

УДК 614.843

К.В. Корытченко<sup>1</sup>, О.В. Стаховский<sup>1</sup>, А.В. Серпухов<sup>1</sup>, Д.В. Бизоныч<sup>1</sup>, Санчит Аджмани<sup>2</sup><sup>1</sup> *Национальный технический университет «ХПИ», ФВП, Харьков*<sup>2</sup> *Компания Сомнио Глобал, Детройт, США*

## МЕХАНИЗМЫ ВЛИЯНИЯ СВЕЧЕЙ НАКАЛИВАНИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС В ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

*В работе рассмотрены преимущества и недостатки использования свечей накаливания в дизельных двигателях. Проведен анализ причин возникновения проблемы холодного пуска двигателей. Сделана оценка механизмов влияния свечей накаливания на рабочий процесс в дизельных двигателях.*

**Ключевые слова:** свечи накаливания, двигатель, холодный пуск.

### Введение

Дизельные двигатели, особенно с низкой степенью сжатия, в условиях низких температур плохо пускаются [1 – 4]. Причина затрудненного пуска вызвана тем, что со снижением температуры окружающей среды в цилиндрах холодного двигателя не достигается температура, достаточная для надежного воспламенения и быстрого сгорания топлива. Проблема холодного пуска особенно проявляется на дизельных двигателях с наддувом, так степень повышения давления в турбокомпрессорах на пусковых оборотах значительно меньше номинальной [2].

В настоящее время одним из вариантов эффективного решения данной проблемы является использование свечей накаливания. Но свечи накаливания облегчают пуск только малолитражных дизельных двигателей [1]. Исследование влияния работы свечей накаливания на пусковые характеристики двигателя проведено в ряде работ [2, 5]. В то же время, механизм влияния свечей накаливания на процесс воспламенения и сгорания не раскрыт в полной мере.

**Целью данной работы** является оценка возможных механизмов влияния свечей накаливания на рабочий процесс в дизельных двигателях.

### Основной материал

#### Преимущества и недостатки свечей накаливания

К преимуществам современных свечей накаливания следует отнести короткое время подготовки двигателя к пуску (в специальных системах уменьшено до 3–5 с), компактность системы облучения пуском, прямой ввод тепловой энергии в камеру сгорания, высокий ресурс работы, невысокую стоимость [3].

Производители свечей накаливания к недостаткам такого пуска относят необходимость внесения конструктивных изменений для размещения свечей накаливания в цилиндрах двигателя, а также огра-

ничение области применения свечей на двигателях с малым диаметром поршня [1].

К недостаткам свечей накаливания следует добавить следующее. Исходя из принципа работы свечи накаливания, наконечник свечи располагают внутри камеры сгорания (рис. 1).

На прогревом двигателе наконечник свечи изменяет течение газового потока в камере сгорания, увеличивает поверхность теплообмена, что может ухудшать качество сгорания топлива в основной период работы двигателя.

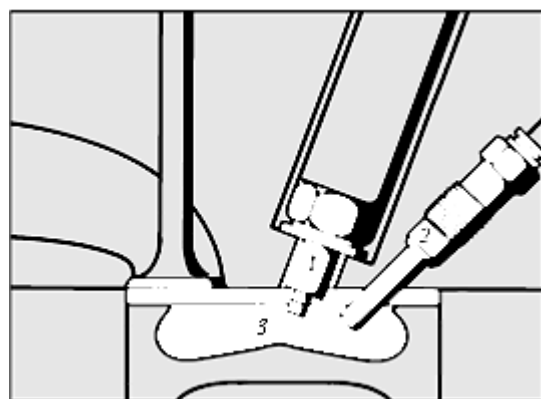


Рис. 1. Размещение свечи накаливания в камере сгорания: 1 – топливная форсунка; 2 – свеча накаливания; 3 – камера сгорания [7]

Свеча накаливания представляет собой инертное устройство по времени регулирования её температуры, в сравнении со временем протекания термогазодинамических процессов в двигателе. Поэтому часть тепловой энергии свечи уносится с отработанными газами двигателя, а в период пуска время отвода энергии с отработанными газами может достигать половины времени работы свечи. Инертность свечи накаливания также проявляется при передаче тепла от её поверхности в разогреваемую среду (топливовоздушный заряд).

Количество передаваемой энергии ограничивается размером свечи накаливания, а размер свечи

ограничивается конструктивными параметрами двигателя.

Свеча накаливания применяется в период холодного пуска двигателя. При этом в период подготовки к пуску расходуется энергия аккумуляторных батарей на нагрев свечей накаливания. Снижение заряда аккумулятора сокращает возможную длительность вращения двигателя электрическим стартером и пусковые обороты. А это влияет на пуск двигателя.

В процессе работы двигателя наконечник свечи накаливания покрывается сажей, что ухудшает его теплопередающие свойства, приводит к перегреву свечи в период пуска и ускоряет выход свечи из строя (рис. 2).



Рис. 2. Типы поломок свечей накаливания [7]

Обрыв наконечника свечи накаливания может вызвать повреждение цилиндропоршневой группы двигателя, т.е. привести к поломке.

Несмотря на существующие недостатки, свечи накаливания нашли широкое применение в малолитражных двигателях.

### Причины возникновения проблемы холодного пуска дизельных двигателей

Процесс сжатия воздушного заряда в дизельном двигателе описывается уравнением политропы. Температура  $T_{TDC}$  заряда, достигаемая в верхней мертвой точке, определяется по уравнению:

$$T_{TDC} = T_{air} \cdot \left( \frac{V_{air}}{V_{TDC}} \right)^{n-1}, \quad (1)$$

где  $T_{air}$  – температура воздуха, поступающего в цилиндр двигателя;

$V_{air}$  – объем воздушного заряда на начало сжатия;

$V_{TDC}$  – объем воздушного заряда в ВМТ;

$n$  – показатель политропы.

Для обеспечения работы дизельного двигателя температура  $T_{TDC}$  заряда должна, по меньшей мере, превосходить температуру  $T_{autoign}$  самовоспламенения:

$$T_{TDC} > T_{autoign}. \quad (2)$$

В зависимости от типа дизельного топлива, температура самовоспламенения имеет значения в диапазоне 230–310 °С [8].

Во время холодного пуска несколько факторов приводят к снижению  $T_{TDC}$  (рис. 3), заключающиеся в следующем.

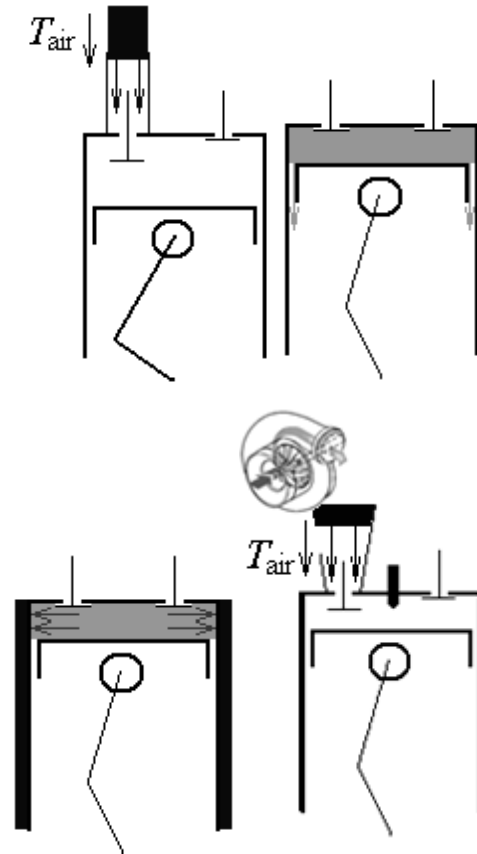


Рис. 3. Причины ухудшения условий пуска дизельного двигателя

В двигатель поступает холодный воздух  $T_{air} \downarrow$ . Повышенные зазоры в цилиндропоршневой группе холодного двигателя и более продолжительное время сжатия на пусковых оборотах приводят к увеличенным потерям воздушного заряда  $V_{air} \downarrow$ . Более высокий градиент температуры, возникающий между сжатым воздушным зарядом и холодными стенками рабочей камеры, и более продолжительное время теплообмена на пусковых оборотах интенсивней охлаждают заряд, что отражается в снижении показателя политропы  $n \downarrow$ . На пусковых оборотах, из-за низкой частоты вращения турбокомпрессора, предварительное нагревание воздуха во впускном коллекторе практически не происходит. Все перечисленные факторы, что следует из выражения (1), приводят к уменьшению температуры заряда.

В результате, при снижении температуры окружающей среды на несколько десятков градусов, температура  $T_{TDC}$  заряда в период холодного пуска может быть на несколько сотен градусов

меньше температуры, достигаемой на прогревом двигателе.

Например, степень сжатия двигателя составляет 14:1, на прогревом двигателе показатель политропы достигает  $n=1,39$ , а начальная температура воздуха  $T_{air} = 293$  К. В этом расчетном варианте получим  $T_{TDC} = 820$  К.

На холодном двигателе положим следующие параметры: эффективная степень сжатия 13,5:1;  $n=1,3$ ;  $T_{air} = 263$  К.

При этих параметрах получим  $T_{TDC} = 574$  К. То есть, снижение температуры воздушного заряда на 30 К привело к уменьшению  $T_{TDC}$  в холодном двигателе на 246 К.

Выполнения условия (2) является минимальным, но не достаточным условием для обеспечения надежного пуска.

Достаточное условие связано с получением индикаторной работы на пусковых оборотах, при ко-

торой достигается увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя. В свою очередь, индикаторная работа определяется исходя из динамики сгорания топливоздушного заряда. А развитие сгорания зависит от периода  $t_{ind}$  индукции самовоспламенения, определяемого выражением [6]:

$$t_{ind} = F \cdot P^{-N} e^{\frac{E}{RT}}, \quad (3)$$

где  $F$ ,  $E$  и  $N$  – эмпирические коэффициенты;  
 $P$  – давление;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная;  
 $T$  – температура.

Из выражения (3) следует, что период  $t_{ind}$  индукции значительно зависит от температуры заряда, так как температура входит в показатель экспоненты.

В работе [6] зависимость периода  $t_{ind}$  от температуры заряда получена в виде (рис. 4).

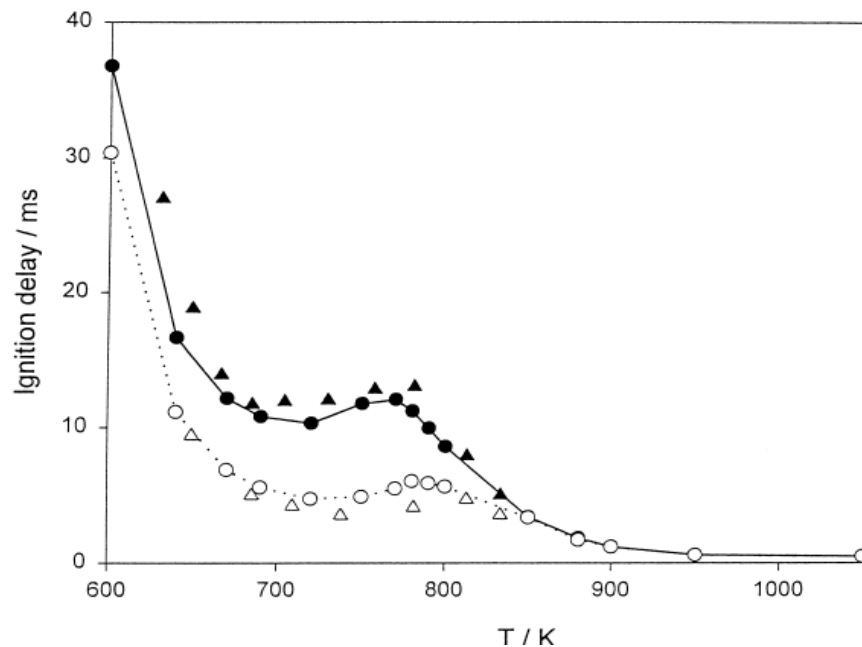


Рис. 4. Зависимость периода  $t_{ind}$  индукции самовоспламенения от температуры [6]

Для обеспечения высоких значений индикаторной работы, период  $t_{ind}$  индукции должен быть на порядок меньше половины длительности такта рабочего хода, когда совершается полезная работа. На пусковых оборотах 100–300 мин<sup>-1</sup> половина длительности такта рабочего хода равняется 50–150 мс. Отсюда, период  $t_{ind}$  индукции, при котором достигается надежный пуск, должен равняться 5–15 мс. Данный диапазон значений периода  $t_{ind}$  достигается (см. рис. 4), когда температура заряда превышает 350–450°C.

Согласно исследованию [9] установлено, что надежный пуск двигателя достигается, когда выполняется условие:

$$T_{TDC} > (350 - 450)^\circ \text{C}. \quad (4)$$

Таким образом, условие (4) является достаточным условием для обеспечения надежного пуска дизельного двигателя.

#### Анализ механизмов влияния свечей накаливания на рабочий процесс в дизельных двигателях

В современных системах облегчения холодного пуска только наконечник свечи накаливания нагревается до высоких температур (1000–1200 °С). Как правило, наконечник имеет диаметр до 5 мм и интенсивно нагреваемый участок до 5 мм.

Для последующих оценок рассчитаем площадь поверхности теплообмена и объем наконечника, которые в расчетном варианте составляют

$$S_{gl} \approx 100 \text{ мм}^2, V_{gl} \approx 100 \text{ мм}^3.$$

Свечи накаливания первоначально нагревают, а только после этого производят пуск. Предположим, что в наконечнике свечи накапливается энергия, которая полностью передается воздушному заряду в процессе сжатия. Будем полагать, что используем металлический наконечник со средней плотностью  $7,9 \text{ г/см}^3$  (плотность и теплоемкость стали) и удельной теплоемкостью  $462 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . При охлаждении такого наконечника с  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  выделится энергия, равная  $220 \text{ Дж}$ . Следует отметить, что наконечник стандартной стержневой свечи накаливания содержит изолирующее заполнение (оксид магния), имеющее более низкую плотность –  $3,6 \text{ г/см}^3$ , но более высокую удельную теплоемкость –  $1000 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ . Поэтому накопленная энергия в такой свече будет несколько меньше. При объеме сжимаемого воздушного заряда  $1 \text{ л}$  данная энергия потенциально может обеспечить возрастание температуры воздушного заряда только одного цикла сжатия на  $170 \text{ }^\circ\text{C}$ . Происходит ли это фактически?

Рассчитаем передачу тепла от металлической поверхности к воздуху. Согласно справочным данным [10], коэффициент теплоотдачи между стальной поверхностью и воздухом составляет  $8\text{--}15 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , возрастая с ростом давления газа и скорости его течения до  $1000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ , что в расчетном варианте соответствует мощности свечи  $0,5\text{--}0,9 \text{ Вт}$  с возрастанием до  $60 \text{ Вт}$ . Для справки, в стандартной свече накаливания протекает ток около  $5\text{--}20 \text{ А}$ , а потребляемая мощность составляет  $40\text{--}150 \text{ Вт}$ . На пусковых оборотах  $100\text{--}300 \text{ мин}^{-1}$  суммарное время тактов впуска и сжатия равняется  $200\text{--}600 \text{ мс}$ . За это время при  $P_{gl} = 60 \text{ Вт}$  от свечи к воздушному заряду потенциально может перейти энергия, равная  $12\text{--}36 \text{ Дж}$ . С ростом оборотов данное количество энергии будет снижаться. Для воздушного заряда с начальным объемом  $1 \text{ л}$  возрастание температуры в расчетном варианте произойдет не более, чем на  $28 \text{ }^\circ\text{C}$  (без учета изменения работы политропического сжатия). Подведение такого количества энергии, как правило, недостаточно для обеспечения надежного холодного пуска дизельного двигателя.

Рассчитаем возможность нагрева воздушного заряда за счет излучения. Интегральную мощность  $W$  излучения наконечника свечи накаливания, определим по закону Стефана-Больцмана:

$$W = \sigma T^4, \quad (5)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана.

При  $T = 1200 \text{ }^\circ\text{C}$  в рассматриваемой свече накаливания получим  $W = 26,7 \text{ Вт}$ . Следует учитывать, что воздух в рассматриваемой области температур имеет селективные спектры поглощения. Это означает, что только незначительная часть излучаемой энергии будет поглощаться воздушным зарядом. Поэтому данный механизм практически не обеспечивает нагревание воздушного заряда.

Согласно [3], “главная цель нагрева свечей – это подогрев впрыскиваемого топлива до температуры, при которой оно испарится, хорошо смешается с поступающим воздухом и легко воспламенится уже от компрессии”. Поэтому наконечники свечи накаливания располагают в области распространения струи топлива, распыляемого форсункой (рис. 5).

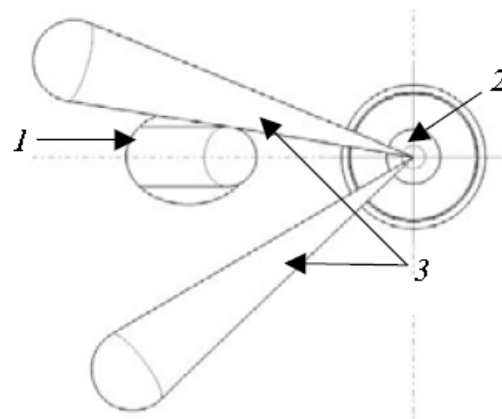


Рис. 5. Размещение свечи накаливания в двигателе: 1 – наконечник свечи накаливания; 2 – распылитель; 3 – топливные струи [5]

Передача тепла от металлической поверхности к жидкости происходит значительно быстрее, чем от металлической поверхности к газу. Это отражается в увеличении коэффициента теплоотдачи между данными средами, который может достигать  $2000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$  и более. При таком коэффициенте теплоотдачи в расчетном варианте мощность свечи накаливания составит  $120 \text{ Вт}$  и более. Данная передаваемая мощность значительно превосходит мощность по

иным механизмам передачи тепла. Поэтому свеча накаливания практически решает задачу сокращения периода индукции воспламенения топлива, впрыснутого на свечу, за счет уменьшения длительности стадии его испарения.

Обеспечение надежного холодного пуска с помощью свечей накаливания только малолитражных двигателей может быть вызвано следующими причинами. С возрастанием объема цилиндров двигателя возрастает расход воздуха двигателем. Так как свечи накаливания, как правило, размещаются в головке цилиндров вблизи форсунки и клапанов, то с ростом объема цилиндра это может приводить к увеличению скорости впускного воздушного потока, проходящего вблизи наконечника свечи накали-

вания. Это приводит к более интенсивному охлаждению свечи, то есть снижению температуры наконечника свечи накаливания. В работе [5] представлены результаты исследования зависимости температуры наконечника свечи накаливания от оборотов двигателя. С увеличением оборотов двигателя наблюдается снижение температуры наконечника свечи накаливания (рис. 6). Нелинейное снижение температуры вызвано изменением потребляемой мощности свечей накаливания. Так как с возрастанием оборотов двигателя также возрастает расход воздуха, то это косвенно свидетельствует о возможном снижении температуры наконечников свечи накаливания (и уменьшении эффективности испарения топлива) при возрастании объема двигателя.

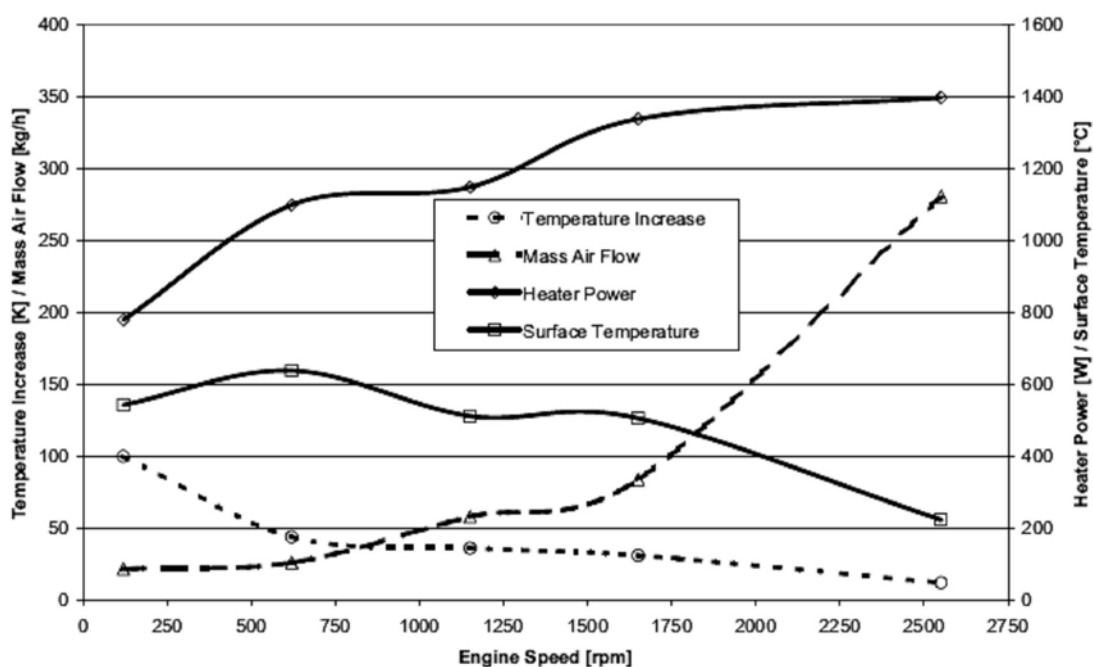


Рис. 6. Залежності возрастания температуры заряда, расхода воздуха, потребляемой мощности свечей накаливания и температуры поверхности свечи накаливания от оборотов двигателя по данным [5]

Вторая причина не обеспечения надежного холодного пуска многолитражных двигателей может быть связана с ограниченной скоростью распространения пламени в двигателе. Так как свеча накаливания сокращает период воспламенения топлива, впрыснутого вблизи наконечника свечи, то самовоспламенение топлива первоначально происходит вблизи свечи. Сгорание распыленного топлива, впрыскиваемого в оставшуюся основную область рабочей камеры, может обеспечиваться как в результате самовоспламенения с большой задержкой, так и за счет распространения пламени от самовоспламенившейся области. При фиксированной скорости распространения пламени, время сгорания основной части топлива в рабочей камере значительной мерой определяется исходя из размеров

двигателя. Скорость распространения пламени в двигателе зависит от интенсивности газодинамических течений, возникающих в рабочей камере двигателя, и может достигать 10–30 м/с [11, 12]. При диаметре цилиндра 50 мм время распространения пламени от одной стороны цилиндра к противоположной с указанной скоростью составит 2–5 мс. С учетом времени задержки воспламенения, равной 5–10 мс, полное время сгорания топлива составит 7–10 мс. Процесс интенсивного сгорания топлива в дизельном двигателе, как правило, составляет около 10–20 град. поворота коленчатого вала (п.к.в.), что на частоте оборотов 200 мин<sup>-1</sup> равняется 8–16 мс. То есть, при рассматриваемом диаметре цилиндра (малолитражный двигатель) достигаются условия для интенсивного сгорания топлива в наи-

более оптимальных углах п.к.в. Из вышеизложенного можно положить, что при возрастании диаметра цилиндра двигателя в несколько раз полное время сгорания топлива за счет распространения пламени от свечи накаливания станет таким, что сгорание займет значительные углы п.к.в., чем существенно снизит индикаторную работу и приведет к невозможности пуска двигателя.

## Вывод

Проблема холодного пуска дизельных двигателей вызвана увеличением периода индукции самовоспламенения топлива из-за снижения температуры заряда, достигаемой в цикле сжатия.

Путем оценки тепловой мощности, передаваемой топливоздушную среду от свечи накаливания, установлено, что свеча позволяет наиболее эффективно сократить время испарения топлива, чем достигается сокращение периода индукции.

А ограничение области применения свечей накаливания на двигателях с малым размером поршня может быть вызвано как зависимостью температуры наконечника свечи от расхода воздуха, так и ограниченной скоростью распространения пламени.

Для решения проблемы холодного пуска дизельных двигателей большой мощности требуется разработать эффективную технологию пуска, сохраняющую преимущества технологии пуска свечами накаливания.

## Список литературы

1. Cold start aids for commercial vehicles / Technical information No 01. / BorgWarner BERU Systems GmbH / [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [www.beru.com](http://www.beru.com).
2. Thesis of the degree of Doctor of Philosophy. David James MacMillan Influences on the Cold Start Behaviour of a Diesel Engine at Reduced Compression Ratio / University of Nottingham, May 2009. – 243 p.

3. [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Свеча\\_накаливания](https://ru.wikipedia.org/wiki/Свеча_накаливания).
4. Свечи для дизеля [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://recnews.ru/zapchasti/svechidlya-dizelya/>.
5. Influence of modern diesel cold start systems on the cold start, warm-up and emissions of diesel engines / Bernd Last, Hans Houben, Marc Rottner, Ingo Stotz. – BERU AG, Mörikestrasse 155, 71636 Ludwigsburg, Germany, 2008. – 24p.
6. Subbarao P. M. V. Analysis of Fuel Injection & Related Processes in Diesel Engines [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://slideplayer.com/slide/4888922/>.
7. All about glow plugs / Technical Information No. 04// [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: [www.beru.com](http://www.beru.com).
8. Справочник по горюче-смазочным материалам в судовой технике / Е.И. Гулин, Д.П. Якубо, В.А. Сомов, И.М. Чечот. – Л.: Судостроение, 1981. — 320 с.
9. Cyril Crua. Combustion Processes in a Diesel Engine/ thesis Doctor of Philosophy - School of Engineering, University of Brighton. - December 2002. – 271 p.
10. Овечкин Б.Б. Основы теплотехники. Перенос энергии и массы: учебное пособие / Б.Б. Овечкин. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 106 с.
11. Коноплев В.Н. Улучшение показателей рабочего процесса в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием путем объемного воспламенения и сгорания / В.Н. Коноплев, И.В. Кузнецов, А.А. Коношин // Материалы 77-й международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров» . - 27-28 марта 2012г, - Москва, МГТУ «МАМИ». – С.135-141.
12. Шайкин А.П. Характеристики распространения пламени у свечи зажигания и в наиболее удаленной от неё зоне в газовом ДВС / А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев // Вектор науки ТГУ. – 2012. – № 4 (22). – С. 209-212.

Поступила в редколлегию 1.04.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. Б.Т. Кононов, Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков.

## МЕХАНІЗМИ ВПЛИВУ СВІЧОК РОЗЖАРЮВАННЯ НА РОБОЧИЙ ПРОЦЕС В ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНАХ

К.В. Коритченко, О.В. Стаховський, О.В. Серпухов, Д.В. Бізонич, Sanchit Ajmani

У роботі розглянуті переваги і недоліки використання свічок розжарювання в дизельних двигунах. Проведений аналіз причин виникнення проблеми холодного пуску двигунів. Зроблена оцінка механізмів впливу свічок розжарювання на робочий процес в дизельних двигунах.

**Ключові слова:** свічки розжарювання, двигун, холодний пуск.

## MECHANISMS OF INFLUENCE OF CANDLES OF INCANDESCENCE ON WORKING PROCESS IN DIESEL ENGINES

K.V. Korytchenko, O.V. Stakhovskiy, A.V. Serpukhov, D.V. Bizonych, Sanchit Ajmani

Advantages and lacks of the use of candles of incandescence are in-process considered in diesel engines. The analysis of reasons of origin of problem of the cold starting of engines is conducted. The estimation of mechanisms of influence of candles of incandescence is done on a working process in diesel engines.

**Keywords:** candles of incandescence, engine, cold starting.