работы — определение продолжительности протекания процессов впрыскивания, смесеобразования и сгорания при работе АПД с воспламенением от сжатия на керосине ТС-1 и летнем ДТ (ГОСТ 305–2013), а также разработка карты значений углов опережения впрыскивания топлива на основе экспериментальной оценки ПЗВ и последующей верификации аналитических данных.

Аналитическая оценка ПЗВ и характера сгорания в целом базируется на фундаментальных принципах химической кинетики (на уравнении Аррениуса) [6–8]. Расчеты процессов сгорания с применением детального кинетического механизма являются весьма трудоемкими и требуют больших вычислительных ресурсов. При доводке двигателя используют также полуэмпирические модели, позволяющие провести расчеты с приемлемой точностью и достоверностью [9].

Наиболее существенное влияние на ПЗВ оказывают следующие параметры:

- цетановое число топлива; чем оно выше, тем легче воспламеняется;
- уровень энергии активации предпламенных реакций; даже для топлива одного и того же вида он может составлять $50 \dots 200 \text{ кДж/моль}$ в зависимости от условий реализации процесса воспламенения [10];
- степень сжатия; в частности, изменение степени сжатия на 1,5 единицы (с 17,0 до 18,5)

приводит к снижению ПЗВ на 0,15 мс [11], что при частоте вращения коленчатого вала $n = 4000 \text{ мин}^{-1}$ составляет $3,6^\circ$ угла поворота коленчатого вала (ПКВ) и при высоком наддуве может привести к колебаниям, вызывающим неравномерность наполнения цилиндра и, как следствие, к межцикловой нестабильности фактической степени сжатия; таким образом, последствия от изменения степени сжатия следует учитывать при согласовании фаз газораспределения и при проектировании впускного коллектора;

- температура и давление горючей смеси в цилиндре двигателя; причем известна неоднозначность их влияния на ПЗВ [1].

Кроме того, существует взаимовлияние указанных параметров. Например, от степени сжатия зависит как температура, так и давление горючей смеси в цилиндре двигателя. Вследствие неопределенности характера влияния

различных факторов на ПЗВ целесообразно учитывать их фактическую значимость.

Анализ работ, содержащих данные по оценке ПЗВ [9, 12–14], показал, что для сравнения различных топлив (по цетановому числу и энергии активации предпламенных реакций) подходит лишь модифицированная формула А.И. Толстова [9]

$$\tau_{it} = 3,8 \cdot 10^{-6} (1 - 1,6 \cdot 10^{-4} n) \sqrt{\frac{T}{p}} \times \exp\left(\frac{E_a}{8,312T} \frac{70}{CN + 25}\right), \quad (1)$$

где τ_{it} — ПЗВ; n — частота вращения коленчатого вала; T и p — температура и давление газа в цилиндре в момент начала подачи топлива; E_a — энергия активации предпламенных реакций; CN — цетановое число топлива.

Температура и давление смеси в цилиндре двигателя, используемые в аналитических выражениях для расчета ПЗВ, являются переменными величинами. На этапе численного анализа характеристик двигателя с помощью программного пакета ANSYS Fluent [15] получены зависимости температуры T_b , давления p_b и массового расхода воздуха Q_b во впускных и выпускных коллекторах от угла ПКВ ϕ (рис. 1). При анализе рабочего процесса эти зависимости использованы в качестве граничных условий.

Для определения границ теоретического изменения ПЗВ на основе формулы (1) проведен расчет, в результате которого установлено, что при функционировании двигателя на керосине ТС-1 ПЗВ находится в пределах 0,7...0,9 мс, а при его работе на летнем ДТ — в диапазоне 0,4...0,8 мс (рис. 2).

У двигателя, использующего в качестве топлива керосин ТС-1, интервал, в котором может находиться ПЗВ в зависимости от энергии активации и цетанового числа (см. рис. 2), по абсолютному значению выше, чем у двигателя, работающего на летнем ДТ. В соответствии с данными литературных источников цетановое число керосина ТС-1 принято равным 43 [3], а энергия активации предпламенных реакций — 25...28 кДж/моль [16]. Указанные значения использованы для аналитического расчета ПЗВ.

Верификация аналитической формулы для вычисления ПЗВ проведена по экспериментальным индикаторным диаграммам. На рис. 3, а и б показаны полученные с помощью системы индицирования AVL Ki-BOX индикаторные диа-

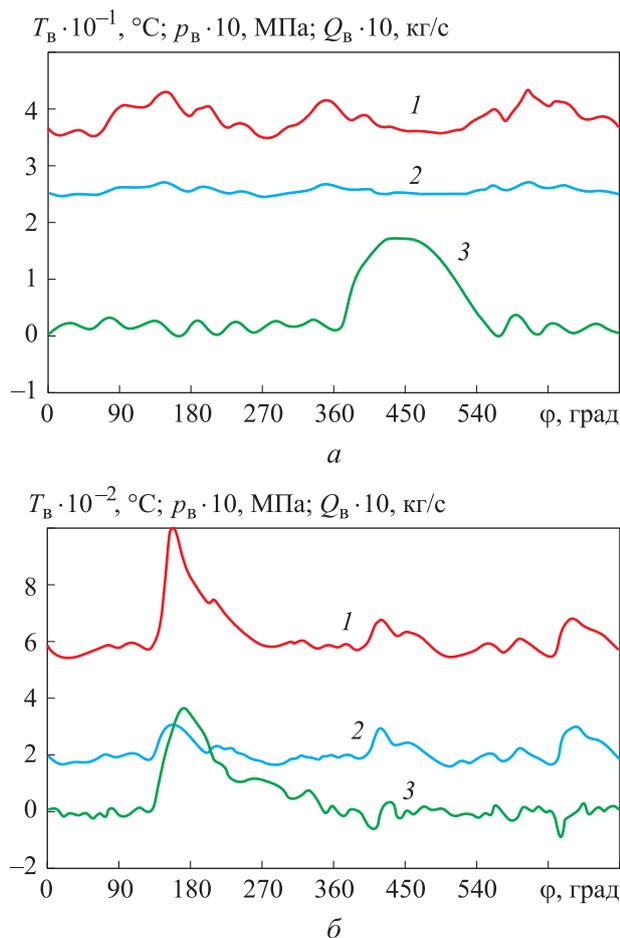


Рис. 1. Зависимости температуры T_b (1), давления p_b (2) и массового расхода Q_b (3) воздуха во впускном (а) и выпускном (б) коллекторах от угла ПКВ ϕ

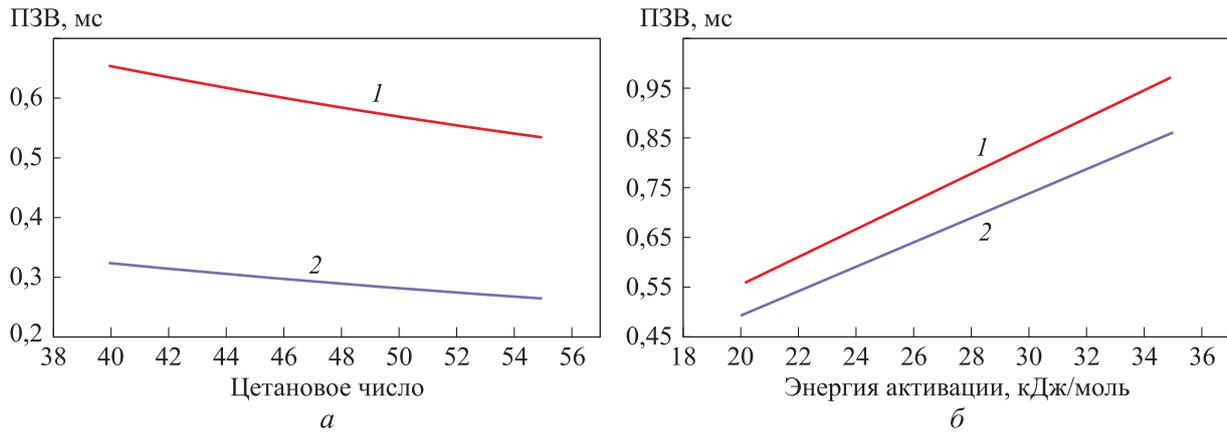


Рис. 2. Зависимости ПЗВ от цетанового числа (а) и энергии активации предпламенных реакций (б) при работе двигателя на керосине ТС-1 (1) и летнем ДТ (2)

граммы (кривые 1) для двигателя, работающего на керосине ТС-1 и летнем ДТ, при одно- и двухфазном впрыскивании топлива. На диаграммы наложены сигналы управления (в виде основного 2 и пилотного 3 импульсов), инициирующие срабатывание электромагнита форсунок системы топливоподачи. На рис. 3 введены следующие обозначения: φ_1 — угол ПКВ от начала подачи сигнала управления до начала сгорания предварительного впрыска топлива; τ_1 и τ_2 — задержка начала впрыскивания и воспламенения топлива; φ_2 — угол ПКВ от начала подачи сигнала управления до начала сгорания основного впрыска топлива; $\Delta\varphi_1$ и $\Delta\varphi_2$ — углы ПКВ между сигналами предварительного и основного впрыска для керосина и дизельного топлива соответственно.

Выбор значений углов опережения впрыскивания топлива для формирования карты проведен по диаграммам давления в цилиндре из условия их наибольшего совпадения вблизи максимальных значений давления ($\varphi = 10^\circ$ ПКВ после верхней мертвой точки — ВМТ). Задержка воспламенения рассчитана от момента выхода топлива из сопла распылителя до момента видимого нарастания давления по диаграмме давления в цилиндре.

Оценка задержки начала впрыскивания топлива τ_1 (времени срабатывания электрогидравлической форсунки, определяемого как период между началом подачи сигнала управления на электромагнит форсунки и моментом начала впрыскивания топлива) проведена экспериментально путем осциллографирования сигнала управления форсункой и сигнала с пьезоэлектрического датчика, регистрирующего момент начала впрыскивания топлива (рис. 4). На

рис. 4 обозначены характерные области сгорания 1–3, а также время догорания топлива после окончания топливоподачи τ_3 и задержки начала впрыскивания топлива τ_1 и его воспламенения τ_2 .

Анализ диаграмм, приведенных на рис. 3, выполнен при значениях давления топлива и продолжительности управляющего форсункой

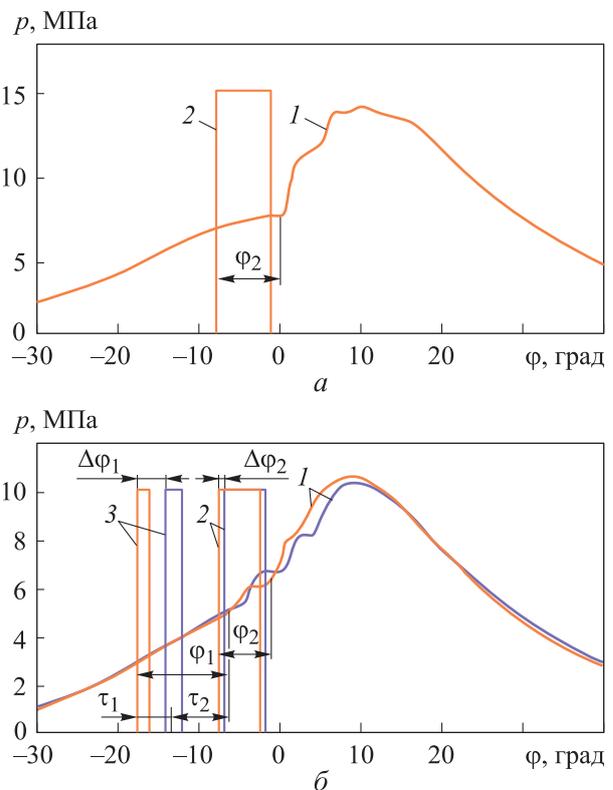


Рис. 3. Индикаторные диаграммы давления горячей смеси p в цилиндре двигателя, работающего на керосине ТС-1 (—) и летнем ДТ (—), при одно- (а) и двухфазном (б) впрыскивании топлива

импульса, соответствующих исследуемому режиму (аналогичному условиям в двигателе), но без учета противодавления газов в камере сгорания (впрыска в атмосферу).

Задержка τ_1 составила 350 мкс, что при частоте вращения коленчатого вала $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ соответствует $4,2^\circ$ ПКВ. Величина $\Delta\phi$ является постоянной для данного режима работы двигателя. Остальное время, т. е. продолжительность от начала выхода топлива из сопла распылителя до момента видимого нарастания давления, занимают процессы распада топливных струй и испарения капель топлива, которые представляют собой подготовительные фазы перед его сгоранием.

Анализ временных характеристик выполнен также для двухфазного впрыскивания (см. рис. 3, б), поскольку такие параметры, как максимальное давление и жесткость сгорания, для данного режима имеют более предпочтительные значения в отличие от характера сгорания при однофазном впрыскивании (см. рис. 3, а). Временные характеристики процесса сгорания приведены в таблице, где ϕ_1 , ϕ_2 , τ_1 , $\Delta\phi_1$ и $\Delta\phi_2$ являются постоянными величинами.

Верификация аналитической формулы (1) показала хорошую сходимость расчетных данных с экспериментальными (с погрешностью до 1 %) в определении задержки воспламенения при работе двигателя на керосине ТС-1, а также хорошие показатели для второй фазы процесса впрыскивания и тепловыделения.

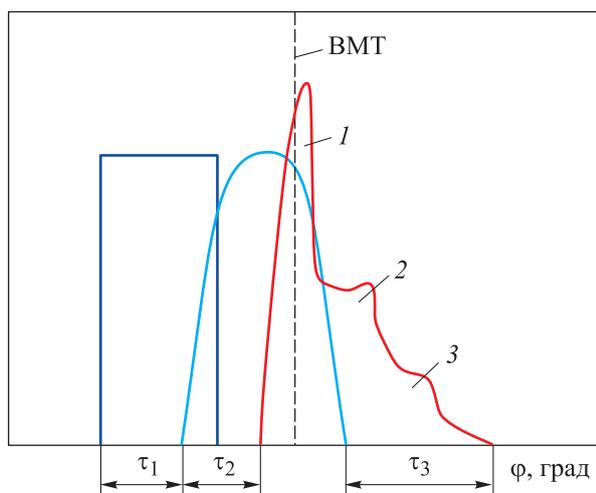


Рис. 4. График к определению времени срабатывания электрогидравлической форсунки:
— сигнал управления форсункой;
— дифференциальная характеристика впрыска;
— характер тепловыделения

Временные характеристики процесса сгорания

Параметр	Значение при работе двигателя	
	на керосине ТС-1	на летнем ДТ
τ_2 , град ПКВ (мс)	7,51 (0,625) 7,48 (0,623)	3,18 (0,265) 3,14 (0,262)
ϕ_1 , град ПКВ (мс)	11,00 (0,917)	7,48 (0,623)
ϕ_2 , град ПКВ (мс)	8,00 (0,667)	7,10 (0,592)
τ_1 , град ПКВ (мс)	4,2 (0,350)	
$\Delta\phi_1$, град ПКВ (мс)	3,5 (0,291)	
$\Delta\phi_2$, град ПКВ (мс)	1,0 (0,083)	

Примечание. В числителе дроби указаны расчетные значения, в знаменателе — экспериментальные.

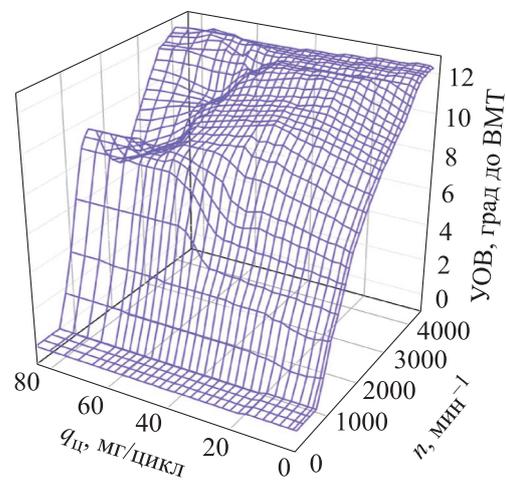


Рис. 5. Карта значений углов опережения впрыскивания УОВ топлива

Карта значений углов опережения впрыскивания топлива приведена на рис. 5, где $q_{ц}$ — цикловая подача топлива.

Выводы

1. Выполнен комплекс расчетных исследований для оценки параметров рабочего процесса АПД с воспламенением от сжатия.

2. Экспериментально установлены продолжительности протекания процессов впрыскивания, смесеобразования и сгорания для такого АПД, работающего на керосине ТС-1 и летнем дизельном топливе.

3. Проведена верификация аналитической формулы для определения ПЗВ, показавшая удовлетворительное совпадение расчетных данных с экспериментальными при работе АПН как на летнем дизельном топливе, так и на керосине ТС-1. Наилучшее совпадение резуль-

татов расчета и эксперимента обнаружено при работе двигателя на керосине ТС-1 с энергией активации 27 кДж/моль.

4. Чтобы обеспечить двигателю, работающему на керосине ТС-1, те же показатели процесса сгорания, что и у двигателя, функционирующе-

го на летнем ДТ, необходимо увеличить угол опережения впрыскивания топлива на $3...4^\circ$ угла ПКВ.

5. На основе анализа факторов, влияющих на ПЗВ, сформирована карта значений углов опережения впрыскивания топлива.

Литература

- [1] Кавтарадзе Р.З. *Теория поршневых двигателей*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 720 с.
- [2] Марков В.А., Девянин С.Н., Мальчук В.И. *Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 360 с.
- [3] Марков В.А., Гайворонский А.И., Грехов Л.В., Иващенко Н.А. *Работа дизелей на нетрадиционных топливах*. Москва, Легион-Автодата, 2008. 464 с.
- [4] ГОСТ 32511–2013. *Топливо дизельное ЕВРО. Технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2013. 16 с.
- [5] ГОСТ 10227–2013. *Топлива для реактивных двигателей. Технические условия*. Москва, Стандартинформ, 2014.
- [6] Семенов Н.Н. *Цепные реакции*. Москва, Наука, 1986. 535 с.
- [7] Сергеев С.С., Фролов С.М., Басара Б. Численное моделирование сгорания и образования вредных веществ в цилиндре дизеля с применением детального кинетического механизма окисления н-гептана. *Горение и взрыв*, 2017, т. 10, № 2, с. 26–34.
- [8] Фролов С.М., Иванов В.С., Тухватуллина Р.Р., Фролов Ф.С., Кузнецов Н.М., Басара Б. Расчет рабочего процесса в дизеле с уравнением состояния реального газа. *Горение и взрыв*, 2019, т. 12, № 1, с. 73–83.
- [9] Кулешов А.С. *Развитие методов расчета и оптимизации рабочих процессов ДВС*. Дисс. ... докт. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 236 с.
- [10] Семенов Б.Н., Павлов Е.П., Копцев В.П. *Рабочий процесс высокооборотных дизелей малой мощности*. Ленинград, Машиностроение, 1990. 240 с.
- [11] Бузуков А.А. *Промотирующее влияние алкилнитратов на самовоспламенение керосиновоздушной смеси*. Новосибирск, ИТПМ СО РАН, 1994, с. 11–20.
- [12] Abianeh S.O., Curtis N., Sung C.-J. Determination of modeled luminosity-based and pressure-based ignition delay times of turbulent spray combustion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 103, pp. 1297–1312, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.067
- [13] Abianeh S.O., Levins M., Chen C.P. Pressure-Based Ignition Delay Times Of Non-Premixed Turbulent Jet Flames Using Various Turbulence Models. *Proceedings of the ASME 2016 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, Greenville, SC, USA, 9–12 October 2016, doi: 10.1115/ICEF20169307
- [14] Дубовкин Н.Ф., Маланичева В.Г., Массур Ю.П., Федоров Е.П. *Физико-химические и эксплуатационные свойства реактивных топлив: Справочник*. Москва, Химия, 1985. 240 с.
- [15] ANSYS *Fluent Theory Guide: Release 13.0*. ANSYS, Inc. 2010. 390 p.
- [16] Ashgriz N. *Handbook of atomization and sprays*. Springer, 2011. 935 p.

References

- [1] Kavtaradze R.Z. *Teoriya porshnevykh dvigateley* [Theory of piston engines]. Moscow, Bauman Press, 2008. 720 p.
- [2] Markov V.A., Devyanin S.N., Mal'chuk V.I. *Vpryskivaniye i raspylivaniye topliva v dizelyakh* [Fuel injection and atomization in diesel engines]. Moscow, Bauman Press, 2007. 360 p.
- [3] Markov V.A., Gayvoronskiy A.I., Grekhov L.V., Ivashchenko N.A. *Rabota dizeley na netraditsionnykh toplivakh* [The work of diesel engines on alternative fuels]. Moscow, Legion-Avtodata publ., 2008. 464 p.
- [4] *State Standard 32511–2013. Diesel fuel EURO. Specifications*. Moscow, Standartinform publ., 2013. 16 с.

- [5] *State Standard 10227–2013. Jet fuels. Specifications*. Moscow, Standartinform publ., 2014.
- [6] Semenov N.N. *Tsepnyye reaktsii* [Chain reactions]. Moscow, Nauka publ., 1986. 535 p.
- [7] Sergeyev S.S., Frolov S.M., Basara B. Numerical modeling of combustion and pollutants formation in cylinder of diesel using a detailed kinetic mechanism of n-heptane oxidation. *Goreniye i vzryv*, 2017, vol. 10, no. 2, pp. 26–34 (in Russ.).
- [8] Frolov S.M., Ivanov B.C., Tukhvatullina R.R., Frolov F.S., Kuznetsov N.M., Basara B. Numerical simulation of the operation process in a diesel engine with the real-gas equation of state. *Goreniye i vzryv*, 2019, vol. 12, no. 1, pp. 73–83 (in Russ.).
- [9] Kuleshov A.S. *Razvitiye metodov rascheta i optimizatsii rabochikh protsessov DVS*. Dokt. Diss. [Development of methods for calculating and optimizing workflows of internal combustion engines. Doct. Diss.]. Moscow, 2011. 236 p.
- [10] Semenov B.N., Pavlov E.P., Koptsev V.P. *Rabochiy protsess vysokooborotnykh dizeley maloy moshchnosti* [Workflow of high speed low power diesel engines]. Leningrad, Mashinostroyeniye publ., 1990. 240 p.
- [11] Buzukov A.A. *Promotiruyushcheye vliyaniye alkilnitratov na samovosplamneniye kerosino-vozduшной smesi* [The promoting effect of alkyl nitrates on the self-ignition of a kerosene-air mixture]. Novosibirsk, ITPM SO RAN publ., 1994, pp. 11–20.
- [12] Abianeh S.O., Curtis N., Sung C.-J. Determination of modeled luminosity-based and pressure-based ignition delay times of turbulent spray combustion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, vol. 103, pp. 1297–1312, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.06.067
- [13] Abianeh S.O., Levins M., Chen C.P. Pressure-Based Ignition Delay Times Of Non-Premixed Turbulent Jet Flames Using Various Turbulence Models. *Proceedings of the ASME 2016 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference*, Greenville, SC, USA, 9–12 October 2016, doi: 10.1115/ICEF20169307
- [14] Dubovkin N.F., Malanicheva V.G., Massur Yu.P., Fedorov E.P. *Fiziko-khimicheskiye i ekspluatatsionnyye svoystva reaktivnykh topliv: Spravochnik* [Physico-chemical and operational properties of jet fuels: a Handbook]. Moscow, Khimiya publ., 1985. 240 p.
- [15] ANSYS *Fluent Theory Guide: Release 13.0*. ANSYS, Inc. 2010. 390 p.
- [16] Ashgriz N. *Handbook of atomization and sprays*. Springer, 2011. 935 p.

Статья поступила в редакцию 30.05.2019

Информация об авторах

ХРЯЩЁВ Юрий Евгеньевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Ярославский государственный технический университет (150023, Ярославль, Российская Федерация, Московский проспект, 88, e-mail: khr.u.e@mail.ru).

СОКОЛОВ Олег Николаевич — аспирант кафедры «Двигатели внутреннего сгорания». Ярославский государственный технический университет (150023, Ярославль, Российская Федерация, Московский проспект, 88, e-mail: sokol208@mail.ru).

Information about the authors

KHRYASHCHOV Yuri Yevgenyevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Internal Combustion Engines. Yaroslavl State Technical University (150023, Yaroslavl, Russian Federation, Moskovskiy Ave., Bldg. 88, e-mail: khr.u.e@mail.ru).

SOKOLOV Oleg Nikolaevich — Postgraduate, Department of Internal Combustion Engines. Yaroslavl State Technical University (150023, Yaroslavl, Russian Federation, Moskovskiy Ave., Bldg. 88, e-mail: sokol208@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хрящёв Ю.Е., Соколов О.Н. Особенности рабочего процесса поршневого двигателя при работе на керосине. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 12, с. 14–20, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-14-20

Please cite this article in English as:

Khryashchov Y.E., Sokolov O.N. Features of the Piston Engine Working Process when Working on Kerosene. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 12, pp. 14–20, doi: 10.18698/0536-1044-2019-12-14-20