УДК 621.43.01

# ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С НЕТРАДИЦИОННЫМ РАБОЧИМ ЦИКЛОМ

**Бердников А.А., Нагайцев Д.С., Титков Н.В.**

*ФГКВОУ ВО «Пермский военный институт войск национальной гвардии Российской Федерации», Пермь, e-mail: aa-berdnikov@mail.ru*

Двигатель внутреннего сгорания как тепловая машина, преобразующая теплоту в механическую работу, имеет невысокий коэффициент полезного действия. На сегодняшний день традиционно в двигателях внутреннего сгорания рабочий цикл реализуется по четырех- или двухтактной схеме, совершенствование его в последнее время становится все менее эффективным, поэтому могут быть востребованы нетрадиционные рабочие циклы. Анализ нетрадиционных циклов показывает, что двигатели с добавленными тактами имеют перспективу за счет утилизации теплоты отведенной от нагретых деталей цилиндропоршневой группы, а также за счет продолженного расширения рабочего тела. Поэтому в статье предлагается рассмотреть нетрадиционный семитактный рабочий цикл и конструкцию двигателя внутреннего сгорания с впрыском воды. Предложенный семитактный рабочий цикл с возможностью реализации в серийных двигателях без существенных конструктивных изменений может быть успешно реализован в двигателях нового поколения.

**Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, рабочий цикл, семитактный, впрыск воды, теплота**

# INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH A DUTY CYCLE OF UNCONVENTIONAL

**Berdnikov A.A., Nagaytsev D.S., Titkov N.V.**

*Federal state official military establishment of higher education «Perm military Institute of National Guard Troops of the Russian Federation», Perm, e-mail: aa-berdnikov@mail.ru*

The internal combustion engine as a heat engine that converts heat into mechanical work, has a low efficiency. To date, traditional internal combustion engines operating cycle is implemented by four or push-pull circuit, the improvement of which in recent years has become less effective, so non-traditional working cycles can be claimed. Analysis of unconventional cycles shows that the engines added-governmental-stroke have prospects by utilizing heat taken away from the heated parts tsilind-roporshnevoy group, as well as through continued expansion of the working fluid. Therefore, this article pre- invited to consider unconventional semitaktny duty cycle and engine design internal-combustion him with water injection. Proposed semitaktny working cycle with the possibility of implementation in production engines without significant design changes can be successfully implemented in the new generation of engines.

**Keywords: internal combustion engine, operating cycle, semitaktny, water injection, heat**

Двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – это тепловая машина, преобразующая теплоту, выделенную при сгорании топлива, в механическую работу. Термодинамический цикл поршневого ДВС представляет собой последовательно повторяющиеся процессы. Основными циклами ДВС являются: цикл Отто, цикл Дизеля и цикл Сабатэ – Тринклера [3]. Такие циклы на сегодняшний день называют традиционными, они включают процессы: впуск свежего заряда; сжатие; сгорание и расширение; выпуск. В четырехтактном ДВС все эти процессы разделены по тактам: первый – впуск, второй – сжатие, третий – рабочий ход, четвертый – выпуск. В двухтактном ДВС процессы объединены в одном такте: первый – впуск и сжатие, второй – рабочий ход и выпуск.

Как известно, традиционные циклы имеют невысокий коэффициент полезного действия (КПД), так как введенная с топливом в двигатель теплота теряется на нагрев деталей и отвод охлаждающей жидкостью системы охлаждения, выпускными газами, маслом смазочной системы, теряется из-за неполноты сгорания топлива. Эти потери могут составлять от 52 до 78 % [1]. Поэтому для повышения топливной экономичности и КПД ДВС необходимо рассматривать нетрадиционные циклы, позволяющие дополнительно использовать теплоту, отданную в систему охлаждения и с отработавшими газами, обеспечивающие полное и качественное сгорание топлива.

Двигатели с нетрадиционными рабочими циклами подробно рассмотрены в работе [4], где рассмотрены основные направления и методы модифицирования рабочего процесса ДВС. Оценка эффективности протекания рабочего процесса в ДВС предложена в работе [5] и предусматривает отношение длительности одного рабочего цикла, выраженного в углах поворота коленчатого вала (ПКВ), к длительности всех

рабочих ходов в одном рабочем цикле, выраженных в углах ПКВ:

$$k = \frac{T}{T_p}, \qquad (*)$$

где $T$ – длительность одного рабочего цикла, выраженного в углах поворота коленчатого вала;

$T_p$ – длительность всех рабочих ходов в одном рабочем цикле, выраженных в углах поворота коленчатого вала.

Формула (*) показывает, что чем ниже критерий $k$, тем выше эффективность протекания рабочего процесса в ДВС.

Анализ нетрадиционных циклов с точки зрения повышения КПД ДВС показывает, что наиболее перспективным будет цикл с добавленными тактами. Например, двигатель Крауэра [2]. Первые три такта: впуск, сжатие, расширение (рабочий ход) в этом двигателе протекают как в традиционном цикле, но на четвертом такте газы не выводятся из цилиндра, а вновь сжимаются и в конце сжатия в цилиндр подводится водяной пар, который, расширяясь на пятом такте, совершает полезную работу. Отработавшие газы и пар выводятся из цилиндра на шестом такте. Таким образом, в соответствии с формулой (*) критерий эффективности данного двигателя составит 3, тогда как для традиционного четырехтактного ДВС он равен 4.

Двигатели с добавленными тактами имеют перспективу лучшей экономичности за счет утилизации теплоты отведенной от нагретых деталей цилиндропоршневой группы, а также за счет продолженного расширения рабочего тела.

В качестве примера ДВС с продолженным расширением рабочего тела можно привести пятитактный двигатель [4, 5], имеющий три цилиндра: два крайних цилиндра работают по классической четырехтактной схеме, а третий – средний – используется для продолженного расширения газов, поочередно поступающих из двух крайних цилиндров. Как только поршень в одном из крайних цилиндров достигает нижней мертвой точки в конце такта рабочего хода, выпускной клапан открывается, и отработавшие газы вытесняются поршнем в средний цилиндр, толкая его вниз и создавая дополнительный пятый такт. Таким образом, за 720° ПКВ в трех цилиндрах реализуется два рабочих цикла и в каждом из них совершается два рабочих хода (табл. 1). Критерий эффективности данного двигателя выше традиционного четырехтактного ДВС и составляет 2.

С точки зрения утилизации энергии выхлопных газов и теплоты, отводимой стенками цилиндропоршневой группы, предлагается конструкция ДВС с реализацией рабочего цикла по семитактной схеме.

Конструкция включает основной цилиндр 3 (рис. 1), в котором реализуется традиционный четырехтактный цикл и дополнительный цилиндр 12, в котором реализуются два рабочих хода: один за счет вытеснения газов из основного цилиндра, второй за счет пара впрыснутой воды. Весь рабочий цикл такого двигателя протекает за семь тактов (табл. 2).

**Таблица 1**

Процессы, протекающие в цилиндрах пятитактного ДВС

| Угол поворота коленчатого вала | 1 цилиндр | 2 цилиндр (средний) | 3 цилиндр |
|---|---|---|---|
| 0–180° | Впуск – первый такт | Выпуск – пятый такт | ***Рабочий ход*** – третий такт |
| 180–360° | Сжатие – второй такт | ***Рабочий ход (вытеснение)*** – четвертый такт | |
| 360–540° | ***Рабочий ход*** – третий такт | Выпуск – пятый такт | Впуск – первый такт |
| 540–720° | ***Рабочий ход (вытеснение)*** – четвертый такт | | Сжатие – второй такт |

**Таблица 2**

Процессы, протекающие в цилиндрах ДВС с впрыском воды

| Угол поворота коленчатого вала | Основной цилиндр | Дополнительный цилиндр |
|---|---|---|
| 0–180° | Впуск – первый такт | Сжатие – пятый такт |
| 180–360° | Сжатие – второй такт | ***Рабочий ход*** (расширение пара) – шестой такт |
| 360–540° | ***Рабочий ход*** (расширение газов) – третий такт | Выпуск – седьмой такт |
| 540–720° | ***Рабочий ход (вытеснение)*** – четвертый такт | |

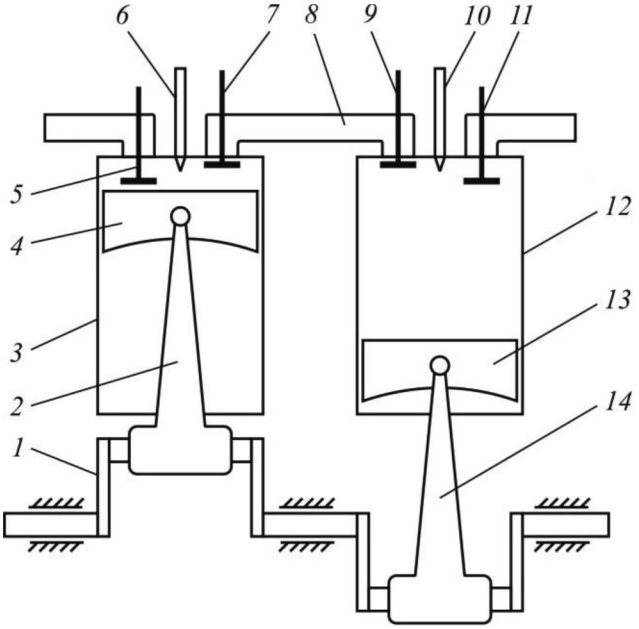


*Рис. 1. Двигатель внутреннего сгорания с впрыском воды: 1 – коленчатый вал; 2, 14 – шатуны; 3 – основной цилиндр; 4, 13 – поршни; 5, 9 – впускные клапаны; 6 – форсунка подачи топлива; 7, 11 – выпускные клапаны; 8 – перепускной газоход; 10 – форсунка впрыска воды; 12 – дополнительный цилиндр*

Работа двигателя показана на рис. 2. В основном цилиндре рабочий цикл протекает как в традиционном четырехтактном ДВС, только на четвертом такте отработавшие газы не отводятся из цилиндра, а направляются в дополнительный цилиндр – происходит продолженное расширение газов (рабочий ход). На пятом такте отработавшие газы сжимаются в дополнительном цилиндре, и в конце сжатия подается вода. Отбирая теплоту от нагретых деталей цилиндропоршневой группы и сжатых газов, вода испаряется, и расширяющийся пар совершает полезную работу (шестой такт – рабочий ход). На седьмом такте поршень перемещается к верхней мертвой точке, вытесняя пар с отработавшими газами.

В результате рабочий цикл протекает за семь тактов, но так как основной и дополнительный цилиндры работают параллельно, то весь цикл будет протекать за два оборота коленчатого вала, то есть 720° ПКВ, а критерий эффективности протекания рабочего процесса составит 1,33.

Подобную конструкцию можно реализовать в четырехцилиндровом рядном двигателе. Рассмотрим возможность реализации семитактного рабочего цикла на примере четырехцилиндрового ДВС с традиционным порядком работы цилиндров 1-3-4-2. В данном двигателе очередность тактности, то есть чередование тактов в порядке работы цилиндров, равна 180°. Поршни первого и четвертого, второго и третьего цилиндров попарно параллельно перемещаются от одной мертвой точки к другой, но в каждом из них осуществляются разные такты. В табл. 3 представлены процессы, протекающие в цилиндрах ДВС с порядком работы 1-3-4-2. Стрелками показано направление движения поршня.

Из табл. 3 видно, что если объединить первый и второй, четвертый и третий цилиндры, то получим два блока цилиндров с возможностью реализации рабочего цикла по семитактной схеме, представленной в табл. 2. При этом первый и четвертый цилиндры будут являться основными, а второй и третий – дополнительными в своих группах (табл. 4). Очередность тактности составит 360°. В основных цилиндрах (первый и четвертый) рабочий цикл осуществляется по классической четырехтактной схеме, а в дополнительных цилиндрах (втором и третьем) совершается два рабочих хода: на четвертом такте – вытеснением отработавших газов из основного цилиндра и на шестом такте – расширением пара испаряющейся воды. Таким образом, основным конструктивным изменением двигателя-прототипа будет головка блока цилиндров.

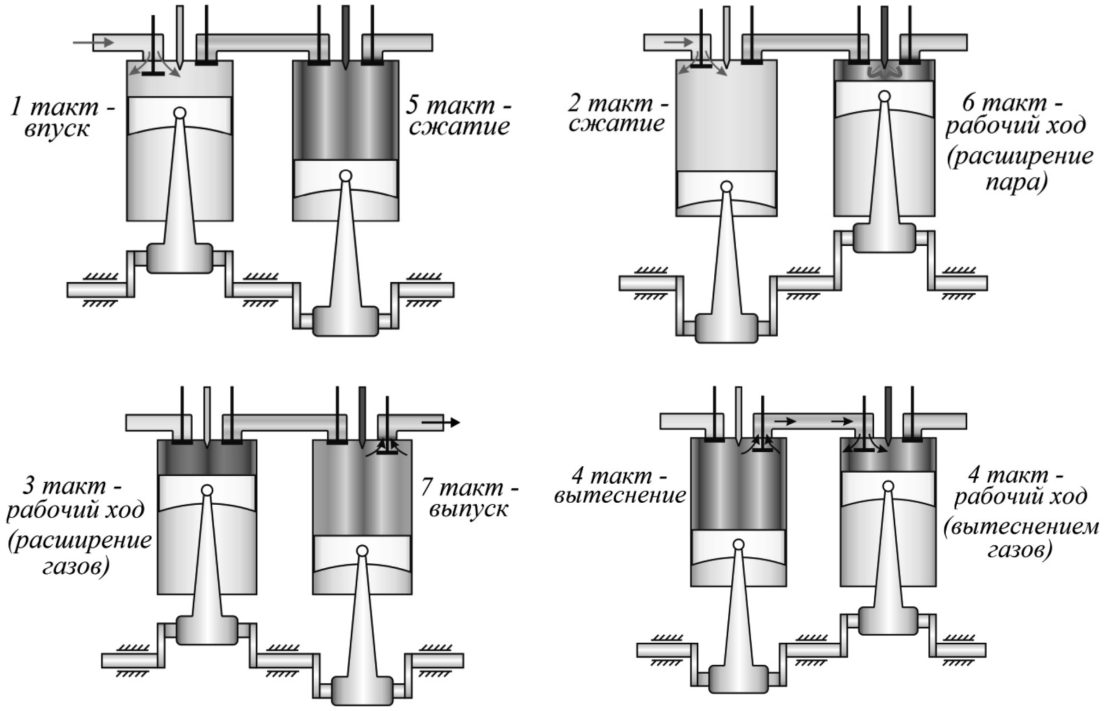


*Рис. 2. Работа двигателя с впрыском воды*

**Таблица 3**

Процессы, протекающие в цилиндрах четырехтактного рядного двигателя с порядком работы 1-3-4-2

| Угол поворота коленчатого вала | Цилиндры | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | | 2 | | 3 | | 4 | |
| | Такты | | | | | | | |
| 0–180° | 1 Впуск | ↓ | 2 Сжатие | ↑ | 4 Выпуск | ↑ | 3 Рабочий ход | ↓ |
| 180–360° | 2 Сжатие | ↑ | 3 Рабочий ход | ↓ | 1 Впуск | ↓ | 4 Выпуск | ↑ |
| 360–540° | 3 Рабочий ход | ↓ | 4 Выпуск | ↑ | 2 Сжатие | ↑ | 1 Впуск | ↓ |
| 540–720° | 4 Выпуск | ↑ | 1 Впуск | ↓ | 3 Рабочий ход | ↓ | 2 Сжатие | ↑ |

**Таблица 4**

Процессы ДВС с семитактным рабочим циклом

| Угол поворота коленчатого вала | Цилиндры | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 (основной) | 2 (дополнительный) | 3 (дополнительный) | 4 (основной) |
| | Такты | | | |
| 0–180° | 1 Впуск | 5 Сжатие | 7 Выпуск | 3 Рабочий ход |
| 180–360° | 2 Сжатие | 6 Рабочий ход | 4 Рабочий ход вытеснением | |
| 360–540° | 3 Рабочий ход | 7 Выпуск | 5 Сжатие | 1 Впуск |
| 540–720° | 4 Рабочий ход вытеснением | | 6 Рабочий ход | 2 Сжатие |

В головке блока цилиндров необходимо изменить конфигурацию каналов подачи свежего заряда в цилиндры двигателя и отвода из них отработавших газов так, чтобы на четвертом такте первого и четвертого цилиндров газы отводились соответственно во второй и третий цилиндры на такте впуска (см. табл. 3). Причем есть конструктивная

возможность установки клапанов в газоходах головки цилиндров с целью перевода двигателя на работу, как по четырехтактной, так и по семитактной схеме, например, при отсутствии воды. Также в головке блока выполняются места установки форсунок подвода воды, либо устанавливаются форсунки вместо штатных.

Необходимо отметить, что фазы газораспределения двигателя-прототипа не нарушаются, следовательно, газораспределительный механизм конструктивным изменениям не подлежит. Однако предварительные расчеты показывают, что возможны изменения фазы рабочего хода на четвертом такте и фаз газораспределения дополнительных цилиндров. Эти фазы можно скорректировать путем изменения формы кулачков штатных распределительных валов двигателя-прототипа.

Предварительный тепловой расчет показывает, что максимальное давление расширения пара в дополнительном цилиндре модернизированного ДВС может достигать более 20 МПа, это связано с высоким давлением в конце сжатия в дополнительном цилиндре и влечет за собой существенную нагрузку на детали двигателя. Понизить давление в конце сжатия, а следовательно, механические потери на сжатие можно путем понижения степени сжатия в дополнительном цилиндре. Конструктивно этого можно достичь путем увеличения камеры сгорания, изменением конструкции поршня либо укорачиванием шатуна. Следует отметить, что тепловая напряженность в дополнительном цилиндре меньше, так как вводимая в цилиндр вода понижает температуру цикла, следовательно, больше возможностей по конструктивному изменению деталей цилиндропоршневой группы.

Предложенный семитактный рабочий цикл с возможностью реализации в серийных двигателях без существенных конструктивных изменений может быть успешно реализован в двигателях нового поколения. Применение указанного технического решения позволит максимально повысить КПД двигателя. Однако основными недостатками таких ДВС остаются такие, как замерзание воды в холодное время, подвод и осуществление смазки устройств впрыска воды в цилиндры, коррозии деталей. Но современные технологии позволяют эти недостатки исключить или их минимизировать.

## Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: Учебник для втузов по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» [Текст] / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

2. Санников В. Паровой фантом топлива: 6-тактный двигатель Кроуэра / Журнал Популярная механика [Электронный ресурс] // URL: http://www.popmech.ru/technologies/7664-parovoy-fantom-topliva-6-taktnyy-dvigatel-krouera/#full (дата обращения 29.12.2016 г.).

3. Теплотехника: Учебник для вузов [Текст] / В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер, С.Г. Нечаев, И.Е. Иванов, Л.М. Матюхин, К.А. Морозов; Под ред. В.Н. Луканина. – 4-е изд., испр. – М.: Высш. Шк., 2003. – 671 с.

4. Тер-Мкртичьян, Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными рабочими циклами: учеб. пособие [Текст] / Г.Г. Тер-Мкртичьян. – М.: МАДИ, 2015. – 80 с.

5. Тимченко П.В., Бердников А.А. Зависимость мощности двигателя от его тактности [Текст] / Актуальные вопросы совершенствования военной и специальной техники: Сборник научных материалов. Посвящен 105 годовщине со дня образования автомобильных войск России. // Под общ. ред. Е.В. Свиридова. – Пермь: ПВИ ВВ МВД России, 2015. – С. 48–52.

## References

1. Dvigateli vnutrennego sgoranija. Teorija porshnevyh i kombinirovannyh dvigatelej: Uchebnik dlja vtuzov po specialnosti «Dvigateli vnutrennego sgoranija» [Tekst] / D.N. Vyrubov, N.A. Ivashhenko, V.I. Ivin i dr.; Pod red. A.S. Orlina, M.G. Kruglova. 4-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1983. 372 p.

2. Sannikov V. Parovoj fantom topliva: 6-taktnyj dvigatel Kroujera / Zhurnal Popu-ljarnaja mehanika [Jelektronnyj resurs] // URL: http://www.popmech.ru/technologies/7664-parovoy-fantom-topliva-6-taktnyy-dvigatel-krouera/#full (data obrashhenija 29.12.2016 g.).

3. Teplotehnika: Uchebnik dlja vuzov [Tekst] / V.N. Lukanin, M.G. Shatrov, G.M. Kamfer, S.G. Nechaev, I.E. Ivanov, L.M. Matjuhin, K.A. Morozov; Pod red. V.N. Lukanina. 4-e izd., ispr. M.: Vyssh. Shk., 2003. 671 p.

4. Ter-Mkrtichjan, G.G. Dvigateli vnutrennego sgoranija s netradicionnymi rabochimi ciklami: ucheb. posobie [Tekst] / G.G. Ter-Mkrtichjan. M.: MADI, 2015. 80 p.

5. Timchenko P.V., Berdnikov A.A. Zavisimost moshhnosti dvigatelja ot ego taktno-sti [Tekst] / Aktualnye voprosy sovershenstvovanija voennoj i specialnoj tehniki: Sbornik nauchnyh materialov. Posvjashhen 105 godovshhine so dnja obrazovanija avtomobilnyh vojsk Rossii. // Pod obshh. red. E.V. Sviridova. Perm: PVI VV MVD Rossii, 2015. pp. 48–52.