

## Особенности трехстадийного процесса сгорания

Николай Супрович

Подольский государственный аграрно-технический университет  
Ул. Шевченко, 13, г. Каменец-Подольский, Украина, e-mail: kokas2008@ukr.net

**Аннотация.** Экономия топлива остается приоритетной проблемой во всем мире. Известные способы повышения экономичности двигателей внутреннего сгорания практически себя исчерпали. Предлагается совершенствование процесса сжигания топливовоздушной смеси в двигателе путем увеличения скорости сгорания.

В статье изложены результаты исследования принципиально нового трехстадийного процесса сгорания, в котором реализуется данный принцип. Трехстадийный процесс является синтезом форкамерно-факельного зажигания и двухстадийного сгорания. Использование факельного зажигания позволяет интенсифицировать сгорание в начальной стадии горения за счет факела газов, образующихся при сгорании переобогащенной смеси в предкамере (форкамере). На второй стадии осуществляется дожигание оставшегося заряда, что существенно сокращает время догорания, особенно в пристеночных слоях камеры сгорания. Это позволяет значительно ускорить процесс сгорания в целом, что приводит к повышению КПД, а интенсивное дожигание – повысить антидетонационные свойства двигателя. Приведены данные исследования скорости распространения пламени в камере сгорания при помощи ионизационных датчиков, которые подтверждают сокращение времени горения газо-воздушной смеси в двигателе с новым процессом по сравнению с форкамерно-факельным зажиганием и двухстадийным сгоранием.

Установлены особенности распространения пламени в камере сгорания при трехстадийном процессе. Моторные испытания двигателя с новым процессом подтверждают незначительное повышение экономичности на все исследованных режимах.

Необходимо продолжить исследования для определения дополнительных потерь, которые возникают при перетекании газов из предкамеры и через разделительный выступ, а также тепловых потерь из-за более развитой поверхности камеры сгорания. Сокращения этих потерь позволит повысить эффективный КПД нового процесса.

**Ключевые слова:** двигатель, сгорание, скорость распространения пламени, ионизация, форкамерно-факельное зажигание, двухстадийное сгорание, трехстадийное сгорание.

### ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Экономия ресурсов – основной путь для выживания человечества. Двигатель внутреннего сгорания является основным источником механической энергии, и в связи с этим – основным потребителем энергетических ресурсов.

Поиск альтернативных источников энергии не решает проблемы [1], потому что замена источника питания не позволяет уменьшить само количество потребляемой энергии. Нет качественного решения проблемы.

Необходимо возвращаться к вопросу повышения эффективности сгорания топлива, то есть к совершенствованию рабочих процессов двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

С высокой степенью достоверности можно говорить о том, что эффективный КПД современных ДВС равен 50% от термодинамического (теоретического) КПД, характеризующего степень совершенства термодинамического цикла [2]. Термодинамические циклы, реализуемые в ДВС основаны на сгорании топливовоздушной смеси в закрытом объеме, который называется камерой сгорания. Объем камеры изменяется за счет движения поршня. Чем меньше объем камеры, тем выше КПД цикла. Поэтому главным способом достижения эффективности процесса сгорания становится скорость распространения пламени [10]. Исследуемый в работе трехстадийный процесс сгорания решает поставленную задачу – сокращение длительности всех фаз сгорания за счет значительного ускорения горения в начальной и конечной стадиях процесса.

### АНАЛИЗ ПОСЛЕДНИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

Количество двигателей внутреннего сгорания приближается к 1 млрд., а общее количество энергии, выра-

батываемой ними в течении года превысило  $9 \cdot 10^{13}$  кВт·ч [9]. ДВС являются не только основными потребителями топлива, но главными загрязнителями окружающей среды, так как выбрасывают в атмосферу помимо водяного пара и углекислого газа множество других токсических компонентов. Отработанные газы двигателей внутреннего сгорания содержат более 200 наименований вредных веществ, в том числе канцерогенных. Основной путь решения проблемы – рациональное использование традиционного углеводородного топлива [3], который кардинально решается за счет повышения экономичности двигателя.

Повышение топливной экономичности ДВС, как основное направление развития двигателестроения, было наиболее популярным в последней трети 20 столетия. Успехи, достигнутые отраслью несколько снизили активность научных поисков в этом направлении. И все же проблема эффективности использования топлива остается актуальной, потому что индикаторный КПД современных ДВС далек от теоретических значений. Резервы совершенствования экономичности ДВС традиционными высокотехнологичными способами (впрыск, системы электронного регулирования смесеобразования и зажигания, изменение фаз газораспределения, турбонадув) практически использованы до предела, поэтому дальнейшее улучшение требует новых решений [4]. Они находятся не в области механики, где достигнуты коэффициенты полезного действия (КПД) выше 0,9, а в области рабочих процессов двигателей, где КПД остается на уровне 0,25-0,53 [5].

Здесь возможны решения, не требующие высоких технологий, а значит можно получить перед конкурентами неоспоримые преимущества, открывающие чужие рынки сбыта и защищающие свои. Такие решения на сегодня известны и связаны они с отделением в рабочем цикле ДВС сгорания в самостоятельный процесс. Наиболее известные из них – разработки компаний Scuder Group (scuderigroup.com) [6], Zajac Motors (zajacmotors.com) [7] и DIRO Konstruktions GmbH & Co. KG (diro-konstruktion.de) [8].

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является исследование особенностей распространения пламени и эффективных показателей в двигателе с трехстадийным сгоранием.

### ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

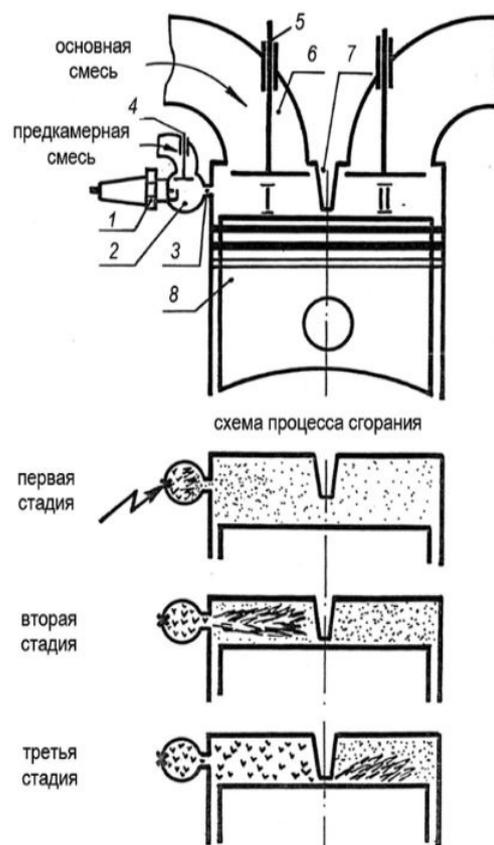
Трехстадийный процесс сгорания в ДВС предложен А.Н. Воиновым, Л.М. Соболевым и Н.К. Чарноцким и являет собой попытку реализовать преимущества форкамерно-факельного зажигания и двухстадийного сгорания путем объединения их в один процесс [11].

В двигателях с форкамерно-факельным зажиганием воспламеняется и быстро сгорает та часть топливоздушного заряда, которая непосредственно смешивается

с продуктами сгорания обогащенной смеси, выбрасываемыми из предкамеры. Сгорание остальной части цилиндрической смеси, особенно при сильном её обеднении, происходит относительно замедленно, о чём свидетельствует увеличение выброса CO и CH с отработавшими газами, а также практически одинаковые антидетонационные качества в сравнении с обычным искровым зажиганием.

При двухстадийном сгорании общая эффективность процесса снижается из-за невысоких скоростей распространения пламени на первой стадии горения в свечной полости. Пределы устойчивой работы и эффективного обеднения смеси ниже, чем у двигателя с форкамерно-факельным зажиганием, в связи с отсутствием надежного источника воспламенения, которым является предкамерный факел.

Трехстадийный процесс можно рассматривать как форкамерно-факельное зажигание с ускоренным дожиганием на заключительной стадии горения. Схема двигателя с трехстадийным сгоранием и предлагаемая модель процесса сгорания показаны на рис. 1.



**Рис. 1.** Двигатель с трехстадийным сгоранием: 1 - свеча зажигания; 2 – предкамера; 3 – сопловое отверстие; 4, 5 – клапаны; 6 – впускной трубопровод; 7 – разделительный выступ; 8 – поршень

**Fig. 1.** The engine with three-stage combustion: 1 - spark plug; 2 – antechamber; 3 – nozzle orifice; 4, 5 - valves; 6 – intake duct; 7 – ledge; 8 – piston

Простейшая конструктивная схема представляет собой двигатель с двухстадийным сгоранием [12],

у которого вместо свечи зажигания устанавливается предкамера. Система питания работает так же, как при форкамерно-факельном зажигании [13-14]. Через клапан 4 в дополнительную камеру 2 поступает богатая смесь состава. В то же время основная камера заполняется бедной смесью. К концу такта сжатия в предкамере образуется обогащенный заряд  $s = 0,4-0,7$  [15], а в свечной I и бессвечной II полостях основной камеры сгорания располагается цилиндрический заряд.

На первой стадии искровым разрядом поджигается обогащенная смесь в предкамере. Затем на второй стадии факел высокотемпературных газов и продуктов полного и неполного сгорания, выбрасываемых из дополнительной камеры через сопловое отверстие, турбулизует и воспламеняет смесь в свечной полости. Часть несгоревшего топливоздушного заряда вытесняется в бессвечную полость, где перемешивается с остальной смесью и дожигается факелом горящих газов, выбрасываемых из свечной полости, через щель, образованную разделительным выступом и днищем поршня. Дожигание топливоздушного заряда в бессвечной полости составляет третью стадию.

Сочетание форкамерно-факельного и двухстадийного процессов позволяет получить надежный источник воспламенения, высокую турбулизацию и скорость распространения пламени в обеих полостях камеры сгорания.

Двойное выжигание в процессе сгорания бедной цилиндрической смеси снижает возможность образования в отработавших газах окиси углерода и углеводородов. Ускорение распространения пламени в свечной и бессвечной полостях уменьшает вероятность образования застойных зон. Как известно – это зоны наиболее благоприятные для возможного возникновения детонации [16].

Следовательно, двигатели с трехстадийным сгоранием могут проектироваться под более высокую степень сжатия или работать на низкооктановом топливе.

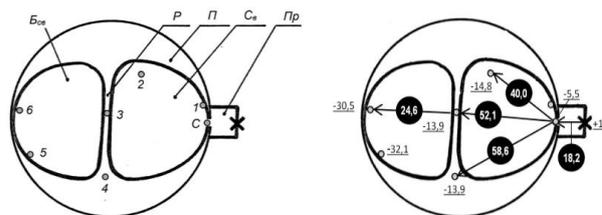
Исследования эффективных показателей двигателя с трехстадийным сгоранием показали, что объяснить происходящие в нем процессы на основе классической теории горения очень сложно. Косвенные факторы, такие как угол опережения зажигания и температура отработавших газов, значительно снижаются, что свидетельствует об изменении процесса сгорания.

Процесс смесеобразования в двигателе с трехстадийным имеет ряд особенностей. К моменту зажигания в предкамере образуется смесь более бедного состава по сравнению с двигателем форкамерно-факельного зажигания. Изменение коэффициента избытка воздуха результирующей смеси влияет на скорость выброса факела и состав активных продуктов, содержащихся в нем, что для трехстадийного сгорания имеет большее значение, чем для форкамерно-факельного зажигания, так как определяет процесс сгорания в свечной полости. В свою очередь качество сгорания на второй стадии определяет процесс дожигания в бессвечной полости.

Чтобы более полно оценить процесс сгорания, проведены исследования распространения пламени методом ионизации [17]. При стендовых испытаниях проводилась запись ионограмм, после обработки которых опре-

делялись осредненные значения продолжительности и скорости распространения пламени по камере сгорания.

На рис.2 приведены схемы, показывающие моменты прихода пламени к отдельным и оно датчикам и условные скорости сгорания (обведены кружком), вычисленные по продолжительности распространения пламени и расстоянию к этим датчикам при различных способах сгорания. Моменты прихода пламени даны относительно ВМТ. Знаком «минус» обозначены точки, к которым пламя приходит после ВМТ.



**Рис. 2.** Схема размещения ионизационных датчиков (а) и скорости распространения пламени (б):  $B_{св}$ ,  $C_{св}$  – бессвечная и свечная полости,  $P$  – перегородка,  $P$  – поршень,  $P_p$  – предкамера;  $C$  – сопловое отверстие; 1,2...6 – ионизационные датчики; 18,2 – скорость пламени, м/с; 32,1 – моменты прихода пламени к ионизационным датчикам (в градусах поворота коленчатого вала);  $\alpha_\phi = 0,59$ ;  $\alpha_0 = 1,39$ ;  $\eta_v = 0,4$ ;  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>

**Fig. 2.** The layout of the sensors ionization (a) and flame spread rate (б):  $B_{св}$ ,  $C_{св}$  – no spark plug chamber and spark plug chamber;  $P$  – dissepiment;  $P$  – piston;  $P_p$  – antechamber;  $C$  – nozzle orifice; 1,2...6 – sensors ionization; 18,2 – flame speed, m/s; 32,1 (degrees rotation of the crankshaft) – points to the arrival of the flame to sensors;  $\alpha_\phi = 0,59$ ;  $\alpha_0 = 1,39$ ;  $\eta_v = 0,4$ ;  $n = 2000$  min<sup>-1</sup>

В двигателе с форкамерно-факельным зажиганием максимальные скорости сгорания наблюдаются непосредственно в зоне действия факела. Скорость распространения пламени в этой зоне оценивалась по датчикам 3 и 4. По мере удаления от зоны действия факела (датчики 5 и 6), процесс горения резко замедляется. Скорости сгорания уменьшаются в 3 – 4 раза. Процесс догорания затягивается, что в значительной мере снижает эффективность процесса, обусловленную факельным зажиганием в начальной и основной фазах сгорания. Резкое замедление горения не дает возможности полностью реализовать преимущества факельного зажигания. Медленное догорание смеси вне зоны действия факела обуславливает незначительное повышение антидетонационных качеств форкамерного процесса по сравнению с искровым.

При двухстадийном процессе распространение пламени имеет другой характер [18-19]. На первой стадии сгорание протекает идентично искровому зажиганию. После поджигания смеси искровым разрядом формируется начальный очаг воспламенения, продолжительность которого оценивалась датчиком 1, расположенным на расстоянии 8 мм от места образования искрового промежутка. Как отмечалось, сгорание в зоне источника воспламенения определяется в основном составом смеси и количеством остаточных газов [20] и носит харак-

тер мелкомасштабного турбулентного горения. Поэтому скорости сгорания в этой зоне невысоки и не превышают 5 – 10 м/с. После формирования начального очага начинается основная фаза сгорания в свечной полости. Пламя распространяется с невысокими скоростями. Искривление фронта пламени небольшое, так как разница в скоростях сгорания на различных участках свечной полости, оцененная по датчикам 2,3 и 4, незначительна. Так, условные скорости сгорания на первой стадии при средней нагрузке и  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$  находятся в пределах 16 – 18 м/с, а моменты прихода пламени к разделительному выступу в т.т. 3 и 4 соответственно составляют от 15,0 до 20 град п.к.в. после ВМТ. Равномерное распространение пламени обуславливает поджигание максимально возможного количества непрореагировавшего заряда из одной полости в другую.

В бессвечной полости находится большая часть заряда, турбулизованная ранее поступившей непрореагировавшей смесью из свечной полости. Факел выбрасываемых газов дополнительно турбулизует и воспламеняет эту смесь, вызывая ускоренное дожигание, в результате чего скорость сгорания на второй стадии возрастает в 2 – 3 раза.

В двигателе с трехстадийным процессом распространение пламени происходит следующим образом. Сгорание в предкамере переобогащенного топливовоздушного заряда характеризуется невысокими скоростями, зависящими в основном от коэффициента избытка воздуха результирующей смеси. Другие факторы, такие как наполнение, частота вращения, конструкция предкамеры незначительно изменяют процесс сгорания на первой стадии, о чем свидетельствуют практически одинаковые скорости распространения пламени при равнозначных составах смеси в форкамере. Кроме результирующего состава смеси значительное влияние на распространение пламени в предкамере оказывают диаметр, форма и размещение соплового отверстия, определяющие степень завихрения и распределение заряда по объему дополнительной камеры сгорания.

Вторая стадия протекает с особенностями, характерными для форкамерно-факельного зажигания. В зоне действия факела сгорание протекает быстро, со значительными скоростями. Пламя приходит к датчикам 3 и 4 быстрее чем к датчику 2, находящемуся в стороне от оси факела, что подтверждает вывод об интенсивном горении заряда лишь в зоне непосредственного смешения смеси и продуктов полного и неполного сгорания, составляющих факел.

Интенсивность распространения пламени на третьей стадии снижается, хотя скорости сгорания в 1,5 – 2 раза выше, чем скорости сгорания, характерные для обычного искрового процесса. По отношению к двухстадийному сгоранию этот показатель снижается во столько же раз. Существует ряд причин, которые приводят к снижению эффективности дожигания смеси в бессвечной полости. Во-первых, неравномерное распространение фронта пламени в свечной полости уменьшает количество топливовоздушного заряда, перетекающего в бессвечную полость. Во-вторых, по этим же причинам уменьшает-

ся эффект турбулизации, создаваемый перетекающими газами. В-третьих, одновременный приход пламени к разделительному выступу обуславливает неравномерный выброс факелов в бессвечную полость по ширине камеры сгорания.

По результатам обработки ионограмм для датчиков, расположенных в наиболее характерных точках камеры сгорания, построены зависимости скорости и продолжительности распространения пламени на различных участках камеры сгорания (рис.3.), позволяющие сравнить эффективность различных процессов сгорания (датчики 7 и 8 использовались дополнительно при исследовании форкамерно-факельного зажигания).

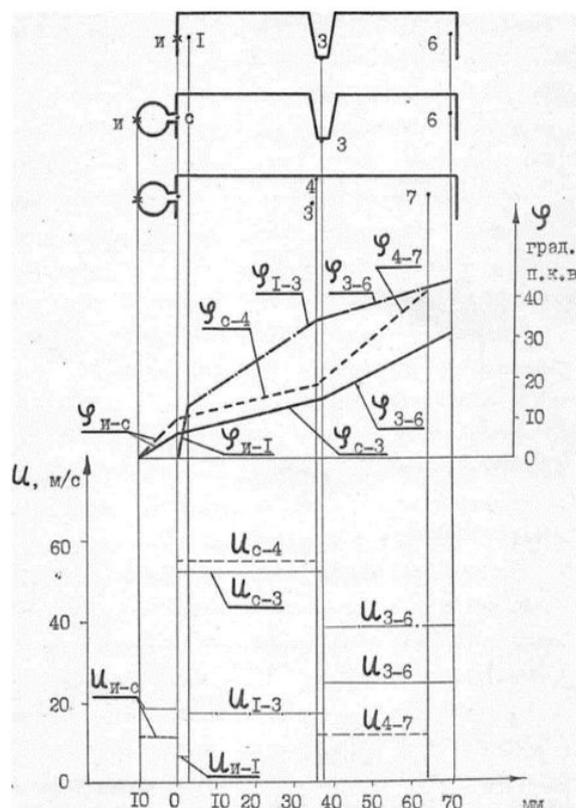


Рис. 3. Продолжительность ( $\varphi$ ) и скорость распространения пламени ( $u$ ) в камере сгорания:  $\eta_v = 0,4$ ;  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ;  $u$  – свеча зажигания;  $c$  – датчик в сопловом отверстии; 1,2...8 – ионотатчики

Fig. 3. Length ( $\varphi$ ) and speed of flame propagation ( $u$ ) in the combustion chamber:  $\eta_v = 0,4$ ;  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ;  $u$  – spark-plug;  $c$  – sensor in the nozzle orifice; 1,2...8 – sensors ionization

Полученные графики показывают, что продолжительность распространения пламени при трехстадийном процессе сокращается и составляет по основной камере сгорания для режима  $n = 2000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\eta_v = 0,6$  на составе  $\alpha_0 = 1,13$  всего 25 град. п.к.в., тогда как при двухстадийном и форкамерном процессах на близких составах смесей сгорание основной части заряда завершается соответственно за 31 и 32 град. Здесь не учитывается время от момента зажигания до выброса факела или длительность формирования начального очага при двухстадийном процессе, то есть подготовительные этапы,

способствующие сгоранию основной части смеси, так как при осуществлении этих этапов количество прореагировавшего заряда незначительно.

За время формирования начального очага сгорает лишь 6 – 8% смеси [21], а в предкамере не более 4%, потому что объем дополнительной камеры не превышает приведенной величины.

Сравнение продолжительности и скорости распространения пламени в двигателях с трехстадийным и форкамерным процессами показывает, что до разделительного выступа сгорание в сравниваемых двигателях протекает по одному и тому же механизму. Разница в продолжительности сгорания в дополнительной камере объясняется различными составами результирующей смеси. Более низкие значения  $\alpha_{\phi}$  в двигателе с форкамерно-факельным зажиганием обуславливают меньшие скорости горения. Обогащение результирующей смеси в предкамере с 0,53 до 0,38 единицы по коэффициенту избытка воздуха приводит к снижению скорости распространения пламени с 18,2 до 11,9 м/с, то есть примерно в 1,5 раза.

На второй стадии скорость и продолжительность распространения пламени практически одинаковы. Параметры процесса горения в свечной полости (или в зоне факела) определяются в основном следующими показателями: составом смеси в этой зоне, скоростью и составом продуктов факела, выбрасываемого из дополнительной камеры. По сравнению с двухстадийным процессом распространение пламени при трехстадийном сгорании в свечной полости характеризуется значительно большими скоростями. Так скорости сгорания в этой полости оцененные по датчику 3 ( $u_{1-3}$  и  $u_{с-3}$ , соответственно для двухстадийного и трехстадийного процессов) отличаются примерно в 2,9 раза.

После прохождения средней части камеры сгорания интенсивность процесса горения при форкамерно-факельном зажигании резко снижается. Скорость сгорания ( $u_{4,7}$ ) уменьшается и находится в пределах 10 – 20 м/с в зависимости от режимных параметров. При трехстадийном процессе интенсивность горения за перегородкой уменьшается, но в меньшей мере чем при форкамерно-факельном зажигании. Скорости сгорания на участке 3-6 в 1,5 – 2,5 раза выше чем на участке 4-7 двигателя с форкамерным процессом, что свидетельствует о наличии факельного дожига в бессвечной полости, хотя оно протекает с меньшей эффективностью, чем в двигателе с двухстадийным сгоранием.

К особенностям трехстадийного процесса следует отнести то, что практически весь топливовоздушный заряд сгорает за ВМТ. Несмотря на это, за счет сокращения общей продолжительности распространения пламени процесс сгорания завершается в пределах угла поворота коленчатого вала, характерных для двухстадийного и форкамерного двигателей

При трехстадийном сгорании процесс в свечной полости протекает с высокими скоростями даже на очень бедных смесях, что определяет сохранение высоких скоростей распространения пламени на третьей стадии в отличие от двухстадийного процесса, при котором

характерно резкое снижение скорости распространения пламени в бессвечной полости при обеднении состава результирующей смеси. Это связано с уменьшением энергии выброса факела и предварительной турбулизации остаточной части топливовоздушного заряда. Поэтому на бедных смесях при трехстадийном процессе дожигание протекает с большими скоростями, что позволяет улучшить сгорание этих смесей и получить высокие эффективные показатели. Соответственно расширяются пределы качественного регулирования работы двигателя за счет изменения состава смеси.

## ВЫВОДЫ

Исследование эффективных показателей и распространения пламени методом ионизации показали существенное отличие трехстадийного процесса от форкамерно-факельного и двухстадийного процессов, синтезом которых, по сути, является исследуемый способ сгорания. Для трехстадийного сгорания характерны высокие скорости сгорания в свечной и факельное дожигание в бессвечной полостях. Сокращается общая продолжительность сгорания, расширяются пределы качественного регулирования, улучшается сгорание бедных смесей. Однако, не наблюдается существенного повышения экономичности двигателя. Снижение ожидаемого эффекта, очевидно, следует объяснять ростом газодинамических (перетекание заряда из форкамеры в свечную и из нее в бессвечную полость) и тепловых потерь (за счет более развитой поверхности, с которой соприкасаются горящие газы). Следовательно, дальнейшее совершенствование двигателя с трехстадийным сгоранием лежит в плоскости конструктивных решений, которые позволят снизить указанные потери.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Борман А., Подзноев Г., Абдулгасис У. 2011.** Дизельный электрогенератор с использованием гидрида алюминия в качестве энергоносителя. MOTROL, 13С, 51-60.
2. Повышение эффективности рабочего процесса ДВС применением топливно-водородных смесей. Available online at: <<http://studik.net/povysheniye-effektivnosti-rabochego-processa-dvs-rimneniem-toplivno-vodorodnyx-smesej>>
3. **Cherednichenko A., Oshchip O. 2013.** Показатели газотурбинной установки с термодинамической регенерацией тепла. MOTROL. Commission of motorization and energetics in agriculture – 2013, Vol.15, No. 2. 165-170.
4. Некоторые разновидности рабочих циклов двигателей внутреннего сгорания More Available online at: <http://stroy-technics.ru/article/nekotorye-raznovidnosti-rabochikh-tsiklov-dvigatelay-vnutrennego-sgoraniya>.
5. **Митрофанов С.В.** О ДВС, его резервах и перспективах развития глазами специалиста / Инженерный

- центр. Компания Русский Трактор Available online at: < [http://rtc-ec.ru/notes/o\\_dvs.html](http://rtc-ec.ru/notes/o_dvs.html)>.
6. Power Generation Available online at: <http://www.scudergroup.com/power-generation/>.
  7. The Zajac Motors difference: Technology That Transforms Learn More. Available online at:< <http://www.zajacmotors.com/technology.phtml>>.
  8. The 5-Phase-Method allows the reduction of engine size by increasing the charging efficiency and rotational speed. Available online at: <http://dirokonstruktion.de/Englisch/index2.html>.
  9. Экологические характеристики двигателей внутреннего сгорания. Available online at: < [http://studopedia.net/II\\_93666\\_ekologicheskie-harakteristi-stikidvigatelyevnutrennego-sgoraniya.html](http://studopedia.net/II_93666_ekologicheskie-harakteristi-stikidvigatelyevnutrennego-sgoraniya.html)>.
  10. Луканин В.Н. 1995. Двигатели внутреннего сгорания. Книга 1. Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян [и др.] Под ред. В.Н. Луканина. – М., Высшая школа, 368.
  11. Воинов А.Н., Соболев Л.М., Чарноцкий Н.К. 1975. Способ работы двигателя с форкамерно-факельным зажиганием. – А.с. 494528 (СССР), опубл. в БИ., 45.
  12. Карасев В.А. 1984. Исследование процессов сгорания и образования токсических веществ в двигателе с двухстадийным сгоранием. – Дис. ... канд. техн. наук. – Кострома, 242.
  13. Двигатель форкамерно-факельного зажигания. Available online at: < <http://www.drive2.ru/b/1158262>>.
  14. Соболев Л.М. 1986. Эффективность работы бензинового двигателя с двухстадийным сгоранием / Л.М. Соболев, В.А. Карасев // Матер. Всес. всесоюз. конф. В кн. «Диагностика, повышение эффективности, экономичности и долговечности двигателей». – Л., 180-184.
  15. Кузнецов И.В. 2008. Увеличение мощности, улучшение топливной экономичности, экологических показателей и детонационных качеств в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием // И.В. Кузнецов. – М.: МГИУ. 158.
  16. Мотлохов А.В. 2006. Особенности развития процесса детонации в двигателях с искровым зажиганием / А.В. Мотлохов // Автомобильный транспорт. – Вып. № 18. 18-24.
  17. Мандельштам А.А. 1975. Исследование распространения пламени и фаз процесса сгорания в двигателе / А.А. Мандельштам, Б.Я. Черняк // Сб. науч. трудов МАДИ. – М.: МАДИ, – Вып. 95. 39-41.
  18. Рябов Ю.Н. 1978. Экономичность работы двигателя с двухстадийным сгоранием равномерно- распределенной смеси / Ю.Н. Рябов // Сб. науч. трудов ВСИ-ЗО. – М.: ВСИЗО, 102-105.
  19. Смирнов О.В. 2004. Повышение антидетонационных качеств двигателей с искровым зажиганием путем двухстадийного сгорания расслоенной битопливной смеси [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук / Смирнов О.В. – Кострома, 149.
  20. Буров А.Л. 2008. Тепловые двигатели // А.Л. Буров. – МГИУ, 223.
  21. Железко Б.Е. 1985. Термодинамика, теплопередача и двигатели внутреннего сгорания / Б.Е. Железко, В.М. Адамов, Р.И. Еськин [и др.]. – Мн.: Высшая школа, 271.

#### FEATURES OF ENGINE WITH THREE-STAGE COMBUSTION

**Summary.** Fuel economy is a priority issue worldwide. Known methods of increasing the efficiency of internal combustion engines is practically exhausted themselves. The process of burning the air-fuel mixture in the engine can be improved by increasing the rate of combustion.

The article presents the results of the study fundamentally new three-stage combustion process in the engine. This process is a synthesis of pre-combustion chamber jet ignition and a two-stage combustion. Using of flambeau ignition allows intensifying combustion in an initial stage and final stage burning. Significantly accelerates the combustion process as a whole, resulting in increased engine efficiency. The data of the study of flame propagation velocity in the combustion chamber by means of the ionization sensor confirming reduction time combustion gas-air mixture in the engine with the new process compared to the pre-combustion chamber jet ignition and a two-stage combustion.

Properties of the flame in the combustion chamber under three-stage process are installed. Laboratory test engine with a new process confirms the increase in fuel efficiency for all modes studied.

We need to continue research to determine additional losses that occur when overflow gases from the pre-chamber and through the ledge, and heat losses due to the developed surface of the combustion chamber. Reducing these losses will enhance the efficiency of the new process.

**Key words:** engine, combustion flame speed, ionization, pre-combustion chamber jet ignition, two-stage combustion, three-stage combustion.