

## **К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ СТЕПЕНИ ВНУТРЕННЕЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ НА ПРОЦЕСС УПРАВЛЯЕМОГО САМОВОСПЛАМЕНЕНИЯ БЕНЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТЕПЛОВОМ ДВИГАТЕЛЕ**

**Хрипач Н.А., Папкин Б.А., Татарников А.П.**

*ФГБОУ ВПО «Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)», Университет машиностроения, Москва (Россия), [tatarnikovalex@gmail.com](mailto:tatarnikovalex@gmail.com)*

**В статье проведен краткий анализ современных достижений и тенденций развития современных двигателей внутреннего сгорания. Описаны результаты моделирования теплового процесса самовоспламенения гомогенной топливовоздушной смеси в бензиновом двигателе на режимах средних нагрузок. Рассмотрены факторы, влияющие на момент самовоспламенения топливовоздушной смеси и параметры, влияющие на изменение температуры в цилиндре на тактах сжатия и расширения. Предложены способы управления моментом самовоспламенения гомогенной топливовоздушной смеси за счет регулирования степени внутренней рециркуляции отработавших газов в цилиндре. Проведено исследование влияния степени внутренней рециркуляции на температуру в цилиндре и момент начала самовоспламенения топливовоздушной смеси, а так же влияние фаз газораспределения на степень внутренней рециркуляции отработавших газов в цилиндре.**

**Ключевые слова:** Двигатель внутреннего сгорания, гомогенное самовоспламенение, внутренняя рециркуляция.

## **THE EFFECT OF THE DEGREE OF INTERNAL EGR ON THE PROCESS OF SELF-IGNITION CONTROLLED FUEL-AIR MIXTURE IN A HEAT ENGINE**

**Khripach N.A., Papkin B.A., Tatarnikov A.P.**

*Moscow state university of mechanical engineering (MAMI), Moscow, [tatarnikovalex@gmail.com](mailto:tatarnikovalex@gmail.com)*

**The article gives a brief analysis of the latest achievements and trends of development of modern internal combustion engines. The results of the simulation of the thermal process of self-ignition homogeneous air-fuel mixture in a gasoline engine in the modes of medium loads. The factors influencing the time of auto-ignition of the fuel mixture and the parameters that affect the change in the temperature in the cylinder on the compression and expansion strokes. The methods of control auto-ignition homogeneous air-fuel mixture by adjusting the degree of internal EGR in the cylinder. The influence of the degree of internal EGR of the temperature in the cylinder and the beginning of self-ignition fuel-air mixture, as well as the influence of valve timing on the degree of internal EGR in the cylinder.**

**Keywords:** The internal combustion engine, HCCI, internal EGR.

Основными задачами, стоящими сегодня перед разработчиками двигателей внутреннего сгорания являются снижение расхода топлива и снижение вредных выбросов с отработавшими газами. Сокращение запасов углеводородных топлив, рост цен, а так же проблемы глобального потепления приводят к ужесточению норм выбросов вредных веществ и увеличению давления на автопроизводителей со стороны правительств и организаций по защите окружающей среды. С небольшим отставанием Россия так же принимает новые экологические классы, нормирующие уровень вредных выбросов легкового и грузового транспорта. Современные бензиновые двигатели с непосредственным впрыском топлива в цилиндр, комбинированной системой наддува и трехкомпонентным каталитическим нейтрализатором позволяют обеспечить уровень вредных выбросов соответствующий современным экологическим классам [1]. Дизельные двигатели, благодаря высокой степени сжатия и высокой степени наддува, имеют повышенный индикаторный КПД, однако, несмотря на высокий уровень развития топливной аппаратуры и систем впрыска, процесс сгорания при расслоении заряда

приводит к локальному обогащению бедной смеси, вследствие чего образуется большое количество вредных веществ, преимущественно сажа и  $\text{NO}_x$ , а на сегодняшний день стоимость систем нейтрализации вредных веществ, образующихся при сгорании бедных смесей, остается довольно высокой.

Перспективным направлением исследований в последние годы является изучение процесса самовоспламенения гомогенной топливовоздушной смеси, который позволит в скором будущем выполнить перспективные требования по вредным выбросам и расходу топлива. Автопроизводители анонсировали двигатели с реализацией процесса HCCI лишь на некоторых рабочих режимах, еще более сложной задачей является реализация процесса управляемого самовоспламенения во всем диапазоне рабочих режимов двигателя, особенно на переходных режимах.

Проведенные исследования самовоспламенения эталонных топлив [3,5,7-9] показали, что при использовании в качестве топлива n-гептана и изооктана, несмотря на различие в структуре и свойствах топлива, самовоспламенение происходит при достижении топливовоздушной смеси температуры 1100К. Поэтому, для эффективной реализации процесса управляемого самовоспламенения гомогенной топливовоздушной смеси необходимо эффективно и точно управлять моментом воспламенения и продолжительностью сгорания при изменении скоростного, теплового и нагрузочного режимов работы двигателя. Контроль момента самовоспламенения осуществляется за счет регулирования температуры и давления в цилиндре в зоне ВМТ. Температуру топливовоздушной смеси можно контролировать за счет подогрева впускного воздуха, изменения степени сжатия, внутренней рециркуляцией отработавших газов и внешней рециркуляцией. Основной вклад в повышение температуры топливовоздушной смеси вносит степень сжатия двигателя, а контроль момента самовоспламенения осуществляется посредством изменения степени внутренней рециркуляции в цилиндре. Степень внутренней рециркуляции в цилиндре зависит от процесса газообмена свежего заряда и отработавших газов, работы механизма газораспределения и времени открытия органов газообмена. Температура топливовоздушной смеси в цилиндре зависит не только от температуры свежего заряда на впуске и температуры топлива, но и от количества и температуры отработавших газов, оставшихся в цилиндре после рабочего цикла. В свою очередь, количество оставшихся в цилиндре отработавших газов и их температура зависят от количества свежей топливовоздушной смеси, теплообмена между газами и деталями двигателя и температуры в конце сгорания. Температура в конце процесса сгорания зависит от момента воспламенения топливовоздушной смеси и продолжительности сгорания. Все эти факторы в конечном итоге влияют на температуру топливовоздушной смеси в цилиндре.

Процесс газообмена на современных бензиновых двигателях осуществляют с помощью механизмов изменения фаз газораспределения, которые позволяют улучшить наполнение и продувку цилиндров, что позволяет улучшить мощностные и экономические параметры на каждом режиме работы двигателя [2]. Механизмы газораспределения позволяют изменять моменты открытия впускных и выпускных клапанов при сохранении продолжительности открытия клапанов, как например VANOS, DOUBLE VANOS, VVT-i, изменять высоту подъема клапана за счет применения кулачков различного профиля, как например VVTL-i, VTEC, и наверное самыми совершенными на сегодняшний день системами управления газообменом являются системы, позволяющие изменять высоту подъема клапана в широком диапазоне, что позволяет избавиться от дроссельного узла, как например Valvetronic, Valvematic, VEL, MultiAir.

По тому же принципу, возможно, контролировать степень внутренней рециркуляции за счет изменения момента закрытия выпускного клапана, тем самым осуществлять контроль нагрузки и момента самовоспламенения. Моделирование рабочего процесса позволило изучить влияние момента закрытия впускного клапана, то есть температуры начала сжатия, на процесс гомогенного самовоспламенения. Моделирование проводилось на двигателе со степенью сжатия 11.5, работающего на стехиометрической гомогенной смеси на режиме 2000 мин<sup>-1</sup> при полностью открытой дроссельной заслонке.

Температура начала сжатия зависит, в свою очередь, от степени внутренней рециркуляции и изменяется в диапазоне от 500 до 610 К. При существенном увеличении степени внутренней рециркуляции до 60-70% происходит увеличение температуры начала сжатия, при снижении максимальной температуры цикла за счет увеличения массы ОГ в цилиндре. Температура самовоспламенения топливовоздушной смеси находилась в зоне ВМТ и составляла 1100К, для обеспечения данной температуры необходимо было обеспечить температуру начала сжатия около 540К за счет степени внутренней рециркуляции порядка 50%. На рисунке 1 представлена зависимость температуры в цилиндре в зависимости от температуры начала сжатия.

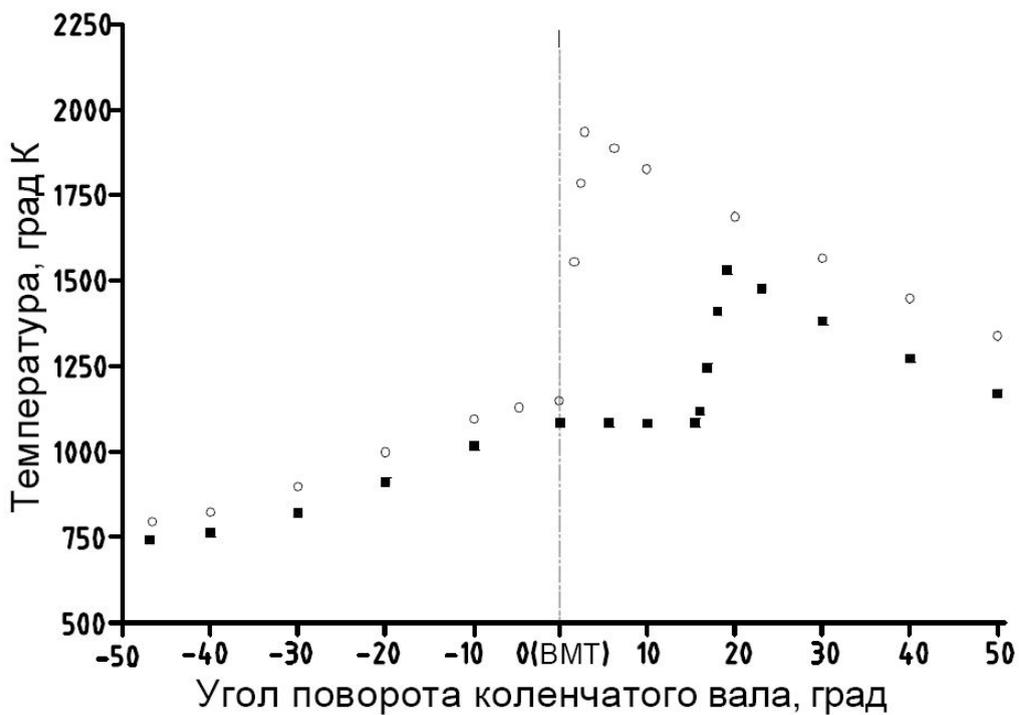


Рис. 1. Зависимость температуры в цилиндре от угла поворота коленчатого вала

○ - температура в момент начала сжатия 533 К,

■ - температура в момент начала сжатия 506 К

При снижении температуры начала сжатия с 533 до 506 К момент начала самовоспламенения смещается в сторону за ВМТ на 16 градусов поворота коленчатого вала (г.п.к.в.), при этом происходит снижение максимальной температуры цикла с 1900 К до 1620 К за счет увеличения надпоршневого объема. На рисунке 2 показана расчетная зависимость между температурой начала сжатия и моментом самовоспламенения.

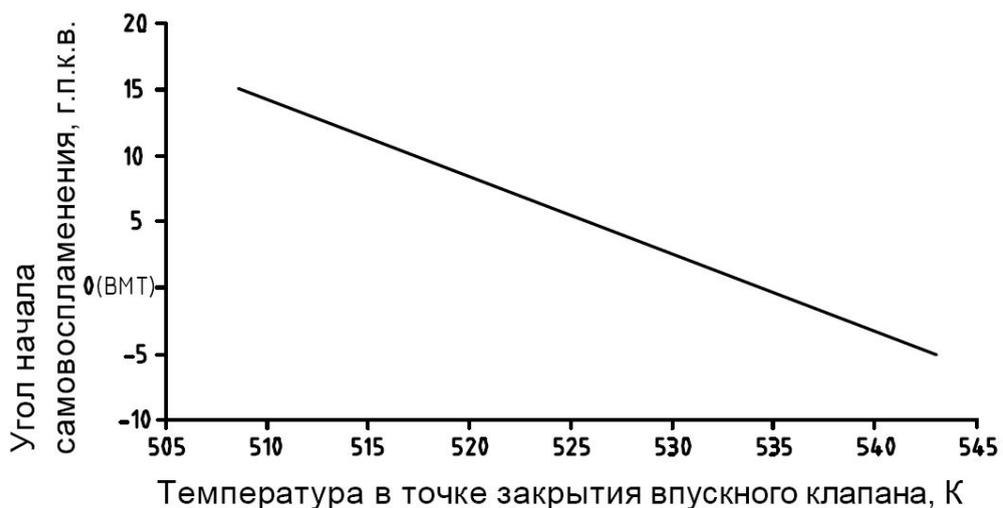


Рис. 2. Расчетная зависимость между температурой начала сжатия и моментом самовоспламенения

При снижении температуры начала сжатия момент самовоспламенения становится более поздним и переходит на линию расширения, при температуре 506 К, соответствующей

степени внутренней рециркуляции в 34% основная фаза горения начинается за ВМТ при движении поршня вниз, что приводит к замедленному росту температуры за счет увеличения надпоршневого объема, которое компенсирует влияние предпламенных реакций на температуру. Характер такой зависимости имеет место быть и на других режимах работы, и согласуется с результатами исследований [4], несмотря на различие в абсолютных температурах, что обусловлено различием объектов исследования. На рисунке 3 представлена индикаторная диаграмма того же рабочего режима, показывающая зависимость давления в цилиндре от у.п.к.в. в зависимости от температуры начала сжатия.

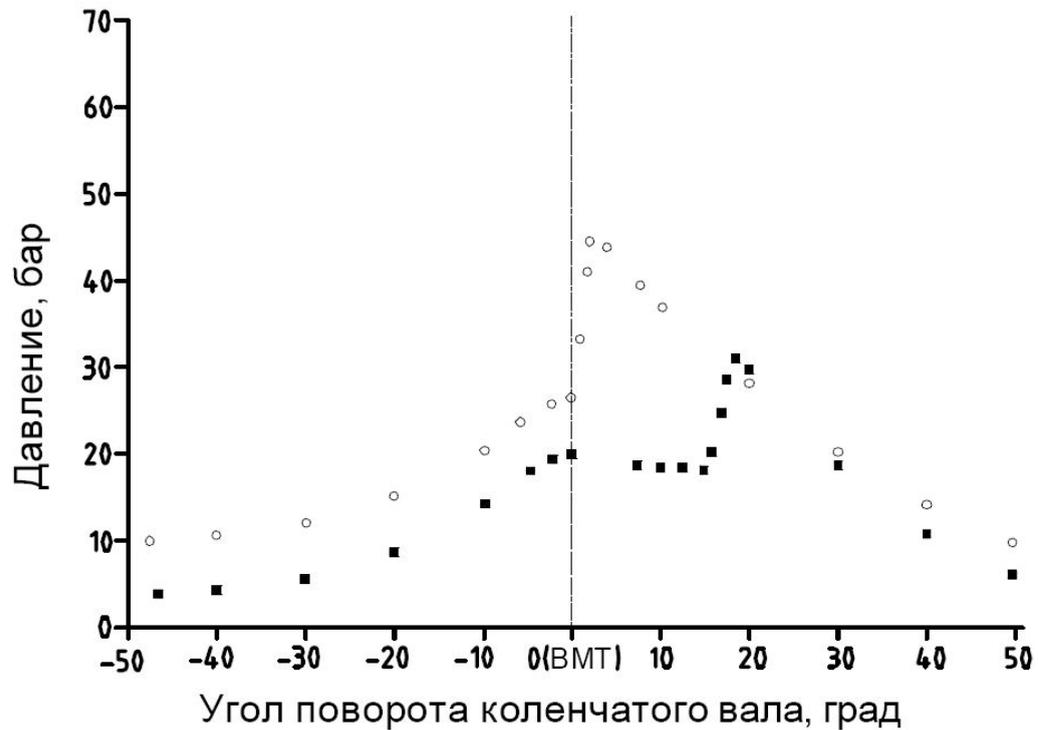


Рис. 3. Изменение давления в цилиндре в зависимости от угла поворота коленчатого вала

○ - температура в момент начала сжатия 533 К,

■ - температура в момент начала сжатия 506 К

Эффективность сгорания зависит от момента самовоспламенения в зоне ВМТ что сопровождается резким повышением давления и обеспечивает высокую термодинамическую эффективность. При снижении температуры начала сжатия с 533 до 506 К термодинамическая эффективность снижается на 5 % за счет снижения максимальной температуры цикла на 280 градусов. Дальнейшее смещение за ВМТ момента воспламенения за счет снижения температуры начала сжатия делает процесс самовоспламенения нестабильным, за счет чего увеличиваются вредные выбросы CO и в большей степени CH [6]. Для стабилизации процесса на таких режимах, возможно, использовать искровое зажигание, которое позволяет улучшить процесс самовоспламенения за счет повышения температуры.

Помимо исследования зависимости процесса самовоспламенения от момента закрытия

выпускного клапана было проведено исследование по изучению влияния фаз газораспределения на степень внутренней рециркуляции в цилиндре. При моделировании было исследовано влияние фаз газораспределения на рабочий процесс управляемого самовоспламенения в диапазоне скоростных режимов от 1000 до 3000 мин<sup>-1</sup>. В расчетах были приняты симметричные профили кулачков и симметричные фазы открытия и закрытия, что позволяет снизить насосные потери. При таком расположении фаз газораспределения потери обусловлены теплопередачей от горячих газов в стенки камеры сгорания после закрытия выпускного клапана. Степень внутренней рециркуляции в большей степени определяется фазой закрытия выпускного клапана и в меньшей степени скоростным режимом работы. Это обусловлено повышением температуры ОГ и снижением их плотности. Так же со снижением степени внутренней рециркуляции происходит увеличение свежего заряда и среднего индикаторного давления. Зависимость среднего индикаторного давления от степени внутренней рециркуляции ОГ представлена на рисунке 4.

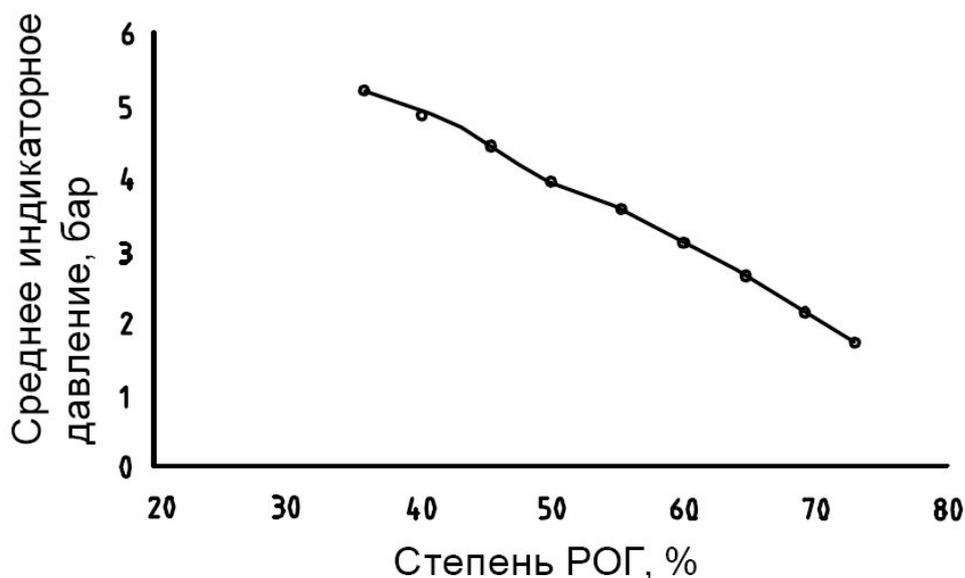


Рис.4. Изменение среднего индикаторного давления в зависимости от степени рециркуляции ОГ

### **Заключение**

Проведенное исследование и моделирование процесса управляемого самовоспламенения гомогенной топливовоздушной смеси посредством регулирования степени внутренней рециркуляции отработавших газов показывает, что данное направление имеет свои перспективы для улучшения основных показателей современных четырехтактных двигателей. Существенными сложностями в работе двигателя на низких нагрузках являются пропуски воспламенения, обусловленные низкой температурой смеси в конце сжатия, неполнота сгорания топлива, проявляющаяся при слишком большой задержки воспламенения и

повышенной продолжительности сгорания, на высоких нагрузках существуют проблемы слишком высокой скорости нарастания давления вследствие повышенной температуры, что приводит к повышению выбросов  $\text{NO}_x$  и высокому уровню шума при работе.

Принимая во внимание развитие электронных компонентов и систем управления в целом, можно судить о том, что в скором времени проблемы управления процессом гомогенного самовоспламенения будут решены. На сегодняшний день развитие систем изменения фаз газораспределения, систем управления, топливных систем непосредственного впрыска топлива, систем охлаждения позволяют в скором времени создать двигатель внутреннего сгорания, способный выполнить перспективные нормы по вредным выбросам, сохраняя при этом высокие мощностные и экономические параметры.

*Работа проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 14.124.13.251-МК об условиях использования гранта Президента Российской Федерации с организациями - участниками конкурсов, имеющими трудовые отношения с молодыми учеными, для государственной поддержки молодых российских ученых МК-251.2013.8 от "04" февраля 2013 г.*

### Список литературы

1. Фомин В.М., Шустров Ф.А., Проблемы развития систем с непосредственным впрыскиванием бензина для двигателей российского автотранспорта, Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 1. № 2 (16). С. 226-234.
2. Шустров Ф.А., Петриченко Д.А., Разработка специализированного программного обеспечения для управления системой изменения фаз газораспределения. Современные проблемы науки и образования. 2013. № 2. С. 153.
3. C. Chevalier, et. all "Hydrocarbon Ignition: Automatic Generation of Reaction Mechanisms and Applications to Modelling of Engine Knock", 24 International Combustion Symposium, 1992.
4. H. Xu, A. Williams, H. Fu, S. Wallace, S. Richardson, M. Richardson "Operating Characteristics of a Homogeneous Charge Compression Ignition Engine with Cam Profile Switching – Simulation Study", SAE Paper № 2003-01-1859, 2003.
5. J. Warnatz, U. Mass, R.W. Dibble "Combustion. Physical and Chemical Fundamentals, Modelling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation", Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2006.
6. R. Chen, N. Milovanovic, J. Turner, D. Blundell "The Thermal Effect of Internal Exhaust Gas Recirculation on Controlled Auto Ignition", SAE Paper № 2003-01-0751, 2003.
7. R.H. Thring "Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engines", SAE Paper № 892068, 1989.
8. T. Aoyama, Y. Hattori, J. Mizuta, Y. Sato "An Experimental Study on Premixed-Charge Compression Ignition Gasoline Engines", SAE Paper № 960081, 1996.

9. Y. Ishibashi, S. Isomura, O. Kodo, Y. Tsushima “Improving the Exhaust Emissions of Two-Stroke Engines by Applying the Activated Radical Combustion Engine”, SAE Paper № 972077, 1997.

**Рецензенты:**

Ерохов В.И., д.т.н., профессор, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г.Москва;

Фомин В.М., д.т.н., профессор, Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ), г.Москва.