

16. *Musaev M.M.O., Kisel' N.N.* Chislennoe i eksperimental'noe issledovanie metamaterialov na osnove spiral'nykh elementov [Numerical and experimental study of metamaterials based on spiral elements], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 81-86.
17. *Kisel' N.N., Cheremisov V.A., Derachits D.S.* Issledovanie kharakteristik mikropoloskovoy anteny s neodnorodnoy podlozhkoy na osnove metamateriala [Study of characteristics of microstrip antennas with inhomogeneous substrate-based metamaterial], *26-ya Mezhdunarodnaya Krymskaya konferentsiya "SVCh-tehnika i Itelekommunikatsionnye tekhnologii" (KryMiKo 2016): Mater. Konferentsii* [26-th international Crimean conference "microwave and telecommunication technology" (Computer vision 2016): Proceedings of the conference]; in 13 vol., 2016, pp. 983-989.
18. *Kisel' N.N.* Elektrodinamicheskoe modelirovanie antenn i ustroystv SVCh v pakete FEKO: ucheb. posobie [Electrodynamic modeling of antennas and microwave devices in the FEKO package: tutorial]. Taganrog, 2010, 263 p.
19. *Kisel' N.N.* Modelirovanie prikladnykh zadach elektrodinamiki i antenn na supervychislitel'noy sisteme v pakete FEKO [Simulation of applied problems of electrostatics and antennas on the supercomputing system in the FEKO package]. Taganrog, 2013, 326 p.
20. *Kisel' N.N.* Osnovy komp'yuternogo proektirovaniya RES SAPR SVCh: ucheb. posobie [Fundamentals of computer design of RES CAD microwave: tutorial]. Taganrog, 2016, 196 p.

Статью рекомендовал к публикации д.т.н., профессор А.М. Макаров.

**Хамед Ебрахим Абдо Махьюб** – Южный федеральный университет; e-mail: eng.hamedebrahim@yandex.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Некрасовский, 44; тел.: +78634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; аспирант.

**Кисель Наталья Николаевна** – e-mail: nnkisel@sfned.ru; кафедра антенн и радиопередающих устройств; доцент.

**Hamed Ebrahim Abdo Mahyoub** – Southern Federal University; e-mail: eng.hamedebrahim@yandex.ru; 44, Nekrasivsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371634; postgraduate student.

**Kisel Natalia Nikolayevna** – e-mail: nnkisel@sfned.ru; associate professor.

УДК 629.113

DOI 10.23683/2311-3103-2019-3-198-207

**А.Л. Береснев, М.А. Береснев, А.В. Быстрицкий**

## **ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫМ ГОРЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В ДВС**

*Рассматриваются недостаточно изученные аспекты управления двигателем внутреннего сгорания, такие как детонация. Авторы предлагают использовать этот, считающийся случайным, процесс для повышения крутящего момента и мощности двигателя внутреннего сгорания. При детонации вместо постоянного фронтального пламени в зоне сгорания образуется детонационная волна, несущаяся со сверхзвуковой скоростью. В волне сжатия детонируют топливо и окислитель. Этот процесс, с точки зрения термодинамики, повышает КПД двигателя благодаря компактности зоны. Рассматривается возможность использования детонационного сгорания топливно-воздушной смеси в двигателе внутреннего сгорания, как полезной части рабочего процесса и делается предположение о возможности управления горением топливно-воздушной смеси в смешанном режиме, позволяющем улучшить индикаторные показатели. Хотя детонация считается разрушительным явлением, возможность непродолжительного сгорания части ТВС с детонацией заложена в конструкции современных двигателей. Это вызвано существенным отличием марок топлива, различным подходом к определению октанового числа, изменением свойств бензина в зависимости от используемых присадок и т.д. Разработан стенд для экспери-*

*ментального подтверждения высказанных предположений, оборудованный оригинальным датчиком давления в камере сгорания, позволяющим фиксировать индикаторную диаграмму и детонацию. Приведен пример получения улучшенных внешних скоростных характеристик. И представлены индикаторные диаграммы позволяющие объяснить улучшение внешних скоростных характеристик. В заключение высказаны предположения по изменению характеристик параметров горения топливовоздушной смеси и намечены последующие этапы для изучения возможности использования части топлива в режиме детонации с целью управления процессом горения.*

*Двигатель внутреннего сгорания; детонация; горение.*

**A.L. Beresnev, M.A. Beresnev, A.V. Bystritskii**

### **KNOCK COMBUSTION CONTROL POSSIBILITIES FOR VARIOUS IC-ENGINE TYPES**

*In article insufficiently studied aspects of engine management of internal combustion, such as detonation are considered. Authors suggest to use this, considered as accidental, process for increase in torque and power the internal combustion engine. At detonation instead of constant frontal flame in zone of combustion the detonation wave rushing with supersonic speed is formed. In wave of compression fuel and oxidizer detonate. This process, in terms of thermodynamics, increases engine efficiency thanks to compactness of zone. The possibility of use of detonation combustion of fuel-air mixture in the internal combustion engine as useful part of working process and the assumption of possibility of steering of burning of fuel-air mixture in the displaced mode allowing to improve indicator indicators becomes is considered. Though the detonation is considered the destructive phenomenon, the possibility of short combustion of part of TVS with detonation is put in design of modern engines. It is caused by essential difference of grades of fuel, various approach to determination of octane number, change of properties of gasoline depending on the used additive compounds, etc. The stand is developed for experimental confirmation suggested, equipped with the original pressure control device in combustion chamber allowing to fix the indicator chart and detonation. The example of obtaining the improved external high-speed characteristics is given. Also the indicator charts allowing to explain improvement of external high-speed characteristics are submitted. Are in conclusion suggested on change of characteristics of parameters of burning of fuel-air mixture and the subsequent stages for studying of possibility of use of part of fuel in the detonation mode for the purpose of steering of burning process are planned.*

*Internal combustion engine; detonation; combustion.*

**Введение.** Советский физик Я.Б. Зельдович предложил идею детонационного двигателя в статье «Об энергетическом использовании детонационного сгорания» [1]. Значительное увеличение эффективности такого двигателя по сравнению с обычным ДВС достигается благодаря тому, что процесс детонационного горения протекает на два порядка быстрее дефлаграции. В результате при постоянном объеме быстро возрастает давление. Выделение полученного таким образом количества энергии, к сожалению, вполне способно разрушить двигатель автомобиля, поэтому такой процесс часто ассоциируется со взрывом. Работы в данном направлении ведутся во всем мире с переменным успехом [2–5]. Над перспективной идеей работали многие учёные из разных стран, вперёд выходили то США, то Германия, то наши соотечественники. В настоящее время использование детонации достигло конкретных результатов, в августе 2016 года российским учёным удалось создать впервые в мире полноразмерный жидкостный реактивный двигатель, работающий на принципе детонационного сгорания топлива [6].

**Детонация в современном ДВС.** При детонации вместо постоянного фронтального пламени в зоне сгорания образуется детонационная волна, несущаяся со сверхзвуковой скоростью. В волне сжатия детонируют топливо и окислитель. Этот процесс, с точки зрения термодинамики, повышает КПД двигателя благодаря компактности зоны [1].

В двигателях внутреннего сгорания существуют два различных режима пространства горения топливо воздушной смеси (ТВС). В режиме медленного горения ТВС сгорает во фронте пламени, скорость которого определяется процессами переноса, теплопроводностью, диффузией и скоростью химических реакций. В режиме детонационного горения сжатие и нагрев горючей смеси, приводящие к её воспламенению, осуществляются благодаря ударной волне, вызывающей взрывную реакцию. [2]

ДВС работающий в режиме детонационного сгорания в настоящее время изучены недостаточно. Известно, что возможность детонации зависит от геометрии камеры сгорания, состояния и состава ТВС [6].

Необходимо учитывать: современные двигатели внутреннего сгорания плохо переносят режим детонации, но возможность непродолжительного сгорания части ТВС с детонацией заложена в их конструкции. Это вызвано существенным отличием марок топлива, различным подходом к определению октанового числа, изменением свойств бензина в зависимости от используемых присадок и их старения в зависимости от времени нахождения в разных емкостях до начала впрыска в цилиндр. Кроме того различные ДВС с одинаковой степенью сжатия и отличающиеся геометрией цилиндропоршневой группы, формой камеры сгорания, местом установки свечи, допусками алгоритмов расчета в системе управления двигателя и некоторыми другими параметрами обладают разной склонностью к детонации.

Таким образом ситуации возникновения детонации в настоящее время постоянно изучаются, к ним как правило относятся, как к вредной составляющей процесса горения, для борьбы с которой необходимо совершенствовать ДВС, управление им и совершенствование топлива [7–9].

Не смотря на значительные сложности использования детонации в двигателе внутреннего сгорания соблазн ее использования не в каждом цикле, а только в некоторые моменты работы ДВС может оказаться актуальным, что в дальнейшем позволит обосновать изменения в двигателе.

**Критический анализ средств управления детонацией.** Из выше сказанного можно сделать предположения для выбора управляющих воздействий детонационными процессами, могут быть использованы:

- 1) изменение степени сжатия и геометрии деталей двигателя;
- 2) изменение качества бензина;
- 3) изменение качества смеси;
- 4) изменение угла опережения зажигания(УОЗ);
- 5) регулирование давления воздуха с одновременным поддержанием состава ТВС;
- 6) регулирование температуры подаваемого воздуха;
- 7) использование бинарного топлива.

Далее следует выделить наиболее правильный подход принимая во внимание: возможность реализации и влияние на индикаторные параметры.

Существуют конструкции ДВС позволяющие менять степень сжатия за счет перемещения коленчатого вала, головки блока цилиндров, изменения формы камеры сгорания и высоты поршня. Все выше перечисленные и некоторые более экзотические варианты не нашли широкого распространения из-за сложностей производства и надежности [10, 11].

Использование в качестве управляющего воздействия изменение октанового числа бензина процесс сложный, по видимому с плохой повторяемостью и не возможностью учета множества случайных факторов [12, 13].

Широко известен способ уменьшения детонации за счет создания «богатой» ТВС. Создавая ситуацию, вызывающую детонационное сгорание, одним из выше перечисленных способов, можно охладить камеру сгорания дополнительным количеством топлива, тем самым уменьшая детонацию, но этот подход увеличивает расход топлива и значительно ухудшает экологические параметры [14,].

Следующим, широко распространенным методом управления детонацией, можно считать изменение УОЗ. Главным недостатком которого является смещение точки максимального давления на индикаторной диаграммы, и как следствие ухудшение индикаторных параметров. Кроме того перспективным представляется, использовать двигатели с камерами сгорания, не допускающие возможности использования оптимальные УОЗ при максимальных нагрузках, в таких ДВС максимальное давление в КС в необходимом режиме как правило достигается после 25 гр. по коленчатому валу (КВ) после ВМТ. По этому появляется возможность управляя углом опережения зажигания доводить ДВС до «жесткой» работы в нужном диапазоне, одновременно оптимизируя УОЗ и улучшая индикаторную диаграмму.

В двигателях оснащенных различными типами наддува впускного воздуха возможно регулировать детонационное горение изменяя давление во впуске и это один из самых удобных способов. Главная сложность такого варианта вызвана большим временем транспортного запаздывания, то есть не возможно, как мгновенно поднять давление, так и его сбросить. На это часто уходит время сопоставимое с несколькими десятками оборотов ДВС. Еще более сложным вариантом является управление температурой надвудного воздуха, внедряя дополнительную систему в интеркуллер изменять температуру не сложно, но обеспечить необходимое быстроедействие затруднительно [15, 16].

Наиболее оправданным вариантом управления детонационным горением может являться использование нескольких видов топлива с разными октановыми числами. Так например для борьбы с детонацией высокофорсированных двигателей используется система с дополнительной форсункой подающей во впуск высокооктановую охлаждающую смесь.

Удачным вариантом следует считать экспериментальную систему [17, 19] оборудованную двумя рядами форсунок для подачи бензина и газового топлива с возможностью регулирования состава топлива в каждом такте по каждому компоненту для каждого цилиндра.

Таким образом в дальнейшем перспективно использовать бинарное топливо, которое не только позволит выставить оптимальный УОЗ при любой нагрузке и оборотах, но и представляет возможность, представляет возможность, меняя состав топлива поддерживать долю детонирующего топлива.

В настоящий момент наиболее простым вариантом для проведения эксперимента может послужить использование склонности ДВС к детонации на максимальных нагрузках в диапазоне от 2000 об./мин. до 3500 об./мин. Как правило в этом режиме УОЗ далек от оптимального и есть возможность перемещая его в раннюю область сжигать часть ТВС в режиме детонации.

**Типы детонации в ДВС.** Известно, что детонационное горение ТВС процесс сложно описываемый количественными параметрами [11]. Значительное влияние на развитие детонации влияет момент возникновения относительно верхней мертвой точки (ВМТ) поршня в цилиндре и доля топлива в ней участвующая [18]. Детонация возникающая до ВМТ не может быть использована, как абсолютно вредная. В дальнейшем необходимо изучить возможности использования детонационного горения происходящего близко к точке оптимального максимального давления в цилиндре. Получение индикаторных диаграмм давления внутри цилиндра может позволить классифицировать процессы детонационного горения не только,

как условно полезные и вредные, но и выявить рабочие такты которые допустимы и за счет которых происходит увеличение крутящего момента. В тоже время можно сделать предположение, что учитывая разброс входных параметров по циклам необходимо управлять процессом горения таким образом что бы появилась возможность прогнозировать и учитывать соотношение диаграмм с увеличенным давлением и давлением полученным за счет дефлаграции. Можно предположить, что это соотношение и будет являться показателем эффективности разрабатываемого метода.

**Стенд для проведения эксперимента.** Для проверки гипотезы и определения влияния детонационного горения топливной смеси на крутящий момент и мощность, а так же определения момента и значительности доли детонации в зависимости от фактора нагрузки, использовался стенд, изображенный на рис. 1.

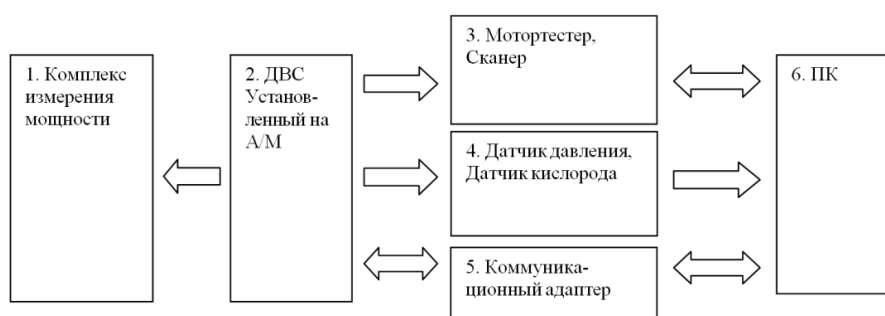


Рис. 1. Принципиальная схема стенда

Программа испытаний для регистрации детонации и влияния ее на внешние скоростные характеристики (ВСХ) следующая. Автомобиль с двигателем внутреннего сгорания 2, оборудованный датчиком давления для регистрации индикаторной диаграммы, устанавливается на комплекс измерения мощности 1. Выполняется настройка системы впрыска топлива и системы зажигания для снятия ВСХ. При каждом испытании параметры ДВС контролируются мотортестером 3 и программным сканером на ПК 6, подключенным через коммуникационный адаптер 5. Полученные данные затем используются как опорные. После записи опорных данных, система настраивается таким образом, чтобы появилась детонация в определенном диапазоне выполняется построение графиков крутящего момента и мощности при полной нагрузке. Предварительно, перед каждым замером, топливно-воздушная смесь приводится к стехиометрической посредством специального программного обеспечения на компьютере, которое считывает показания датчика кислорода 4 и корректирует топливные карты ЭБУ автомобиля 2 через коммуникационный адаптер 5.

Для контроля фактических параметров работы ДВС непосредственно на агрегатах использовался мотортестер Quantex Motodoc II Данный мотортестер предназначен для поиска неисправностей в различных автомобильных системах с бензиновым двигателем. Прибор удовлетворяет требованиям проведения испытания, позволяет считывать показатели двигателей с механическим или электронным распределением энергии, а также двигателей, оборудованных как карбюратором, так и системой впрыска. MotoDoc II совместим с выбранными для исследований моделями автомобилей.

Программных и аппаратных сканеров для считывания параметров ЭБУ существует довольно большое количество. Они характеризуются схожей функциональностью и отсутствием «лидирующих» моделей. В данном случае использовался

сканер Quantex Scandoc, возможности которого включают: чтение и расшифровку кодов ошибок, стирание ошибок, вывод текущих данных в цифровом и графическом виде, активацию исполнительных механизмов, идентификацию блоков управления, а также чтение и программирование иммобилайзера

**Экспериментальное подтверждение.** Для подтверждений высказанных выше предположений проведен эксперимент, в котором производились замеры крутящего момента  $M$  и мощности  $P$ , двигателя объемом 1,4 литра, установленного на автомобиль ВАЗ. Для снятия внешних скоростных характеристик автомобиль разгонялся по определенной программе на мощностном стенде с полностью открытой дроссельной заслонкой. Программное обеспечение записанное в электронный блок управления (ЭБУ) ДВС для первого эксперимента установлено от серийного автомобиля. С помощью сканерной диагностики во время разгона фиксируется возникновение детонации в зоне от 2000 до 3000 об/мин., что соответствует на рис. 2 тонкой линией. В дальнейшем прошивка корректируется до исчезновения детонации с использованием ПО фирмы Bosch и производится замер.

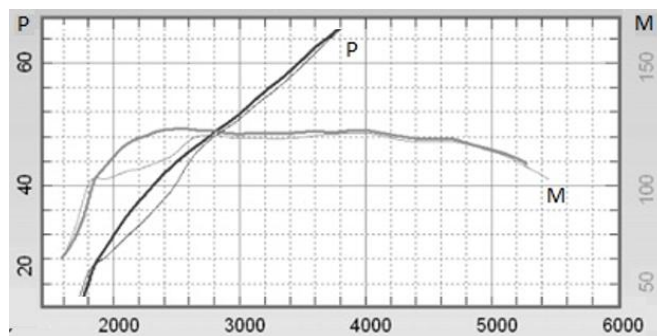


Рис. 2. Внешние скоростные характеристики

Из анализа изменения крутящего момента хорошо видно, что в диапазоне оборотов коленчатого вала от 1800 об/мин. до 2800 об/мин. наблюдается провал, как мощности, так и крутящего момента. В то же время этот диапазон совпадает с интервалом в котором присутствовала детонация. В следующем этапе эксперимента угол опережения зажигания изменялся, по дополнительному датчику [20], таким образом, что бы детонационному сгоранию подвергалась часть топливовоздушной смеси после прохождения коленчатым валом верхней мертвой точки. Программное обеспечение ЭБУ подверглось необходимому изменению для того, что бы избежать коррекции штатными адаптационными алгоритмами. Полученный результат приведен на рисунке 2-толстые линии.

Проведенный эксперимент показывает, что при совместном сгорании ТВС в режиме дефлаграции наряду с частичной детонацией возможно существенно улучшить показатели двигателя.

Для объяснения полученной ситуации необходимо провести фиксацию индикаторной диаграммы в промежутке из периода 1800–2800 об./мин.

При чем абсолютно понятно, что необходимо провести запись давления в цилиндре в каждом цикле хотя бы по одному цилиндру. Задача выбора цилиндра для получения адекватной информации может быть решена с помощью сканерной диагностики, позволяющей определить коррекции зажигания по каждому из цилиндров ДВС. После диагностики двигателя на мощностном стенде определены «отскоки» зажигания при снятии внешней скоростной характеристики (ВСХ). На системе управления с штатной прошивкой не выявлено существенных отклонений по

коррекции угла опережения зажигания по цилиндрам, что дает возможность сделать предположение о равном состоянии цилиндров. Учитывая конструкцию системы охлаждения двигателя датчик для регистрации давления устанавливается совместно со свечей во второй цилиндр.

При подготовке к эксперименту было проведено несколько заездов по результатам которых с помощью изменения настроек ЭБУ были убраны все детонации возникающие до ВМТ, которые считаются крайне вредными для ДВС. В результате был получен последовательный ряд рабочих циклов в которых максимальное давление в камере сгорания создается в целевом диапазоне без детонации или за счет присутствия частичной детонации ТВС.

Осциллограммы давления в цилиндре регистрировались комплексом «Мото-Док». Несколько полученных кадров приведены на рисунке 3.

При проведении эксперимента фиксировался каждый кадр с рабочем тактом в цилиндре. Всего зарегистрировано 116 рабочих тактов при этом обороты ДВС изменились от 18000 об/мин. До 2800 об/мин.

Все индикаторные диаграммы можно разделить на три типа: обычная индикаторная диаграмма – тип 1; Индикаторная диаграмма с признаками детонации с пиком давления после прохождения верхней мертвой точки (ВМТ) – тип 2; Индикаторная диаграмма с признаками детонации с пиком давления практически сразу за ВМТ – тип 3.

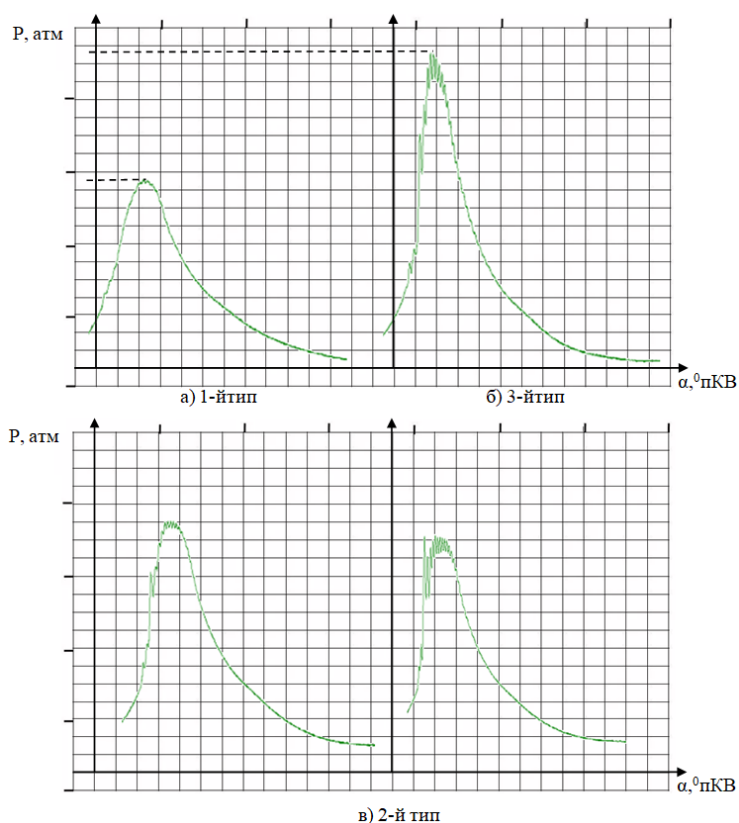


Рис. 3. Типы детонации

Индикаторных диаграмм 1-го типа было получено 64, второго 46 и третьего 6.

Следует отметить, что средняя по всем кадрам максимальная амплитуда индикаторных диаграмм первого типа равна 14, второго типа равна 20 и третьего типа 21. В дальнейшем необходимо создавать условия уменьшающие индикаторные диаграммы третьего типа, как наиболее опасные и вызывающие максимальные нагрузки на кривошипно-шатунный механизм.

**Заключение.** Из описанного выше можно сделать выводы о перспективности разработки ДВС работающего в некоторых режимах с использованием детонации для части ТВС.

Проделанный эксперимент подтверждает увеличение мощности и момента при использовании частичного сгорания ТВС в режиме детонации, позволяет определить разновидности индикаторных диаграмм и их влияние на внешние скоростные характеристики и позволяет подтвердить гипотезу использования части топлива для детонационного горения.

Полученные данные позволяют определить механизм увеличения мощности и крутящего момента. Доли индикаторных диаграмм, условно разделенные на три типа, могут быть приняты за один из основных параметров управления на ряду с представленными в статье.

В дальнейшем необходимо направить исследование на изучение возможности управления соотношением количества диаграмм первого и второго типа, с одновременным уменьшением полученных в процессе работы ДВС диаграмм третьего типа.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Wang Z., Liu H., Reitz R.D. Knocking combustion in spark-ignition engines // Progress in Energy and Combustion Science. – 2017. – Vol. 61. – P. 78-112.
2. Зельдович Я.Б., Компанец А.С. Теория детонации. – М.: Гостехиздат, 1955. – 188 с.
3. Gowthaman S., Sathiyagnanam A.P. Performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine—a review // International Journal of Ambient Energy. – 2017. – Vol. 38, No. 7. – P. 672-684.
4. Kalghatgi G. Knock onset, knock intensity, superknock and preignition in spark ignition engines // International Journal of Engine Research. – 2017. – P. 1468087417736430.
5. Caton J.A. The interactions between IC engine thermodynamics and knock // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 143. – P. 162-172.
6. Дмитриевский А.В. Детонация, степень сжатия двигателей и октановое число бензина // Автомобильная промышленность. – 1999. – № 8. – С. 27-29.
7. Заявка на изобретение РФ 95106076/06. Двигатель внутреннего сгорания / Тоскин Н.П.
8. Пат. РФ на изобретение RU2498095. Двухтактный детонационный двигатель / Гасанов Ш.К. – № 2011131183/06; заявл. 27.07.2011.
9. Смирнов О.В. Повышение антидетонационных качеств двигателей с искровым зажиганием путем двухстадийного сгорания расслоенной битопливной смеси: дисс. ... канд. техн. наук. ФГОУ ВПО КГСА. – Кострома, 2004. – 150 с.
10. Льюис Б., Эльбе Г. Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
11. Булат П.В., Упырев В.В. Детонация и её инициирование – история экспериментального, теоретического и численного исследования // Технические науки – от теории к практике: Сб. статей по матер. XLVIII-XLIX междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2015. – № 7-8 (44).
12. Булат П.В. Ударная и детонационная волна с точки зрения теории интерференции газодинамических разрывов – геометрический смысл уравнений газовой динамики сверхзвуковых течений // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 1951-1954.
13. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Теория рабочих процессов и моделирование процессов в двигателях внутреннего сгорания. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004.
14. Аронов Д.М., Маст В.С. Автомобильный транспорт. – 1956. – № 12



15. Левин В.А., Марков В.В. Исследование возникновения детонации при концентрированном подводе энергии // Физика горения и взрыва. – 1975. – Т. 2, № 4. – С. 623-629.
16. Левин В.А., Марков В.В., Осинкин С.Ф. Иницирование детонации поршнем в смеси водорода с воздухом // Доклады АН СССР. – 1981. – Т. 258, № 2. – С. 288-291.
17. Береснев М.А. Метод определения угла опережения зажигания для управления ДВС на бинарном топливе: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоградский государственный технический университет, 2013. – 150 с.
18. Береснев А.Л., Береснев М.А. Увеличение эффективности подвижных объектов с использованием детонации в ходовом двигателе внутреннего сгорания // Перспективные системы и задачи управления: Матер. XIII всероссийской научно-практической конференции. – Владивосток, 2018. – С. 131-138.
19. Береснев М.А., Береснев А.Л. Управление составом бинарного топлива для улучшения показателей ДВС // АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2012. – № 3 (63). – С. 7-10.
20. Береснев А.Л., Береснев М.А. Перспективы использования новых видов бинарных топлив для двигателей внутреннего сгорания // Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования». – 2016. – № 3 (22). – С. 14-25.
21. Puškár M., Bigoš P., Puškárová P. Accurate measurements of output characteristics and detonations of motorbike high-speed racing engine and their optimization at actual atmospheric conditions and combusted mixture composition // Measurement. – 2012. – Vol. 45, No. 5. – P. 1067-1076.

## REFERENCES

1. Wang Z., Liu H., Reitz R.D. Knocking combustion in spark-ignition engines, *Progress in Energy and Combustion Science*, 2017, Vol. 61, pp. 78-112.
2. Zel'dovich Ya.B., Kompaneets A.S. Teoriya detonatsii [Detonation theory]. Moscow: Gostekhizdat, 1955, 188 p.
3. Gowthaman S., Sathiyaganam A.P. Performance and emission characteristics of homogeneous charge compression ignition engine—a review, *International Journal of Ambient Energy*, 2017, Vol. 38, No. 7, pp. 672-684.
4. Kalghatgi G. Knock onset, knock intensity, superknock and preignition in spark ignition engines, *International Journal of Engine Research*, 2017, pp. 1468087417736430.
5. Caton J.A. The interactions between IC engine thermodynamics and knock, *Energy Conversion and Management*, 2017, Vol. 143, pp. 162-172.
6. Dmitrievskiy A.V. Detonatsiya, stepen' szhatiya dvigateley i oktanovoe chislo benzina [Detonation, compression ratio of engines and octane number of gasoline], *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive industry], 1999, No. 8, pp. 27-29.
7. Toskin N.P. Zayavka na izobretenie RF 95106076/06. Dvigatel' vnutrennego sgoraniya [Application for invention of the Russian Federation 95106076/06. Internal combustion engine].
8. Gasanov Sh.K. RF patent for the invention RU2498095. Dvukhtaktnyy detonatsionnyy dvigatel' [Two-stroke detonation engine]. No. 2011131183/06, declared 27.07.2011.
9. Smirnov O.V. Povyshenie antidetonatsionnykh kachestv dvigateley s iskrovym zazhiganiem putem dvukhstadiynogo sgoraniya rassloennoy bitoplivnoy smesi: diss. ... kand. tekhn. nauk [Increase of anti-knock qualities of spark ignition engines by two-stage combustion of stratified fuel mixture: cand. of eng. sc, diss.]. FGOU VPO KGSA. Kostroma, 2004, 150 p.
10. L'yuis B., El'be G. Gorenje, plamya i vzryvy v gazakh [Combustion, flames and explosions of gases]. Moscow: Mir, 1968, 592 p.
11. Bulat P.V., Upyrev V.V. Detonatsiya i ee initsirovanie – istoriya eksperimental'nogo, teoreticheskogo i chislennogo issledovaniya [Detonation and its initiation – history of experimental, theoretical and numerical research], *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike: Sb. statey po mater. XLVIII-XLIX mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technical Sciences – from theory to practice: Collection of articles on materials XLVIII-XLIX international scientific-practical conference]. Novosibirsk: SibAK, 2015, No. 7-8 (44).

12. *Bulat P.V.* Udamnaya i detonatsionnaya volna s toчки zreniya teorii interferentsii gazo-dinamicheskikh razryvov – geometricheskii smysl uravneniy gazovoy dinamiki sverkh-zvukovykh techeniy [Shock and detonation wave from the point of view of the interference theory of gas-dynamic discontinuities – the geometric meaning of the equations of gas dynamics of super-sonic flows], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, No. 10, pp. 1951-1954.
13. *Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V.* Teoriya rabochikh protsessov i modelirovaniye protsessov v dvigatelyakh vnutrennego sgoraniya [Theory of working processes and modeling of processes in internal combustion engines]. Chelyabinsk: Izd-vo YUUr-GU, 2004.
14. *Aronov D.M., Mast V.S.* Avtomobil'nyy transport [Road transport], 1956, No. 12.
15. *Levin V.A., Markov V.V.* Issledovanie vozniknoveniya detonatsii pri kontsentrirovannom podvode energii [A study of the emergence of detonation when the concentrated supply of energy], *Fizika goreniya i vzryva* [Physics of combustion and explosion], 1975, Vol. 2, No. 4, pp. 623-629.
16. *Levin V.A., Markov V.V., Osinkin S.F.* Initsirovaniye detonatsii porshnem v smesi vodoroda s vozdukhom [Initiation of piston detonation in a mixture of hydrogen and air], *Doklady AN SSSR* [Reports of the USSR Academy of Sciences], 1981, Vol. 258, No. 2, pp. 288-291.
17. *Beresnev M.A.* Metod opredeleniya ugla operezheniya zazhiganiya dlya upravleniya DVS na binarnom toplive: diss. ... kand. tekhn. nauk [Method for determining the ignition advance angle for controlling the internal combustion engine on binary fuel: cand. of eng. sc. diss.]. Volgogradskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013, 150 p.
18. *Beresnev A.L., Beresnev M.A.* Uvelichenie effektivnosti podvizhnykh ob'ektov s ispol'zovaniem detonatsii v khodovom dvigatele vnutrennego sgoraniya [Increasing the efficiency of mobile objects using detonation in the running internal combustion engine], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Perspective systems and tasks of management: Materials of XIII all-Russian scientific-practical conference]. Vladivostok, 2018, pp. 131-138.
19. *Beresnev M.A., Beresnev A.L.* Upravlenie sostavom binarnogo topliva dlya uluchsheniya pokazateley DVS [Management of the composition of binary fuel to improve the performance of ice], *AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Al'ternativnoe toplivo* [Gas filling complex + Alternative fuel], 2012, No. 3 (63), pp. 7-10.
20. *Beresnev A.L., Beresnev M.A.* Perspektivy ispol'zovaniya novykh vidov binarnykh topliv dlya dvigateley vnutrennego sgoraniya [Prospects for the use of new types of binary fuels for internal combustion engines], *Mezhdunarodnoye nauchnoye izdanie "Sovremennyye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya"* [International scientific publication "Modern fundamental and applied research"], 2016, No. 3 (22), pp. 14-25.
21. *Pušár M., Bigoš P., Pušárová P.* Accurate measurements of output characteristics and detonations of motorbike high-speed racing engine and their optimization at actual atmospheric conditions and combusted mixture composition, *Measurement*, 2012, Vol. 45, No. 5, pp. 1067-1076.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н, профессор А.В. Павленко.

**Береснев Алексей Леонидович** – Южный федеральный университет; e-mail: beresneval@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

**Береснев Максим Алексеевич** – e-mail: mberesnev@sfedu.ru; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

**Быстрицкий Андрей Владимирович** – e-mail: bistritskiy@sfedu.ru; аспирант.

**Beresnev Aleksei Leonovich** – Southern Federal University; e-mail: beresneval@sfedu.ru; phone: +78634371694; the department of electrotechnics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Beresnev Maksim Alekseevich** – e-mail: mberesnev@sfedu.ru; the department of electrotechnics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Bystritskii Andrei Vladimirovich** – e-mail: bistritskiy@sfedu.ru; postgraduate student.