

**Цельх Лариса Анатольевна** – Таганрогский институт имени А.П. Чехова (филиал) Ростовского государственного экономического университета (РИНХ); e-mail: l.tselykh58@gmail.com; 347936, г. Таганрог, ул. Инициативная, 48; тел.: +79185695760; кафедра экономики и предпринимательства; к.э.н.; доцент.

**Tselykh Alexander Nikolaevich** – Southern Federal University; e-mail: ant@sfnedu.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185562047; the department IASB; dr. of eng. sc.; professor.

**Vasilev Vladislav Sergeevich** – e-mail: vsvasilev@sfnedu.ru; the department IASB; dr. of eng. sc.; the senior lecturer.

**Tselykh Larisa Anatolievna** – Chekhov Taganrog Institute (branch) of Rostov State University of Economics; e-mail: l.tselykh58@gmail.com; Initsiativnaya, 48, Taganrog, 347936, Russia; phone: +79185695760; the department of Economics and business; dr. of ec. sc.; the senior lecturer.

УДК 629.113 (075)

DOI 10.18522/2311-3103-2020-2-123-133

**А.Л. Береснев, М.А. Береснев**

### **РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДЕТОНАЦИИ В СОВРЕМЕННОМ ДВС**

*Рассматриваются недостаточно изученные аспекты управления двигателем внутреннего сгорания, такие как использование детонации. При детонации вместо постоянно-го 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 коэффициент полезного действия двигателя. В двигателях внутреннего сгорания существуют два различных режима распространения горения топлива воздушной смеси: дефлаграция и детонация. Двигатели работающие в режиме детонационного сгорания в настоящее время не используются и их возможности наиболее интересны. Современные двигатели внутреннего сгорания плохо переносят режим детонации, но возможность непродолжительного сгорания части топливовоздушной смеси с детонацией заложена в их конструкции. Ситуация возникновения детонации в настоящее время постоянно изучается, к ней относятся, как к вредной составляющей процесса горения, для борьбы с которой необходимо совершенствовать двигатель, его управление и использование современного топлива. Предлагается 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. Высказаны предположения для создания модели и произведено моделирование давления в цилиндре на этапе горения топливовоздушной смеси с частичной детонацией. Произведено определение способа расчета тепловыделения, который является одним из важнейших этапов создания математической модели, поскольку от этого зависит точность и адекватность рассчитываемых параметров, как для режимов дефлаграционного горения топливовоздушной смеси, так и с использованием детонационного сгорания. Предложенная процедура расчета параметров рабочего цикла ДВС позволяет проводить вычисления в реальном времени и учесть влияние состава бинарного топлива на показатели мощности, экономичности, механической и динамической нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма, а также термической нагрузки на двигатель.*

*Двигатель внутреннего сгорания; детонация; модель.*

A.L. Beresnev, M.A. Beresnev

## DEVELOPMENT OF KNOCK MATHEMATICAL MODEL FOR MODERN IC ENGINE

*The paper examines under-studied aspects of internal combustion engine management, such as the use of knock. In knock, instead of a constant frontal flame, a detonation wave is formed in the combustion zone, carrying at supersonic speed. Fuel and oxidant are detonated in compression wave. This process, from the point of view of thermodynamics, increases the efficiency of the engine. In internal combustion engines, there are two different modes of combustion propagation of air mixture fuel: deflagration and detonation. Engines operating in detonation combustion mode are currently not used and their capabilities are most interesting. Modern internal combustion engines do not carry the detonation mode well, but the possibility of short-term combustion of part of the fuel-air mixture with detonation is embedded in their design. The situation of detonation is currently constantly being studied, it is considered as a harmful component of the combustion process, which requires improvement of the engine, its control and use of modern fuel. It is proposed to use this, considered random, process to increase the torque and power of the internal combustion engine. The possibility of using detonation combustion of fuel-air mixture in internal combustion engine as a useful part of the working process is considered, and the possibility of controlling combustion of fuel-air mixture in a mixed mode is assumed, which allows to improve indicator parameters. Assumptions have been made to create a model and the cylinder pressure has been simulated during the combustion phase of the partially detonated fuel-air mixture. The method of heat generation calculation has been determined, which is one of the most important stages of mathematical model creation, as this determines accuracy and adequacy of calculated parameters, both for deflagration combustion modes of fuel-air mixture and using detonation combustion. Proposed procedure for calculation of internal combustion engine operating cycle parameters makes it possible to carry out real-time calculations and account for influence of binary fuel composition on parameters of power, economy, mechanical and dynamic load on parts of crank mechanism, as well as thermal load on engine.*

*Internal combustion engine; knock; model.*

**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 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]. 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 (ДВС) существуют два различных режима распространения горения топливо воздушной смеси (ТВС).

ДВС работающий в режиме детонационного сгорания в настоящее время изучены недостаточно [6–9].

Необходимо учитывать: современные двигатели внутреннего сгорания плохо переносят режим детонации, но возможность непродолжительного сгорания части ТВС с детонацией заложена в их конструкции.

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, 11, 12].

Известен эксперимент [9] подтверждающий увеличение мощности и момента при использовании частичного сгорания ТВС в режиме детонации, он позволяет определить разновидности индикаторных диаграмм и их влияние на внешние скоростные характеристики и подтверждает гипотезу возможности использования части топлива для детонационного горения.

Для изучения возможности использования детонационного горения части ТВС в ДВС и управления этим процессом, необходимо разработать математическую модель, которая в дальнейшем позволит выбрать управляющие параметры и определить диапазоны их изменения. В связи с недостаточной повторяемостью параметров горения ТВС в камере сгорания, как между цилиндрами одного двигателя, так и в одном цилиндре от цикла к циклу, что вызвано, как объективными так и субъективными причинами существующими в современном проектировании ДВС и уровне двигателестроения в целом, необходима возможность простого адаптирования модели к конкретным условиям. В то же время из-за плохой межцикловой повторяемости индикаторной диаграммы, нет необходимости добиваться высокой повторяемости расчетов давления внутри цилиндра. Наиболее важным является время расчетов и возможность прогнозирования в дальнейшем количества диаграмм определенных в эксперименте [9].

Моделирование внутрицилиндровых процессов в двигателе внутреннего сгорания с помощью математической модели позволит описать эффективные показатели ДВС при двух режимной работе. Далее модель может использоваться для расчета ТВС и создания алгоритма определения управляющих параметров.

**Определение входных и выходных данных.** На выходе модели должен формироваться набор параметров, позволяющий определить оптимальный УОЗ для данных входных условий в реальном масштабе времени. Для этого следует оценить влияние топлива различного состава и значения угла опережения зажигания на основные показатели ДВС. Поскольку основным процессом в ДВС является рабочий цикл, от которого зависят мощность, экономичность и надежность работы двигателя [11], то в качестве выходных данных модели могут быть приняты следующие основные параметры и показатели рабочего цикла ДВС [23]:

- ◆ среднее индикаторное давление  $p_{ind}$  – показатель удельной работы;
- ◆ индикаторный коэффициент полезного действия  $\eta_{ind}$  – показатель экономичности;
- ◆ максимальное давление рабочего тела  $p_{max}$  и быстрота нарастания давления в процессе сгорания  $w_p$  – показатели механической и динамической нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма;
- ◆ максимальная температура газов  $T_{max}$  и температура газов в конце расширения  $T_b$  – показатели термической нагрузки;
- ◆ давление  $p_a$  и температура  $T_a$  газов на момент окончания впуска – показатели состояния рабочего тела в момент впуска;
- ◆ непрерывно изменяющиеся давление  $p(\varphi)$  и температура  $T(\varphi)$  рабочего тела в течение рабочего цикла.

В качестве входных данных использовались константы, определяющие конструкцию ДВС и характеристики топлива, переменные рабочего процесса, а также значения показателей окружающей среды:

♦ конструкция двигателя: объем камеры сгорания  $V_c$ , объем цилиндра  $V_h$ , степень сжатия  $\varepsilon$ , радиус кривошипа  $r$ , длина шатуна  $L_{sh}$ , ход поршня  $H_p$ ;

♦ переменные рабочего процесса: скорость вращения коленчатого вала  $n_{rpm}$ , коэффициент наполнения цилиндра  $\eta_v$ , температура подогрева свежего заряда  $\Delta T$ , давление и коэффициент остаточных газов  $p_r$  и  $\gamma$  соответственно, момент зажигания  $G_{уоз}$ ;

♦ параметры бинарного топлива: фактор теплоемкости  $K_t$ , коэффициент избытка воздуха  $\alpha_{vb}$ , соотношение бензин/сжиженный газ в бинарном топливе  $L$ , низшая теплотворная способность бензина и сжиженного газа  $H_{ub}$  и  $H_{upb}$  соответственно, стехиометрическое соотношение бензина и сжиженного газа  $\lambda_{vb}$  и  $\lambda_{vpb}$  соответственно, молекулярная масса бензина, сжиженного газа и воздуха  $m_b$ ,  $m_{pb}$  и  $m_v$  соответственно;

♦ показатели окружающей среды: атмосферное давление  $p_0$ , температура воздуха  $T_0$ , плотность воздуха  $AD$ ;

В том случае, где это было возможно, параметры работы двигателя выбирались с возможностью достоверного измерения штатными датчиками современных автомобилей. В противном случае использовались общепризнанные формулы.

**Формирование требований к модели.** Выводу математической модели двигателя внутреннего сгорания посвящено множество работ, в т.ч.: [11–18, 20], причем количество моделей неуклонно растет, а существующие модели постоянно модернизируются. Это объясняется, с одной стороны, чрезвычайно сложными физико-химическими процессам, происходящими при работе двигателя, а с другой стороны – изменением его конструкции и используемых топлив. Анализ литературы не выявил готовой модели для четырехтактного ДВС с внешним смесеобразованием при частичном сгорании топлива в зоне детонации, что определило необходимость ее разработки.

К моделям рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания предъявляются следующие требования:

- 1) модель должна быть формально правильной (корректной с физической точки зрения), т.е. свободной от противоречий;
- 2) модель по возможности должна точно описывать реальный процесс и одновременно быть математически реализуемой;
- 3) требуемые материальные и временные затраты на разработку и реализацию модели должны находиться в разумных пределах;
- 4) уровень модели должен соответствовать требованию: по возможности простая и по необходимости сложная.

Сопоставление различных моделей показывает, что многозонные модели позволяют точнее рассчитать температуру и поэтому показывают лучшие результаты при решении задач, связанных с определением токсичности, теплообмена, диссоциации и т.д. При этом расчет давления в цилиндре во всех классах моделей выполняется по одинаковым схемам и в этом плане многозонные модели не обеспечивают большую точность. Кроме того однозонные модели проще и соответственно удобней для расчета рабочего процесса. Таким образом, для определения давления в цилиндре при работе ДВС в зоне частичной детонации с необходимой точностью и скоростью расчета, на современном этапе развития можно считать достаточной однозонную модель. В дальнейшем при развитии и совершенствовании электронных блоков управления и алгоритмов, возможно использующих не четкое управление скорее всего появится возможность использования многозонной модели с выделением зон детонации, как во времени, так и в пространстве.

**Выбор базового способа расчета тепловыделения.** Определение способа расчета тепловыделения является одним из важнейших этапов создания математической модели, поскольку от этого зависит точность и адекватность рассчитываемых параметров. В настоящий момент не выявлен известный способ расчета для описываемого случая.

Существует несколько различных подходов к расчету процесса горения в двигателях с воспламенением от электрической искры [17]. 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.

Второй 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.

Для расчета скорости сгорания в рамках второго подхода предложено множество способов [15, 20–22], и интерес к этой теме не утихает с зари автомобилестроения. Ряд исследователей используют для расчета скорости сгорания в бензиновых двигателях скорость фронта пламени. В основу всех этих методов расчета положен доказанный Михельсоном В.А. постулат Гюи, согласно которому количество горючей газовой смеси, воспламеняемой единицей поверхности пламени в единицу времени, постоянно по своей величине. Как отмечает Вибе И.И. эти способы не вызывали бы возражений, если бы соблюдались следующие условия:

- 1) реакция сгорания завершилась, как и в ламинарном потоке, в очень узкой зоне пламени, что позволило бы практически рассматривать поверхность фронта пламени, как реакционную поверхность;
- 2) экспериментально и теоретически можно было бы определить изменение этой поверхности с перемещением фронта пламени;
- 3) можно было бы определить нормальную скорость перемещения фронта пламени, от которой зависит массовая скорость выгорания.

В действительности же, первое условие не соблюдается, и поток газа в двигателе не может быть охарактеризован как ламинарный. Турбулентное горение фронта пламени имеет размытые контуры и значительную толщину. Поэтому понятие поверхности фронта пламени становится неопределенным, а постулат Гюи теряет свою силу.

Известен способ [18], учитывающий влияние турбулентности на скорость сгорания в двигателях с воспламенением от электрической искры. Его авторы принимают гипотезу о том, что сгорание в турбулентном потоке газа происходит так же, как в ламинарном потоке – в тонком слое фронта пламени. При этом крупномасштабная турбулентность деформирует поверхность горения, вызывая много-

численные искривления и увеличивая этим размер фронта пламени, а мелкомасштабная турбулентность, соизмеримая с толщиной фронта пламени, одновременно увеличивает нормальную скорость сгорания в этой зоне. Кроме того принимается допущение, что на единице поверхности фронта пламени сгорает постоянное количество топлива в единицу времени, которое называется массовой скоростью сгорания в турбулентном потоке, причем эта скорость изменяется по ходу горения. Таким образом, общее количество сгоревшего в единицу времени топлива пропорционально произведению общей поверхности фронта пламени на массовую скорость сгорания. Недостатком этого способа являются трудности формализации основных понятий метода «фронт пламени» и «скорость распространения фронта», которые оставлены авторами для дальнейших исследований, кроме того не представляется возможным учесть количество бензина окисленного с помощью детонации.

Вибе И.И. предложил способ расчета скорости сгорания в двигателях с воспламенением от электрической искры [20] 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.)

Уравнения Вибе позволяют описать физическое развитие процесса сгорания во времени, как в бензиновых двигателях, так и в газовых, и в дизельных, что позволяет предположить возможность использования такого подхода при решении задачи горения топливовоздушной смеси в разных режимах. По всей видимости оно позволит 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  $\varphi_z$ , 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, подобных изучаемому, так и особенности физико-химических процессов в цилиндре.

**Процедура расчета при использовании детонационного сгорания части топлива, в рассматриваемой ситуации примет вид уравнение сгорания топлива [8]. (при условии выгорания 99,9 %):**

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

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

При разработке процедуры расчета параметров рабочего цикла двигателя были приняты следующие допущения:

- ◆ рассматривается замкнутый цикл с реальным рабочим телом постоянной массы, имеющей переменный состав и теплоемкость, не зависящую от температуры;
- ◆ цикл состоит из политропического сжатия, сгорания, расширения продуктов сгорания с учетом выделения тепла вследствие рекомбинации диссоциированных молекул и отвода тепла при постоянном объеме;

- ◆ сжатие происходит по политропе с показателем, принятым на основании экспериментальных данных;
- ◆ рабочее тело – совершенный газ (идеальный в термодинамическом смысле), который в разные моменты времени состоит из двух компонентов: свежего заряда и продуктов сгорания, разделенных на соответствующие зоны;
- ◆ реальный процесс горения топлива заменен эквивалентным подводом тепловой энергии по закону Вибе И.И;
- ◆ давление во всем объеме камеры сгорания принимается одинаковым;
- ◆ температура стенок цилиндра, каналов систем пуска и выпуска, а также глушителя, принимается постоянной.

Расчет выходных данных модели расчета УОЗ в зависимости от состава ТВС, угла опережения зажигания и параметров окружающей среды состоит из следующих этапов [23]:

- 1) с учетом параметров окружающей среды и параметров двигателя производится расчет показателей состояния рабочего тела в момент впуска и на этапе сжатия;
- 2) на основании данных этапа сжатия рассчитывается давление в процессе горения топлива в цилиндре, температура рабочего тела в цилиндре, а также определяются показатели механической и динамической нагрузки;
- 3) после расчета горения проводится расчет давления и температуры в цилиндре при расширении;
- 4) по полученной индикаторной диаграмме выполняется определение показателей удельной работы, экономичности, рассчитываются остальные выходные параметры.

**Расчет давления в цилиндре на этапе горения.** Расчет параметров рабочего тела в такте сжатия можно произвести в соответствии с предложенным авторами подходом [23], учитывая тот факт, что наполнение цилиндров в такте впуска не зависят от возможности работы двигателя частичной детонацией. Кроме того использование такого же подхода для моделирования горения бинарного топлива и гашения возникающей детонации [7] позволит распространить подобное математическое моделирование для процессов управления детонацией в случае использования пропанобутановой смеси. Расчет этапа горения начинается с точки  $y$  (рис. 1), соответствующей подаче искры и поджогу топливно-воздушной смеси и оканчивается в точке  $z$  – точке окончания горения.

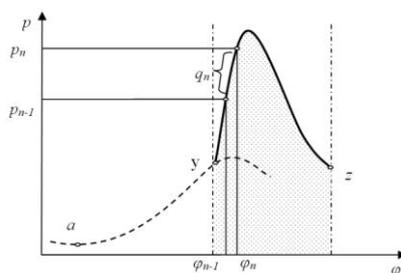


Рис. 1. Этап горения

Для расчета индикаторной диаграммы после поджога топливно-воздушной смеси необходимо провести моделирование динамики окисления топлива. Для этого весь процесс сгорания разобьем на отдельные небольшие интервалы, выражаемые в градусах поворота коленчатого вала. Интервал задается границами  $[\varphi_{n-1}, \varphi_n]$ . Удельная теплота сгорания  $q_n$  на участке  $n$  определяется:

$$q_n = q_z(x_n - x_{n-1}),$$

где  $q_z$  – полная удельная теплота сгорания топлива;  $x_{n-1}$  – доля топлива, сгоревшая к началу участка  $n$ ;  $x_n$  – доля топлива, сгоревшая к концу участка  $n$ .

С целью оптимизации угла опережения зажигания предполагается использовать добавление сжиженного газа. Для расчета полной удельной теплоты сгорания  $q_z$  при работе на бинарном топливе предлагается следующее выражение:

$$q_z = L_b q_{zb} + L_{pb} q_{zpb},$$

где  $L_b$  – доля бензина в бинарном топливе;  $q_{zb}$  – полная удельная теплота сгорания бензина;  $L_{pb}$  – доля сжиженного газа в бинарном топливе;  $q_{zpb}$  – полная удельная теплота сгорания сжиженного газа.

Полная удельная теплота сгорания бензина  $q_{zb}$  определяется по формуле

$$q_{zb} = H_{smb} \times \frac{g\xi}{(1 + \gamma)(1 + \alpha_{vt}\lambda_{vb})},$$

где  $H_{smb}$  – объемная теплотворность горючей смеси;  $\alpha_{vt}$  – коэффициент избытка воздуха;  $\lambda_{vb}$  – соотношение воздух/бензин;  $\xi$  – коэффициент эффективности сгорания.

В двигателях с внешним смесеобразованием при  $\alpha \geq 1$  коэффициент  $\xi$  находится в пределах 0,9-0,95 [21]. Величина  $H_{smb}$  для бензо-воздушной смеси вычисляется по формуле

$$H_{smb} = \frac{H_{ub}}{\alpha_{vt} \frac{\lambda_{vb}}{m_v} + \frac{1}{m_b}},$$

где  $H_{ub}$  – низшая теплотворность бензина;  $m_v$  – молярная масса воздуха;  $m_b$  – молярная масса бензина.

Доля топлива, сгоревшего за время поворота коленчатого вала от  $\varphi_{n-1}$  до  $\varphi_n$ , без возникновения детонации, рассчитывается по полуэмпирическому уравнению выгорания топлива в двигателях внутреннего сгорания, полученному И.И. Вибе [20]:

$$\Delta x_n = x_n - x_{n-1} = e^{-6,908 \times \left(\frac{\varphi_n}{\varphi_z}\right)^{m+1}} - e^{-6,908 \times \left(\frac{\varphi_{n-1}}{\varphi_z}\right)^{m+1}}, \quad (2)$$

где  $m$  – показатель характера сгорания;  $\varphi_z$  – продолжительность сгорания топлива, выраженная в градусах поворота коленчатого вала.

В случае сгорания части топлива в режиме детонации расчет определяется формулой (1)

Род применяемого топлива существенно влияет на развитие начального очага горения, в то время как в основной фазе скорость распространения пламени подчиняется законом крупномасштабного турбулентного горения, мало зависящим от физико-химических свойств топливно-воздушной смеси [23, 24]. Изменение показателя сгорания учитывается с помощью соотношения, успешно опробованного в работах [25]:

$$m = m_0 - 0,1(Uoz - Uoz_0),$$

где  $m_0$  – показатель сгорания, соответствующий начальным условиям, полученный на опорном режиме работы ДВС при  $rpm=2000$  об/мин, угле зажигания  $Uoz_0=25$  °пКВ, коэффициенте избытка воздуха 0,96.

В то же время совершенно очевидно, что в случае частичного детонационного горения показатель  $m_0$  будет несколько выше и зависимость его увеличения будет соответствовать доли индикаторных диаграмм второго типа [9].

**Выводы.** Проведенный обзор работ не выявил существующей модели для расчета УОЗ при использовании частичного детонационного сгорания топлива, что определило необходимость ее разработки.

Исходя из совокупности требований к модели и набора выходных данных в качестве базового способа расчета тепловыделения был принят способ, предложенный Вибе И.И.

Предложенная процедура расчета параметров рабочего цикла ДВС, в случае продолжения вышеописанных работ, позволит проводить вычисления в реальном времени и учесть влияние состава бинарного топлива на показатели мощности, экономичности, механической и динамической нагрузки на детали кривошипно-шатунного механизма, а также термической нагрузки на двигатель.

В дальнейшем для полного описания процессов горения необходимо определить влияние на продолжительность горения и коэффициент молекулярного изменения.

Ранее авторами выявлено, что при использовании детонационного горения части топлива в диапазоне оборотов коленчатого вала от 1800 об/мин. до 2800 об/мин., происходит 116 рабочих тактов, из них 64 такта относятся к частичной детонации, что позволяет ДВС увеличить крутящий момент на 10 %. Полученные данные будут использованы для идентификации разрабатываемой модели и увеличения тактов с частичной допустимой детонацией, что позволит значительно увеличить крутящий момент и мощность на КД ДВС.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зельдович Я.Б., Компанец А.С.* Теория детонации. – М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1955. – 268 с.
2. *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.
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. – P. 672-684.
4. *Митрофанов В.В.* Теория детонации. – Новосибирск: НГУ, 1982. – 92 с.
5. *Caton J.A.* The interactions between IC engine thermodynamics and knock // *Energy Conversion and Management.* – 2017. – Vol. 143. – P. 162-172.
6. *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.
7. *Береснев М.А., Береснев А.Л.* Управление составом бинарного топлива для улучшения показателей ДВС // *АвтоГазоЗаправочный комплекс + Альтернативное топливо.* – 2012. – № 3 (63). – С. 7-10.
8. *Береснев А.Л., Береснев М.А., Быстрицкий А.В.* Возможности управления детонационным горением различных типов в ДВС // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2019. – № 3 (205). – С. 198-207.
9. *Береснев А.Л., Береснев М.А., Быстрицкий А.В.* Исследование возможности управления ДВС во время детонационного горения части топливо-воздушной смеси // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2018. – № 6 (200). – С. 164-174.
10. *Береснев М.А., Береснев А.Л.* Особенности контроля детонации при использовании бинарного топлива // *Сб. научных трудов SWorld.* – 2011. – Т. 1, № 2. – С. 56-58.
11. *Орлин А.С.* Теория поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина и М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
12. *Льюис Б., Эльбе Г.* Горение, пламя и взрывы в газах. – М.: Мир, 1968. – 592 с.
13. *Глаголев Н.М.* Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания. Новый метод расчета. – М.: Изд-во машиностр. лит., 1950. – 481 с.
14. *Гирявец А.К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. – М.: Стройиздат, 1997. – 161 с.
15. *Кавтарадзе Р.З.* Теория поршневых двигателей. Специальные главы. – М.: Изд-во МГТУ им Н.Э. Баумана, 2008. – 720 с.
16. *Иващенко Н.А., Кавтарадзе Р.З.* Многозонные модели рабочего процесса двигателей внутреннего сгорания. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. – 57 с.

17. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Основы горения. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты. Образование загрязняющих веществ: пер. с англ. Г.Л. Агафонова / под. ред. П.А. Власов. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
18. Иноземцев Н.В., Кошкин В.К. Процессы сгорания в двигателях. – М.: Машгиз, 1949. – 344 с.
19. Глаголев Н.М. Рабочие процессы двигателей внутреннего сгорания. – М.: Машгиз, 1950. – 479 с.
20. Вибе И.И. Новое о рабочем цикле двигателя. – М.: Машгиз, 1962. – 271 с.
21. Шароглазов Б.А., Фарафонов М.Ф., Клементьев В.В. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчет процессов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. – 344 с.
22. Елагин М.Ю., Кузьмина И.В. Математическая модель и теоретические исследования рабочих процессов многоцилиндровых двигателей внутреннего сгорания // Известия ТулГУ. Серия «Автомобильный транспорт». Вып. 3. – Тула: ТулГУ, 1999. – С. 104-107.
23. Beresnev M.A., Beresnev A.L. Mathematical model of gasoline-liquified gas mixture combustion for IC engine control // Modern Fundamental and Applied Researches. – 2011. – No. 3. – P. 58-61.
24. Кузьмин А.В. Показатели и регулировки битопливного двигателя при переводе его с бензина на сжиженный углеводородный газ: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолгГТУ, 2008. – 116 с.
25. Федянова Н.А. Использование математического моделирования рабочего процесса для разработки и обоснования концепции эффективного управления углом опережения зажигания в ДВС: дисс. ... канд. техн. наук. – Волгоград: ВолГПИ, 1992. – 139 с.

## REFERENCES

1. Zel'dovich Ya.B., Kompaneets A.S. Teoriya detonatsii [Theory of detonation]. Moscow: Gos. izd-vo tekhn.-teoret. lit., 1955, 268 p.
2. 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.
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. Mitrofanov V.V. Teoriya detonatsii [Theory of detonation]. Novosibirsk: NGU, 1982, 92 p.
5. Caton J.A. The interactions between IC engine thermodynamics and knock, *Energy Conversion and Management*, 2017, Vol. 143, pp. 162-172.
6. Beresnev A.L., Beresnev M.A. Uvelichenie effektivnosti podviznykh ob'ektov s ispol'zovaniem detonatsii v khodovom dvigatele vnutrennego sgoraniya [Increasing the efficiency of mobile objects using detonation in a running internal combustion engine], *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya: Mater. XIII vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Perspective systems and management tasks: Materials of the XIII all-Russian scientific and practical conference]. Vladivostok, 2018, pp. 131-138.
7. Beresnev M.A., Beresnev A.L. Upravlenie sostavom binarnogo topliva dlya uluchsheniya pokazateley DVS [Managing the composition of binary fuel to improve the performance of internal combustion engines], *AvtoGazoZapravochnyy kompleks + Al'ternativnoe toplivo* [Gas station complex + Alternative fuel], 2012, No. 3 (63), pp. 7-10.
8. Beresnev A.L., Beresnev M.A., Bystritskiy A.V. Vozможности upravleniya detonatsionnym goren'em razlichnykh tipov v DVS [Features of controlling detonation Gorenje of various types in the internal combustion engine], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. – 2019. – № 3 (205). – С. 198-207.
9. Beresnev A.L., Beresnev M.A., Bystritskiy A.V. Issledovanie vozможности upravleniya DVS vo vremya detonatsionnogo goren'ya chasti toplivo-vozdushnoy smesi [Investigation of the possibility of controlling the internal combustion engine during the detonation Gorenje part of the fuel-air mixture], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]. 2018, No. 6 (200), pp. 164-174.
10. Beresnev M.A., Beresnev A.L. Osobennosti kontrolya detonatsii pri ispol'zovanii binarnogo topliva [Features of detonation control when using binary fuel], *Sb. nauchnykh trudov SWorld* [Collection of scientific papers SWorld], 2011, Vol. 1, No. 2, pp. 56-58.
11. Orlin A.S. Teoriya porshnevnykh i kombinirovannykh dvigateley [Theory of piston and combined engines], ed. by A.S. Orlina i M.G. Kruglova. Moscow: Mashinostroenie, 1983, 372 p.

12. *L'yuis B., El'be G.* Gorenje, plamya i vzryvy v gazakh [Combustion, flames and explosions of gases]. Moscow: Mir, 1968, 592 p.
13. *Glagolev N.M.* Rabochie protsessy dvigateley vnutrennego sgoraniya. Novyy metod rascheta [Working processes of internal combustion engines. A new method of calculation]. Moscow: Izd-vo mashinostr. lit., 1950, 481 p.
14. *Giryavets A.K.* Teoriya upravleniya avtomobil'nym benzinovym dvigatelem [Theory of automobile gasoline engine control]. Moscow: Stroyizdat, 1997, 161 p.
15. *Kavtaradze R.Z.* Teoriya porshnevnykh dvigateley. Spetsial'nye glavy [Theory of piston engines. Special chapters]. Moscow: Izd-vo MGTU im N.E. Baumana, 2008, 720 p.
16. *Ivashchenko N.A., Kavtaradze R.Z.* Mnogozonnye modeli rabocheho protsesssa dvigateley vnutrennego sgoraniya [Multi-zone models of the internal combustion engine workflow]. Moscow: Izd-vo MGTU im N.E. Baumana, 1997, 57 p.
17. *Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R.* Osnovy gorenija. Fizicheskie i khimicheskie aspekty, modelirovanie, eksperimenty. Obrazovanie zagryaznyayushchikh veshchestv [Basics of Gorenje. Physical and chemical aspects, modeling, experiments], transl. from engl. G.L. Agafonova, ed. by P.A. Vlasov. Moscow: Fizmatlit, 2003, 352 p.
18. *Inozemtsev N.V., Koshkin V.K.* Protsessy sgoraniya v dvigatelyakh [Combustion processes in engines]. Moscow: Mashgiz, 1949, 344 p.
19. *Glagolev N.M.* Rabochie protsessy dvigateley vnutrennego sgoraniya [Working processes of internal combustion engines]. Moscow: Mashgiz, 1950, 479 p.
20. *Vibe I.I.* Novoe o rabochem tsikle dvigatelya [New about the working cycle of the engine]. Moscow: Mashgiz, 1962, 271 p.
21. *Sharoglazov B.A., Farafontov M.F., Klemen'tev V.V.* Dvigateli vnutrennego sgoraniya: teoriya, modelirovanie i raschet protsessov [Internal combustion engines: theory, modeling and calculation of processes]. Chelyabinsk: Izd-vo YuUrGU, 2004, 344 p.
22. *Elagin M.Yu., Kuz'mina I.V.* Matematicheskaya model' i teoreticheskie issledovaniya rabochikh protsessov mnogotsilindrovnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Mathematical model and theoretical studies of working processes of multi-cylinder internal combustion engines], *Izvestiya TulGU. Seriya «Avtomobil'nyy transport»* [Izvestiya of the Tula state University. Series "Road transport"], Issue 3. Tula: TulGU, 1999, pp. 104-107.
23. *Beresnev M.A., Beresnev A.L.* Mathematical model of gasoline-liquified gas mixture combustion for IC engine control, *Modern Fundamental and Applied Researches*, 2011, No. 3, pp. 58-61.
24. *Kuz'min A.V.* Pokazateli i regulirovki bitoplivnogo dvigatelya pri perevode ego s benzina na szhizhennyy uglevodorodnyy gaz: diss. ... kand. tekhn. nauk [Indicators and adjustments of the bi-fuel engine when converting it from gasoline to liquefied petroleum gas: cand. of eng. sc. diss.]. Volgograd: VolgGTU, 2008, 116 p.
25. *Fedyanova N.A.* Ispol'zovanie matematicheskogo modelirovaniya rabocheho protsesssa dlya razrabotki i obosnovaniya kontseptsii effektivnogo upravleniya uglom operezheniya zazhiganiya v DVS: diss. ... kand. tekhn. nauk [Using mathematical modeling of the workflow to develop and justify the concept of effective control of the ignition advance angle in the internal combustion engine: cand. of eng. sc. diss.]. Volgograd: VolgPI, 1992, 139 p.

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** – ООО ИК «Медотрейд»; e-mail: beresnev@medotrade.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Чехова, 104-А; к.т.н.; инженер-программист.

**Beresnev Aleksey Leonidovich** – Southern Federal University; e-mail: beresneval@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrotechnics and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Beresnev Maksim Alekseevich** – Medotrade Ltd; e-mail: beresnev@medotrade.ru; 104-A Chekhov street, Taganrog, 347922, Russia; cand. of eng. sc.; engineer-programmer.