

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ ДВС ВО ВРЕМЯ ДЕТОНАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ЧАСТИ ТОПЛИВНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ

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. 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. Использование дефлаграции наряду с детонацией умеренно увеличивает нагрузку на детали двигателя и позволяет использовать узлы и агрегаты с незначительными изменениями. В начале проведен обзор имеющихся решений в данной области и показаны родственные направления использующие близкие агрегаты и условия горения, затем рассмотрены особенности работы двигателя с использованием детонационного сгорания. Рассмотрен процесс горения топливно-воздушной смеси в детонационном режиме и условия, при которых в несгоревшей части смеси образуется новый очаг воспламенения, волна критического сжатия, предложены подходы к разработке математической модели для такого двигателя. Обзор работ не выявил известного способа расчета для сгорания части топлива в детонационном режиме, по этому высказано предположение, позволяющее произвести расчет кинетики и тепловыделения в камере сгорания с частичной детонацией. Разработан стенд для экспериментального подтверждения высказанных предположений, оборудованный оригинальным датчиком давления в камере сгорания, позволяющим фиксировать индикаторную диаграмму и детонацию. Приведен пример получения улучшенных 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

THE STUDY MANAGEMENT CAPABILITIES OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE DURING DETONATION COMBUSTION OF THE FUEL-AIR MIXTURE

Paper is devoted to research the IC engine control aspects that are not well-known, e.g. detonation. Authors propose to use this stochastic process as one of the ways to increase torque of internal combustion engine. Detonation combustion of air-fuel mixture can be used as a useful part of the work process and it is assumed that the combustion of air-fuel mixture in mixed mode can be controlled allowing to increase indicator characteristics. Using detonation along with deflagration moderately increases load upon engine parts and allows to use hardware with minor changes. In the beginning authors provide an overview of the know solutions and trends in the subject area, similar directions that use close mechanics and algorithms are shown, then peculiarities of the work process with detonation are discussed. A review of the papers did not reveal a known method of calculation for the combustion of a part of the fuel in the detonation mode, therefore, an assumption is made that allows the calculation of kinetics and heat dissipation in the combustion chamber with partial detonation. A stand for experimental confirmation of the assumptions, equipped with an original pressure sensor in the combustion chamber, allowing to fix the indicator diagram and detonation is developed. Combustion in detonation phase is examined, and conditions when ignition and critical pressure appears unburned mixture are explored. Ap-

proaches to development of the mathematical model for such combustion are proposed. Examples of the engine power and torque increase are given. In the conclusion authors make hypothesis concerning changes in air-fuel combustion properties and plan the next steps for problem research for combustion control.

Internal combustion engine; detonation; combustion.

Введение. В 1940 году советский физик Я.Б. Зельдович предложил идею детонационного двигателя в статье «Об энергетическом использовании детонационного сгорания». Огромное преимущество такого двигателя заключается в том, что процесс детонационного горения на два порядка быстрее дефлаграции. В результате при постоянном объеме быстро возрастает давление. Выделение полученного таким образом количества энергии, к сожалению, способно разрушить двигатель автомобиля, поэтому такой процесс часто ассоциируется со взрывом. Работы в данном направлении ведутся во всем мире с переменным успехом, 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 г. российским учёным удалось создать впервые в мире полноразмерный жидкостный реактивный двигатель, работающий на принципе детонационного сгорания топлива, в котором в действительности 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 на порядок, благодаря компактности зоны [1].

В двигателях внутреннего сгорания существуют два различных режима распространения 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 в ударной волне вызывающей взрывную реакцию [2].

Наиболее близко к решению задач работы бензинового ДВС без подачи искры, хотя и не относящихся напрямую к детонационному горению, подошли фирмы работающие над двигателями Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI), принцип действия которых основан на технологии воспламенения от сжатия однородной смеси [3].

Работают над циклом HCCI Daimler, Volkswagen и Nissan, наиболее известна работа компании Mazda [4, 5]. Возможно HCCI мотор будет установлен на автомобиле Mazda 3 следующего поколения, который поступит в продажу в 2019 году.

Воплощенный в разработке цикл HCCI пока далек от идеала и использование системы зажигания до сих пор не определено. В настоящий момент в реальном ДВС вполне возможно будут использованы разная степень сжатия нового мотора, вплоть до очень высокого показателя 18:1. Предполагается, что внедрение таких двигателей позволит снизить расход топлива примерно на 30%, и значительно снизить содержания в выхлопных газах окислов азота и сажи.

Из выше сказанного можно предположить, что использование детонационного горения топлива позволит значительно улучшить индикаторные параметры двигателя, одновременно значительно усложняя управление процессом и саму конструкцию двигателя. В то же время двигателестроение на современном этапе развития борется за каждый процент повышения мощности и крутящего момента, кроме того можно сделать предположение, что при использовании доли топлива для детонации соответственно будет уменьшаться используемое количество топлива. Ситуация одновременного использования дефлаграции наряду с детонацией

может быть весьма перспективна и позволит при незначительном изменении конструкции ДВС за счет модернизации алгоритмов управления получить улучшение мощностно-экономических показателей.

Основной задачей исследования является подтверждение возможности управления процессом детонационного сгорания части топлива в современном ДВС с целью улучшения индикаторных параметров.

Особенности рабочего процесса детонационного двигателя. 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].

Существуют несколько изобретений, например: патент РФ «поршневой двигатель внутреннего сгорания» [7] и патент РФ «двухтактный детонационный двигатель» [8], а так же и другие, позволяющие работать в режиме детонации и требующие кардинальной замены узлов и агрегатов ДВС.

С точки зрения перекисной теории распространение «холодного» пламени по рабочей смеси осуществляется диффузией в свежую смесь активных частиц, радикалов, образующихся при распаде перекисей [9]. После периода индукции полученная активная смесь подвергается дальнейшему окислению с взрывным распадом перекисных соединений.

Возникающий в этом процессе тип пламени назван А.С.Соколиком [10] «вторичным холодным пламенем». Реакция во «вторичном холодном пламени» идет не до конечных продуктов, а лишь до угарного газа, при этом степень разогрева значительна и соответствует половине полной энергии сгорания. Это вызывает распространение пламени с большой скоростью за счет диффузии активных центров и дополнительно за счет теплопередачи. При наличии достаточного количества активных центров далее происходит цепочно-тепловой взрыв смеси CO и O₂.

Вместе с новым фронтом горячего пламени возникает новый фронт ударной волны в одном или нескольких местах несгоревшей рабочей смеси. Следует отметить, что скорости распространения обеих волн приближаются к 2000–2500 м/сек.

Процессы окисления углеводородов с образованием перекисей происходят всегда и если в смеси накапливается перекисных соединений свыше критического, происходит взрывной распад. В случае, если энергия холодного пламени составляет незначительную часть теплоты сгорания ТВС (менее 5–10 %), увеличение температуры незначительно.

Когда амплитуда волны достаточна для самовоспламенения в некоторых местах еще не сгоревшей части ТВС, появляется очаг самовоспламенения. Новый фронт пламени распространяется с большим ускорением, чем фронт основного пламени.

Возникновение детонации и ее продолжительность зависит от возможности пересечения кривых реальной индикаторной диаграммы и критического давления достаточного при возникших условиях для образования локального очага воспламенения. Это условие является вторым необходимым, кроме достаточной концентрации гидроперекисей несгоревшей части смеси.

Вследствие прохождения предпламенных процессов окисления несгоревшая часть смеси становится очень «восприимчивой» к воспламенению. Однако, степень этой восприимчивости неодинакова в разных областях несгоревшей смеси. Если амплитуда проходящей волны сжатия достаточна для того, чтобы вызвать самовоспламенение, то в местах наибольшей «подготовленности» несгоревшей части смеси к воспламенению волна сжатия образует очаг воспламенения.

От этого очага новый фронт пламени распространяется по среде химически очень активной, и, поэтому, с гораздо большим ускорением, чем основной фронт пламени. По этой причине рождаются вторичные, более мощные, волны сжатия. При отражении от стенок ударные волны сжатия превращаются в детонационные, если проходят по несгоревшей части смеси.

Значение амплитуды, при которой в несгоревшей части смеси образуется новый очаг воспламенения, называется волной критического сжатия.

При этом действует правило: если в течение всего процесса сгорания перепад давления в первичной волне сжатия меньше критического, то детонация по этой причине не может возникнуть.

Для возникновения детонации необходимы два условия:

1. Высокая концентрация гидроперекисей в несгоревшей части смеси;
2. Первичная волна должна иметь достаточно высокую амплитуду.

Горение ТВС при детонации. Анализ режимов медленного и детонационного горения по аналогии со скачками и ударными волнами удобно производить на плоскости адиабат, связывающих давление и удельный объем (величина обратная плотности) при различных режимах горения в предположении, что протяженность фронта горения мала и может быть заменена бесконечно тонким экзотермическим скачком [11, 12].

Следует отметить, работа ДВС с детонацией не сразу приводит к значительным разрушениям. Из результатов исследований [13] на шести цилиндровом двигателе при условии детонации в трех цилиндрах.

Из экспериментальных данных можно сделать вывод, что при непродолжительной детонации самый высокий износ в верхнем поясе по высоте цилиндра с некоторым расстоянием от верхней кромки и в тоже время без детонации износ в этом уровне минимален. Далее по высоте цилиндра разница в износе не столь значительна из этого можно сделать предположение: не продолжительная не сильная детонация в которой участвует ограниченное количество ТВС, не приведет к существенному уменьшению срока службы цилиндропоршневой группы.

Кроме того для получения повторяемости результатов следует учитывать большое значение флуктуации процессов сгорания, которая будет приводить к сложности поддержания и стабилизации процесса. Даже в установившемся режиме процесс горения в цилиндрах ДВС отличается, как в последовательных циклах, так и между цилиндрами. Это хорошо видно на снятых индикаторных диаграммах [13]. Следует отметить, что работа двигателя на богатых смесях уменьшает флуктуацию, а использование менее обогащенных ТВС приводит к увеличению отклонений в процессе горения. Для улучшения повторяемости процессов необходимо предпринимать меры для повторяемости циклового наполнения цилиндров, как воздухом, так и топливом и обеспечения гомогенности ТВС. А так же поддерживать стабильность параметров системы зажигания и температуры ДВС.

Параметры головной ударной волны изменяются периодически под воздействием волн сжатия, формирующихся фронтом пламени. Согласно расчетам, автоколебательный процесс [14, 15] развивается в том случае, когда величина энергии взрыва превосходит критическое значение. В противном случае детонационная волна затухает, распадаясь на ударную волну и волну медленного горения. Если энергия взрыва близка критической, но все же меньше, то затухания детонации происходит после нескольких колебаний.

Графики уравнений выгорания и отвлеченной скорости сгорания соответствующие различным топливам и значениям параметра m , представлены на рис. 1.

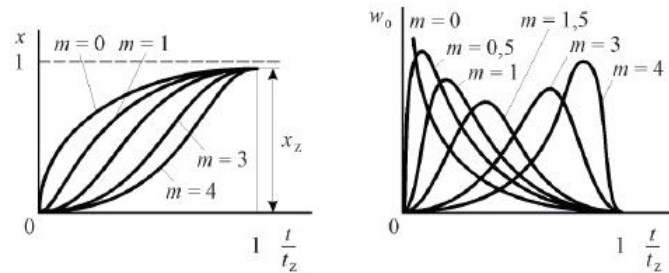


Рис. 1. Графики уравнений выгорания и отвлеченной скорости сгорания

Опыт исследования двигателей показывает, что для дизелей $m = 0...1,0$, $p_z = 60... 100$ град ПКВ и более; для двигателей с внешним смесеобразованием $m = 3...4$, $p_z = 45...60$ град ПКВ. Где p_z – продолжительность сгорания, выраженная в градусах поворота коленчатого вала (ПКВ).

Результаты специальных исследований позволяют заключить, что оптимальные величины показателя характера сгорания и условной продолжительности сгорания отвечают значениям примерно равным 1,5 и 40...60 град ПКВ соответственно. На данном этапе невозможно определить достоверно указанные параметры, но можно высказать предположение, что диапазон изменения $m = 1,0...3,0$ будет зависеть от доли топлива участвующего в детонации и соответственно продолжительность сгорания будет уменьшаться.

Моделирование детонационного горения. Из сказанного совершенно ясно, что возможности получения стабильной детонации с параметрами не приводящими к значительному износу связаны с возможностью достоверно определить начальные условия, организовать одинаковое наполнение по цилиндрам и провести процессы горения, как в циклах, так и по цилиндрам с заранее определенными параметрами. Следует учитывать, количество подведенной к ТВС энергии должно превышать определенный минимум, необходимый для получения возможности нужного режима горения.

Для поддержания кратковременного режима детонации, который позволит проводить эксперименты без значительной модернизации двигателя следует провести моделирование внутрицилиндровых процессов в двигателе внутреннего сгорания с помощью математической модели, что позволит описать эффективные показатели ДВС при работе в двух режимах сгорания. Полученная модель будет использоваться в дальнейшем для создания алгоритма расчета угла опережения зажигания и схемы регулирования состава ТВС, возможно с применением бинарного топлива [18].

Уровень модели должен соответствовать требованию: по возможности простая и по необходимости сложная. Простая для того, что бы успевать обрабатывать полученные от датчиков параметры и сложная для адекватности проведения рабочего цикла.

Сложность модели определяется ее принадлежностью к одному из классов: однозонная, двухзонная и многозонная [16, 19]. Самые простые модели – однозонные. Они строятся на следующих предпосылках: изменение нестационарных давления и температуры рабочего тела в объеме камеры сгорания (КС) не имеют локального характера, т.е. их мгновенные значения одинаковы для любой произвольной точки в пространстве КС; в цилиндре двигателя рабочее тело гомогенно; продукты сгорания полностью перемешанные с общим зарядом цилиндра, нахо-

дятся в состоянии химического равновесия. Однако в реальных условиях значения локальной температуры рабочего тела в камере сгорания различаются. Для учета этого обстоятельства был создан класс многозонных моделей самые простые из которых – двухзонные, в основе которых лежат следующие предпосылки: полный объем, занимаемый рабочим телом, условно поделен на зону с еще не успевшей сгореть смесью и зону с продуктами сгорания, который имеют каждая свою температуру и разделены фронтом пламени; в каждой из зон в произвольный момент времени рабочее тело рассматривается как гомогенная смесь, значения локальной температуры которой внутри каждой зоны не различаются; давление в объеме КС и внутри обеих зон в произвольный момент времени одинаково и локальные значения давлений одинаковы.

Из сказанного выше можно предположить, что наиболее точное описание процессов и получение индикаторной диаграммы будет получено в следствии использования много зонной модели учитывающей особенности воспламенения ТВС, как от свечи зажигания, так и в объеме КС. Но на современном этапе развития микроэлектроники подобные расчеты не могут быть выполнены за время обусловленное работой ДВС. В то же время, как следует из [16, 17] современные электронные блоки управления позволяют адекватно рассчитывать управляющие параметры для однозонных и двухзонных моделей.

Определение способа расчета тепловыделения является одним из важнейших этапов создания математической модели, поскольку от этого зависит точность и адекватность рассчитываемых параметров. Обзор работ не выявил известного способа расчета для сгорания части топлива в детонационном режиме.

Существует несколько различных подходов к расчету процесса горения в двигателях с воспламенением от электрической искры. В основу первого направления положена аппроксимация линии сгорания индикаторной диаграммы, т.е. линии давления газов в функции изменения объема или угла поворота коленчатого вала, математическим уравнением. Недостаток способов этого направления заключается в том, что поскольку форма линии сгорания определяется не только скоростью и полнотой сгорания, но и закономерностями термодинамики и отчасти теплопередачи, а также значениями углов опережения зажигания, то теоретическое выявление раздельного влияния каждого из этих факторов на линию сгорания и, следовательно, на весь цикл и его показатели в рамках данного подхода является весьма затруднительным.

Другой подход основывается на уравнениях термодинамики и скорости тепловыделения. Раскрыть закономерности протекания тепловыделения в двигателе довольно проблематично, поскольку линия сгорания является сложной кривой, характер которой обусловлен взаимодействием факторов, разных по своей природе. Это и механика для учета характера подвода теплоты и изменения объема газов, и химическая кинетика для рассмотрения процесса превращения химической энергии в тепловую и, в какой-то степени, законы теплопередачи, учитывающие потерю части тепла в стенки. Но этот подход позволяет анализировать изменение скорости сгорания во времени и учитывать влияние на него различных факторов, что необходимо для проведения всестороннего математического анализа. Описанные два подхода являются распространенными, но не единственными.

Вибе И.И. предложил способ расчета скорости сгорания в двигателях с воспламенением от электрической искры без использования понятия линейной скорости пламени, а основанный на том, что горение топлива в двигателе является одним из основных процессов, определяющих качество его работы, в т.ч. мощность, удельный расход топлива, долговечность и экологические показатели.

Закономерности развития процессов сгорания во времени представлены Вибе полуэмпирическим уравнением общего характера, которое может быть использовано для широкого спектра условий, т.к. при его выводе не делалось никаких предположений относительно специальных средств, регламентирующих систему (природа исходных веществ и их физическое состояние, конкретный механизм реакции, температура, давление, вихревые движения газов, теплопередача, зарождение эффективных центров в разных точках объема и т.д.) [20, 21].

Уравнения Вибе позволяют описать физическое развитие процесса сгорания во времени как в бензиновых двигателях, так и в газовых, и в дизельных. [14, 22]. Из чего можно сделать предположение, что в случае использования жидких, газообразных топлив с воспламенением от искры, а также описать родственные воспламенению дизельного топлива процессы детонации. Таким образом можно не только построить диаграмму цикла и его показатели, но и провести исследования по выявлению зависимостей показателя цикла от характеризующих их параметров. Формула Вибе содержит два определяющих параметра процесса сгорания m и φ_z , или t_z от правильного подбора которых зависит степень соответствия экспериментальных и расчетных параметров рабочего процесса. Для подбора параметров формулы Вибе может использоваться как статистический материал по тепловыделению в двигателях, так и особенности физико-химических процессов в цилиндре.

В рассматриваемой ситуации можно предположить, что уравнение сгорания топлива примет вид (при условии выгорания 99,9%):

$$x = 1 - e^{-6.908\left(\frac{t_1}{t_{z1}}\right)^{m_1+1}} + 1 - e^{-6.908\left(\frac{t_1}{t_{z2}}\right)^{m_2+1}},$$

где индексом «1» обозначены параметры, относящиеся к обычному горению, а индексом «2» детонационному.

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. По средствам сканерной диагностики во время разгона фиксируется возникновение детонации в зоне от 2000 до 3000 об/мин. В дальнейшем прошивка корректируется до исчезновения детонации с использованием ПО фирмы Bosch и производится замер. Результат представлен на рис. 2 тонкой линией.

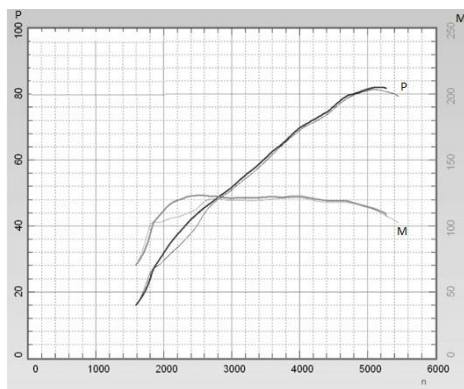


Рис. 2. Внешние скоростные характеристики

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. Для истинного определения детонации часто используются датчики [22, 23] не представляющие возможности следить за давлением. В следующем этапе эксперимента давление внутри цилиндра и детонация отслеживаются, по дополнительному датчику [20], таким образом, что бы детонационному сгоранию подвергалась часть топливовоздушной смеси после прохождения коленчатым валом верхней мертвой точки [25]. 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.

Заключение. Из описанного выше можно сделать выводы о перспективности разработки ДВС работающего в некоторых режимах с использованием детонации для части ТВС. В связи с уменьшением надежности и увеличением износа необходимо определить количество топлива, которое с одной стороны обеспечит существенное увеличение параметров ДВС, а с другой стороны, не принесет значительного износа.

В отличие от основных известных подходов, когда увеличение мощности и крутящего момента влечет за собой увеличение расхода топлива выявлена возможность уменьшения количества потребляемого топлива. Задача может решаться путем расчета модели, которая обеспечит максимальное давление в цилиндре в нужном диапазоне поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки, что позволяет получить от сжигания заряда максимальную работу и, следовательно, крутящий момент.

Следует изучить возможности управления процессом детонации и определения: продолжительности времени детонации, момента возникновения и окончания детонации, а также соотношение углеводородов участвующих в детонации и дефлаграции.

В дальнейшем необходимо разработать экспериментальный стенд с возможностью фиксации внешних скоростных характеристик, наблюдения за детонацией и регулирования доли топлива, подвергшегося детонации.

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., Компанеев А.С. Теория детонации. – М., 1955. – 268 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. – С. 1468087417736430.
5. Caton J.A. The interactions between IC engine thermodynamics and knock // Energy Conversion and Management. – 2017. – Vol. 143. – P. 162-172.
6. Митрофанов В.В. Теория детонации. – Новосибирск: НГУ, 1982. – 92 с.
7. Патент РФ 95106076/06 кл. F02B 10.11.97.
8. Патент РФ RU2498095 27.07. 2011.
9. Hall C., Warren I. SAE Trans. – 1955. – 63.
10. Соколик А.С. Сгорание в транспортных поршневых двигателях. – М.: Изд-во АН СССР 1951. – 37 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 материалам 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. – № 10-9. – 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. Инициирование 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. – Волгоград: ВолГТУ, 2013. – 150 с.
18. Nazoktabar M. et al. Developing a multi-zone model for a HCCI engine to obtain optimal conditions using genetic algorithm // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 157. – P. 49-58.
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.
22. Sanders S.T. et al. Diode-laser sensor for monitoring multiple combustion parameters in pulse detonation engines // Proceedings of the Combustion Institute. – 2000. – Vol. 28, No. 1. – P. 587-594.
23. Song J. et al. Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether // Energy conversion and management. – 2004. – Vol. 45, No. 13-14. – P. 2223-2232.
24. Midgley T., Boyd T.A. The chemical control of gaseous detonation with particular reference to the internal-combustion engine // Industrial & Engineering Chemistry. – 1922. – Vol. 14, No. 10. – P. 894-898.
25. Heiser W.H., Pratt D.T. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines // Journal of Propulsion and Power. – 2002. – Vol. 18, No. 1. – P. 68-76.

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, 1955, 268 p.
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, 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. Mitrofanov V.V. Teoriya detonatsii [Detonation theory]. Novosibirsk: NGU, 1982, 92 p.
7. Patent RF 95106076/06 kl. F02B 10.11.97.
8. Patent RF RU2498095 27.07. 2011.
9. Hall C., Warren I. SAE Trans., 1955, 63.

10. Sokolik A.S. Sgoranie v transportnykh porshnevnykh dvigatelyakh [Combustion in transport piston engines]. Moscow: Izd-vo AN SSSR 1951, 37 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 materialam XLVIII-XLIX mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Technical Sciences-from theory to practice: Collection of articles on materials XLVIII-XLIX international. scientific and practical conference]. Novosibirsk: SibAK, 2015, No. 7-8 (44).
12. Bulat P.V. Udamnaya i detonatsionnaya volna s tochki zreniya teorii interferentsii gazodinamicheskikh razryvov – geometricheskiy smysl uravneniy gazovoy dinamiki sverkhzvukovykh 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 supersonic flows], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2013, No. 10-9, pp. 1951-1954.
13. Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klement'ev V.V. Teoriya rabochikh protsessov i modelirovanie 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 kontsentrirrovannom podvode energii [Investigation of the occurrence of detonation in a concentrated energy supply], *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. Initsirovanie 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.]. Volgograd: VolgGTU, 2013, 150 p.
18. Nazoktabar M. et al. Developing a multi-zone model for a HCCI engine to obtain optimal conditions using genetic algorithm, *Energy Conversion and Management*, 2018, Vol. 157, pp. 49-58.
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], *Mezhdunarodnoe nauchnoe izdanie «Sovremennye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya»* [International scientific publication "Modern fundamental and applied research"], 2016, No. 3 (22), pp. 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, pp. 1067-1076.
22. Sanders S.T. et al. Diode-laser sensor for monitoring multiple combustion parameters in pulse detonation engines, *Proceedings of the Combustion Institute*, 2000, Vol. 28, No. 1, pp. 587-594.
23. Song J. et al. Performance of a controllable premixed combustion engine fueled with dimethyl ether, *Energy conversion and management*, 2004, Vol. 45, No. 13-14, pp. 2223-2232.
24. Midgley T., Boyd T.A. The chemical control of gaseous detonation with particular reference to the internal-combustion engine, *Industrial & Engineering Chemistry*, 1922, Vol. 14, No. 10, pp. 894-898.
25. Heiser W.H., Pratt D.T. Thermodynamic cycle analysis of pulse detonation engines, *Journal of Propulsion and Power*, 2002, Vol. 18, No. 1, pp. 68-76.

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; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; 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.

УДК 681.3.062

DOI 10.23683/2311-3103-2018-6-174-184

С.И. Клевцов

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА НОРМИРОВАННОГО РАЗМАХА ДЛЯ АНАЛИЗА ПОВЕДЕНИЯ ПАРАМЕТРА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Состояние технического объекта определяется на основе оценки его параметров, текущей и прогнозной. На объект воздействуют различные внешние факторы, которые приводят к деградации параметров объекта. Если изменение параметров станет недопустимым для рабочего режима объекта, он может выйти из строя, а это может привести к аварийной ситуации. Чтобы этого не допустить, необходимо не только контролировать параметры в процессе работы, но и прогнозировать их значения на шаг и более вперед по оси времени. Однако, достоверный и удовлетворяющий по точности прогноз возможен, если поведение параметра определяется предысторией, то есть данными, которые к текущему моменту известны, а тренд для временного ряда параметра сохраняет характер монотонности еще какое-то время. Для анализа возможного поведения временного ряда параметра, включая оценку стабильности тренда, определения точек изменения его динамики, использовался метод нормированного размаха Хёрста. Метод нормированного размаха не ставит дополнительным условием для анализа соответствие совокупности измерений нормальному закону распределения. Для временных рядов параметров это условие практически не выполняется. На основе определения величины показателя Хёрста ряды классифицируются на антиперсистентные, случайные и персистентные. Если ряд классифицирован как антиперсистентный, то он обладает ярко выраженными фрактальными свойствами, а если он персистентный, то его тренд обладает «исторической» памятью и для его прогнозирования можно использовать обычные методы временных рядов. С помощью показателя Хёрста можно определить не только оценку отношения силы тренда к уровню шума, но и по величине показателя оценить необходимость выполнения процедур фильтрации шумовой составляющей сигнала. На основании обработки данных об ускорении технического объекта методом нормированного размаха сделан вывод о целесообразности применения показателя Хёрста при решении задач прогнозирования параметров технических объектов. Чем выше для рассматриваемого ряда показатель Хёрста из диапазона $(0,5 \div 1,0]$, тем более точным может быть прогноз значений параметра. При значениях показателя Хёрста, приближающихся к величине 0,5, требуется дополнительная обработка данных перед процедурой прогнозирования для снижения погрешности оценки значений ряда.

Временной ряд; модель, прогнозирование; технический параметр; показатель Хёрста; метод нормированного размаха.