

# ДВИГАТЕЛЕ СТРОЕНИЕ

№ 2 (260)  
апрель–июнь 2015

Санкт-Петербург

## РАСЧЕТЫ. КОНСТРУИРОВАНИЕ. ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Тер-Мкртчян Г.Г.*  
Двигатели с продолженным расширением  
рабочего тела

*Дмитриевский Е.В.*  
Распределение давления газов в межкольцевых  
пространствах поршня малооборотного  
двухтактного двигателя

## ИПИ-ТЕХНОЛОГИИ

*Бирюк В.В., Каюков С.С., Белоусов А.В., Галлямов Р.Э.*  
Методика прогнозирования качества распыливания  
топлива форсункой на основе CALS/ИПИ технологий

## СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЕЙ. АГРЕГАТЫ

*Равич А.Ф., Богданов С.Н.*  
Автоэквилибистантное роторно-поршневое  
устройство

*Лысунец А.В., Медведев В.В.*  
Моделирование скоростных характеристик ДВС  
для разработки автоматических систем управления  
с обратной связью

## ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Смолинский С.Н., Булат Р.Е., Сайданов В.О.*  
Концепция децентрализованного энергоснабжения  
объектов МО РФ и проблемы подготовки военных  
инженеров-энергетиков

## ГИПОТЕЗЫ И ДИСКУССИИ

*Ерофеев В.Л., Ганин Н.Б., Пряхин А.С.*  
Пределы повышения энергетической эффективности  
топливоиспользования поршневого ДВС

## НОВОСТИ ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ

Двухтопливные двигатели  
(материалы конгресса CIMAC 2013)

Новости Группы «Синара»

Новости «Пензадизельмаш»

## ИНФОРМАЦИЯ

Рефераты статей

## ANALYSES, DEVELOPMENT AND CONSTRUCTION OF ENGINES

**3** *Ter-Mkrtychyan G.G.*  
Engines Featuring Extended Expansion Phase

**10** *Dmitrievsky E.V.*  
Gas Pressure Distribution Within Inter-Ring Space of  
Low-Speed Two-Stroke Engine Piston

## CALS TECHNOLOGIES

**15** *Biryuk V.V., Kayukov S.S., Belousov A.V., Gallyamov R.E.*  
CALS-Based Technologies as a Method to Predict  
of Diesel Fuel Atomization Quality

## ENGINE SYSTEMS AND UNITS

**20** *Ravich A.F., Bogdanov S.N.*  
Autoequidistant Rotary Machine

**25** *Lysunets A.V., Medvedev V.V.*  
Modelling of Engine Velocity Characteristics for  
Closed-Loop Speed Control System

## MAINTENANCE AND REPAIR ISSUES

**28** *Smolinsky S.N., Bulat R.E., Saidanov V.O.*  
Distributed Power Supply Concept for RF Defence  
Ministry Facilities, and Issues of Military  
Electric Engineers Education

## HYPOTHESES AND DISCUSSIONS

**33** *Yerofeyev V.L., Ganin N.B., Pryakhin A.S.*  
Fuel Efficiency Enhancement Resources

## ENGINE BUILDING NEWS

**39** Dual-fuel engines  
(based on review of CIMAC-2013 papers)

**14** News from «Sinara» Group

**19** News from «Penzadieselmash»

## INFORMATION

**58** Synopsis

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Л.А. Новиков, главный редактор

## ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. Шелеметьев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
В.А. Рыжов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО «Коломенский завод», г. Коломна</i>
Е.С. Васюков	<i>техн. директор</i>	<i>ЗАО УК БМЗ, г. Брянск</i>
А.К. Лимонов	<i>гл. конструктор</i>	<i>ОАО РУМО, Н. Новгород</i>
М.В. Бояркин	<i>гл. спец. по развитию</i>	<i>ОАО ХК «Барнаултрансмаш», г. Барнаул</i>
В.М. Гребнев	<i>техн. директор</i>	<i>ОАО «Волжский дизель им. Маминых», г. Балаково</i>
Р.Х. Хафизов	<i>зам. гл. констр. по двиг.</i>	<i>ОАО КамАЗ, г. Набережные Челны</i>
А.А. Матюшин	<i>генеральный директор</i>	<i>ОАО ЗМЗ, г. Заволжье</i>
В.И. Федышин	<i>директор</i>	<i>МАН Ферросталь, Санкт-Петербургский филиал</i>
В.В. Коновалов	<i>1-й зам. ген.директора</i>	<i>ОАО «Звезда», Санкт-Петербург</i>
А.П. Маслов	<i>вед. инж.-конструктор</i>	<i>ООО ГСКБ «Трансдизель», г. Челябинск</i>
А.С. Калюнов	<i>начальник ИКЦ</i>	<i>ООО НЗТА, г. Ногинск</i>

## НИИ

В.С. Папонов	<i>ген. директор</i>	<i>ОАО НИКТИД, г. Владимир</i>
Д.П. Ильющенко-Крылов	<i>гл. инженер</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.А. Сорокин	<i>зав. отделом</i>	<i>ЗАО ЦНИИМФ, Санкт-Петербург</i>
В.И. Ерофеев	<i>нач. отдела</i>	<i>1 ЦНИИ МО РФ, Санкт-Петербург</i>
В.В. Альт	<i>директор</i>	<i>ГНУ СибФТИ, г. Новосибирск</i>
Ю.А. Микутенок	<i>президент</i>	<i>ООО НПХЦ «Миакрон-Нортон»</i>
Б.А. Зеленев	<i>директор</i>	<i>НТЦ ПМТ ФГУП ЦНИИМ, Санкт-Петербург</i>
А.М. Махмудов	<i>с.н.с.</i>	<i>ФГУП «Крыловский ГНЦ», Санкт-Петербург</i>

## ВУЗЫ

Ю.В. Галышев	<i>зав. кафедрой ДВС</i>	<i>СПбГПУ, Санкт-Петербург</i>
Н.Д. Чайнов	<i>проф. кафедры Э-2</i>	<i>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва</i>
О.К. Безюков	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.А. Иванченко	<i>зав. кафедрой СЭУ</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
Л.В. Тузов	<i>проф. кафедры ТК СДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
А.С. Пунда	<i>проф. кафедры ДВС</i>	<i>ГУМРФ им. С.О. Макарова, Санкт-Петербург</i>
В.К. Румб	<i>проф. кафедры ДВС и АСЭУ</i>	<i>ГМТУ, Санкт-Петербург</i>
А.В. Смирнов	<i>нач. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
В.О. Сайданов	<i>проф. кафедры Д и ТУ</i>	<i>ФГОУ ВПО ВИ(ИТ), Санкт-Петербург</i>
А.А. Обозов	<i>профессор кафедры ТД</i>	<i>ФГБОУ ВПО БГТУ, г. Брянск</i>
А.В. Разуваев	<i>профессор кафедры ТАМ</i>	<i>БИТТУ фил. ГОУ ВПО СГТУ г. Балаково</i>

Издатель журнала — ООО «ЦНИДИ-Экосервис», Санкт-Петербург.

Журнал издается при поддержке ФГОУ ВПО «Военный институт (инженерно-технический)» ВИ(ИТ), филиал «Военной академии материально-технического обеспечения», Санкт-Петербург.

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата технических наук ([www.vak.ed.gov.ru](http://www.vak.ed.gov.ru)).

Электронные версии журнала (2005–2015 гг.) размещены на сайте «Научная электронная библиотека» ([www.elibrary.ru](http://www.elibrary.ru)) и включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Выпускающий редактор Н.А. Вольская  
Редактор инф. отдела Г.В. Мельник  
Ст. редактор О.Д. Камнева  
Верстка — А.В. Вольский

Сдано в набор 03.06.2015  
Подписано в печать 20.06.15  
Формат бумаги 60 × 90 1/8

Бумага типографская.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 7  
Зак. 187. Тираж 700 экз.  
Цена договорная

Почтовый адрес редакции журнала:  
ООО «ЦНИДИ-Экосервис», 191123, Санкт-Петербург, а/я 65

Тел.: +7 (921) 956-31-94

E-mail: [ecology@rdiesel.ru](mailto:ecology@rdiesel.ru)  
[www.rdiesel.ru](http://www.rdiesel.ru)

**ДВИГАТЕЛЕ  
СТРОЕНИЕ**

Типография «СВЕТЛИЦА»  
Лиц. ПД № 2-69-618, 196158,  
Санкт-Петербург, Московское шоссе, 25, 215

© Журнал «Двигателестроение». 2015. № 2 (260)

## ДВИГАТЕЛИ С ПРОДОЛЖЕННЫМ РАСШИРЕНИЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Г.Г. Тер-Мкртчян, д.т.н., профессор  
ГНЦ РФ ФГУП НАМИ

Дан анализ возможности повышения топливной экономичности двигателя за счет организации продолженного расширения рабочего тела. Кратко рассмотрены особенности циклов Аткинсона и Миллера. Описан траверсный преобразующий механизм НАМИ, позволяющий управлять движением поршней и обеспечивать продолженное расширение. На примере двигателя ВАЗ рассмотрена возможность реализации продолженного расширения в эспандерных цилиндрах двигателя при увеличении среднего эффективного давления в рабочих цилиндрах.

В традиционных четырехтактных ДВС каждый такт рабочего цикла (впуск–сжатие–расширение–выпуск) имеет одинаковую продолжительность. При этом каждому такту соответствует ход поршня примерно одинаковой величины.

Однако еще в начальный период истории ДВС предпринимались попытки создания двигателей с неодинаковыми тактами. В первую очередь разработчиков интересовали конструкции, в которых можно было бы реализовать так называемое продолженное расширение, при котором величина хода расширения больше величины хода сжатия. Продолженное расширение позволяет ощутимо увеличить индикаторный КПД двигателя за счет более полного использования теплоты сгорания топлива.

Наиболее известный пример реализации идеи неравных тактов — цикл Аткинсона. В 1887 г. британский инженер Д. Аткинсон (J. Atkinson) предложил конструкцию двигателя (рис. 1), который отличался от обычного четырехтактного двигателя, работающего по циклу Отто. В двигателе Аткинсона была изменена конструкция кривошипно-шатунного механизма, и поэтому все четыре такта совершаются за один оборот коленчатого вала, а ход поршня во время впуска и выпуска больше, чем во время сжатия и расширения.

Идеи, заложенные в двигателе Аткинсона, в конце XX века были реализованы в двигателях с традиционным КШМ, имеющих регулируемые механизмы газораспределения. При этом обеспечивалось значительно более позднее закрытие впускных клапанов после НМТ, чем в двигателях

традиционного типа. Такой рабочий процесс известен как цикл Аткинсона.

В этом цикле реализуется продолженное расширение рабочего тела вследствие того, что реальная степень сжатия меньше геометрической и меньше как геометрической, так и реальной степени расширения.

Одной из первых цикл Аткинсона был реализован фирмой «Mazda» на автомобиле Xedos 9. Двигатель Mazda с рабочим объемом 2,3 л и геометрической степенью сжатия 10 имеет объемный нагнетатель Lysholm и развивает мощность до 155 кВт. В настоящее время цикл Аткинсона успешно применяется в двигателях комбинированных энергоустановок Toyota автомобилей Prius. Степень сжатия в этих двигателях равна 13,5.

Другим направлением развития идей Д. Аткинсона стали работы американского инженера

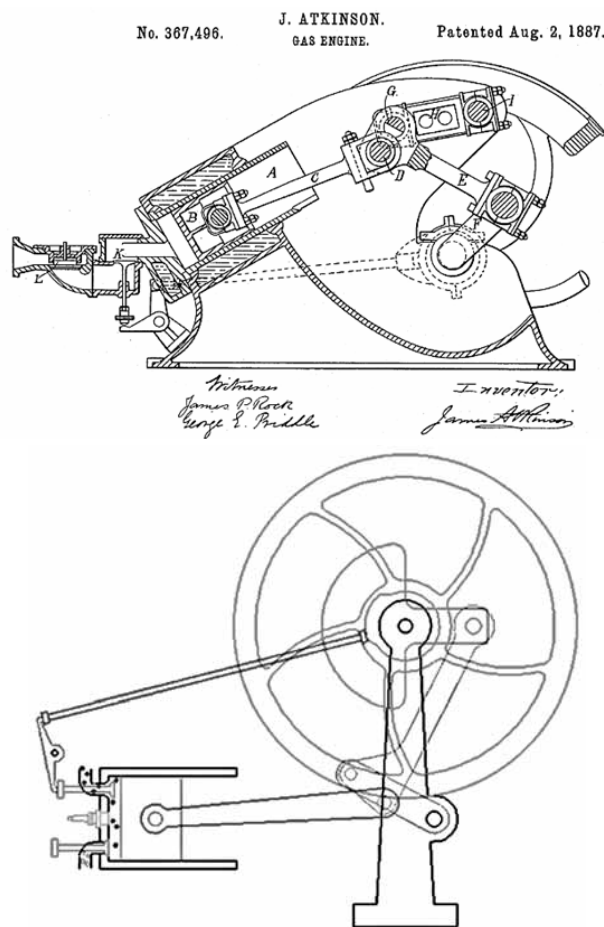


Рис. 1. Двигатель Аткинсона

Р. Миллера (R. Miller), который в 1947 г. в процессе экспериментов на судовом двигателе с впрыском природного газа, видоизменил цикл Аткинсона, закрывая впускные клапаны не позже, а раньше НМТ. Такой рабочий процесс известен как цикл Миллера. В нем при движении поршня к НМТ после закрытия впускных клапанов происходит внутреннее охлаждение рабочего тела, что снижает теплонапряженность деталей двигателя и благоприятно при использовании высокого наддува.

В конечном счете, и в цикле Аткинсона с «укороченным сжатием» и в цикле Миллера с «укороченным впуском» обеспечивается снижение

фактической степени сжатия и продолженное расширение.

В начале 90-х гг. XX века в ГНЦ ФГУП НАМИ был разработан преобразующий механизм, названный траверсным, позволяющий управлять движением поршней, изменяя степень сжатия и рабочий объем двигателя. Технические решения по траверсному механизму НАМИ защищены патентами разных стран [1].

Было изготовлено более десятка образцов траверсных двигателей с управляемым движением поршней на базе серийных моторов ВАЗ, ЯМЗ и Daimler Chrysler. Некоторые из них показаны на рисунках 2–4. Траверсные двигатели Т-01 и VE111 прошли испытания на безотказность в объеме 1500 часов.

Траверсный механизм НАМИ работает следующим образом (рис. 5). Ось коленчатого вала 1 смещена относительно оси цилиндров. Шатунная шейка 2 коленчатого вала связана с траверсой 3, имеющей еще два цилиндрических шарнира: один соединен с шатуном 4, а второй — с коромыслом 5. Верхний конец коромысла соединен с размещенным в корпусе дизеля эксцентриковым валом 6, а верхний конец шатуна 4 — с поршнем 7. При вращении коленчатого вала поршень совершает возвратно-поступательное движение, законом которого можно управлять посредством поворота эксцентрикового вала.

Траверсный преобразующий механизм первоначально был разработан для двигателей с регулируемой степенью сжатия и одинаковой продолжительностью тактов рабочего цикла. Работы, проводимые в последние годы, были направлены на создание двигателя с ходами поршня не одинаковой величины в течение цикла.

Используя многопараметровое оптимизационное моделирование, был разработан механизм двигателя с неравными тактами, обеспечивающий значительное превышение хода поршня на такте расширения, по сравнению с тактом сжатия [2]. Для этого потребовалось организовать синхронное вращение эксцентрикового вала с вдвое меньшей частотой по отношению к вращению коленчатого вала.

Продолженное расширение может быть организовано и в двигателях с традиционным кривошипно-шатунным механизмом. Первые попытки создания

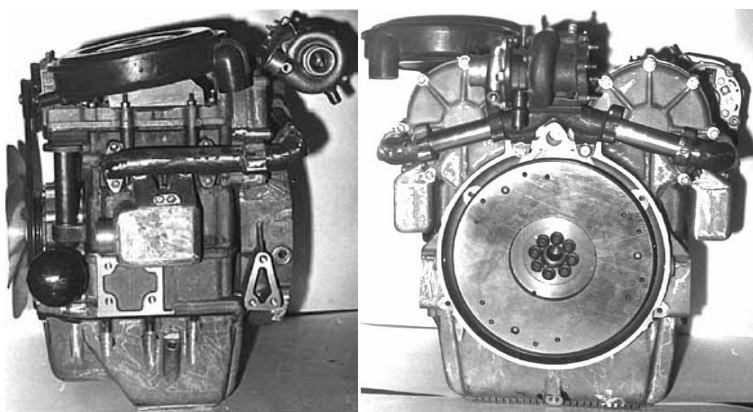


Рис. 2. Траверсный дизель ТБ-48 ( $iV_h = 1,9$  л) на базе двигателя Elko 3.82.92Т фирмы «Elsbett-Konstruktion» (Австрия)

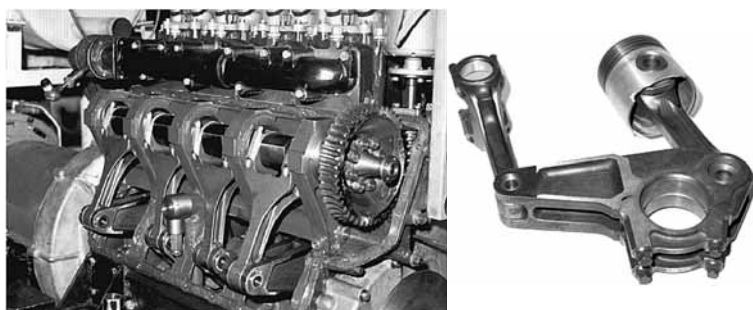


Рис. 3. Траверсный дизель Т-01 ( $iV_h = 9,1$  л) и его детали движения на базе двигателя ЯМЗ-8424

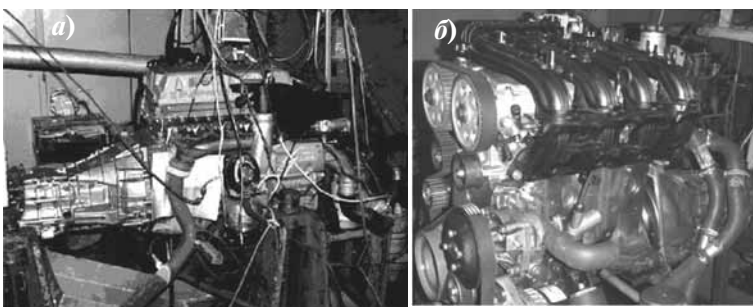
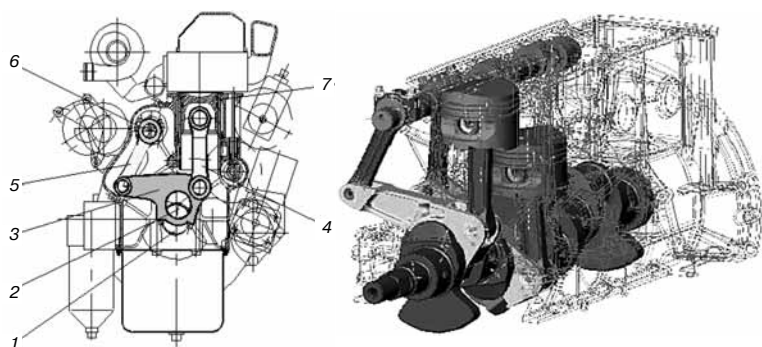


Рис. 4. Траверсные двигатели с искровым зажиганием: а — VE111 ( $iV_h = 2$  л) на базе двигателя M111 DaimlerChrysler; б — ВАЗ 11194VE ( $iV_h = 1,4$  л) на базе двигателя ВАЗ 11194



**Рис. 5. Траверсный механизм двигателей НАМИ:**

1 — коленчатый вал; 2 — шатунная шейка; 3 — траверса; 4 — шатун; 5 — коромысло; 6 — эксцентриковый вал; 7 — поршень

такого ДВС предпринимались Николаусом Отто и Рудольфом Дизелем на базе трехцилиндровых двигателей. В двух крайних рабочих цилиндрах осуществлялись четырехтактные циклы, а средний цилиндр большего диаметра использовался для дополнительного расширения продуктов сгорания, поступающих из крайних цилиндров [3].

Однако вследствие усложнения конструкции при относительно невысоком повышении КПД двигателя этого типа не нашли промышленного применения. Продолженное расширение продуктов сгорания было реализовано в турбинах газотурбинного наддува, ставших обязательным атрибутом современных двигателей, в первую очередь дизелей. Интерес к двигателю с продолженным расширением в турбопоршневом варианте возобновился в начале нынешнего столетия, что, в первую очередь, связано с появлением высокоэффективных управляемых турбокомпрессоров.

Английская компания «Ilmor Engineering», известная своими двигателями для гоночных автомобилей, создала двигатель с продолженным расширением, названный пятитактным. За основу конструкции двигателя были приняты технические решения бельгийского изобретателя Герхарда Шмитца (Gerhard Schmitz) [4]. Двигатель имеет разделенные такты рабочего цикла и обеспечивает продолженное расширение. Три цилиндра пятитактного ДВС имеют разный диаметр. Внешние цилиндры высокого давления (ВД) малого диаметра работают по обычному четырехтактному циклу. В среднем цилиндре низкого давления (НД) большого диаметра происходит продолженное расширение газов, которое разработчики и назвали пятым тактом (рис. 6).

Опытный образец двигателя рабочим объемом 700 см<sup>3</sup> (суммарный объем двух цилиндров высокого давления) имеет максимальные мощность и крутящий момент соответственно 96 кВт/7000 об/мин и

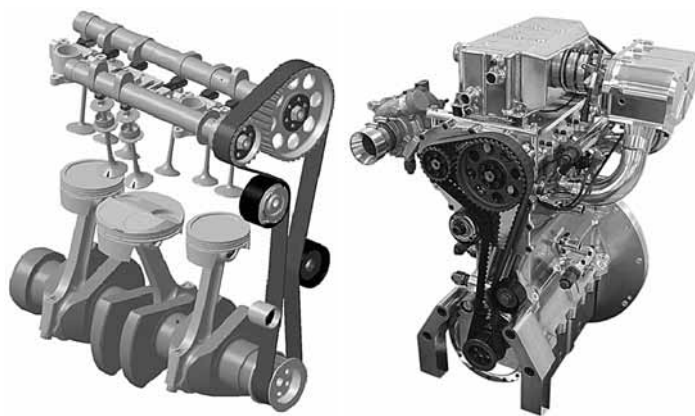
166 Нм/5000 об/мин. При этом минимальная величина удельного эффективного расхода топлива равна 226 г/кВт·ч, что значительно ниже, чем у лучших современных аналогов. Давление наддува составляет 0,5 МПа.

Двигатель имеет два распределительных вала. Первый вал, обслуживающий цилиндры высокого давления, совершает один оборот за два оборота коленчатого вала так, как это осуществляется в традиционных четырехтактных ДВС. Второй распределительный вал, обслуживающий цилиндр низкого давления, вращается с частотой, равной частоте вращения коленчатого вала.

Существенным недостатком концепции «Ilmor Engineering» является необходимость значительного изменения конструкции двигателей без унификации с серийными моделями и невозможность построения типоразмерных рядов моторов.

Продолженное расширение рабочего тела может быть организовано и в серийных двигателях традиционной конструкции с форсированием двигателя высоким наддувом при сокращении числа работающих цилиндров. При этом среднее эффективное давление и, следовательно, механический КПД на характерных режимах эксплуатации автомобиля могут быть существенно повышены с сохранением исходной номинальной мощности двигателя.

В выключенных цилиндрах прекращается осуществление традиционного рабочего процесса ДВС, и они переводятся в режим продолженного расширения (эспандерный режим). В современных комбинированных двигателях внутреннего сгорания продолженное расширение продуктов сгорания топлива обычно осуществляют в газовой турбине, мощность которой используют только для привода нагнетателя. Дополнительное расши-



**Рис. 6. Двигатель «Ilmor Engineering»**

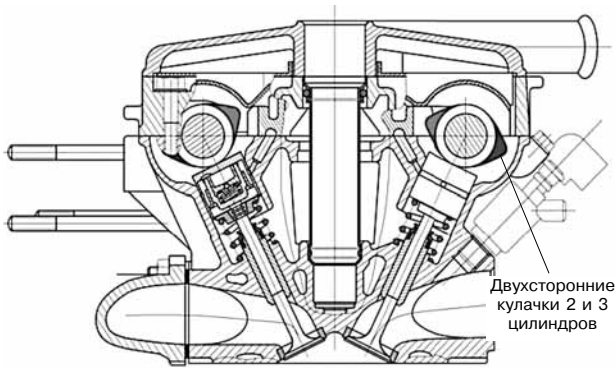


Рис. 7. Измененная головка цилиндров двигателя ВАЗ

рение продуктов сгорания в цилиндрах будет способствовать повышению эффективности утилизации энергии выпускных газов ДВС.

Рассмотрим реализацию рабочего цикла с разделенными тактами и продолженным расширением на примере двигателя ВАЗ 11194 с рабочим объемом 1,4 л, хотя этот цикл может быть реализован в любом четырехтактном четырехцилиндровом двигателе с порядком работы 1-3-4-2. При этом поставим задачу свести к минимуму конструктивные изменения деталей и узлов базового двигателя.

Два внешних (рабочих) цилиндра четырехцилиндрового двигателя работают по обычному четырехтактному циклу. В двух внутренних (эспандерных) цилиндрах происходит продолженное расширение газов, которое может быть названо пятым тактом. Таким образом, в эспандерных цилиндрах осуществляются только такты расширения и выпуска отработавших газов.

Двигатель имеет два распределительных вала. Оба вала обслуживают как внешние рабочие цилиндры, так и внутренние эспандерные цилиндры, совершая один оборот за два оборота коленчатого вала так, как это происходит в традиционных четырехтактных ДВС. Кулачки, обслуживающие эспандерные цилиндры, имеют двухсторонний профиль (рис. 7). Благодаря этому в эспандерных цилиндрах осуществляется двухтактный цикл расширения и выпуска.

Рабочий цикл двигателя состоит из четырех фаз (рис. 8).

**Фаза А.** Поршни в рабочих цилиндрах движутся от ВМТ к НМТ. Поршни в эспандерных цилиндрах движутся от НМТ к ВМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется выпуск свежего заряда, а во втором — сгорание (предварительное расширение). В эспандерных цилиндрах осуществляется выпуск газов.

**Фаза В.** Поршни в рабочих цилиндрах движутся от НМТ к ВМТ, в эспандерных цилиндрах — от ВМТ к НМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется сжатие свежего заряда, а во втором — вытеснение выпускных газов в эспандерные цилиндры. В эспандерных цилиндрах осуществляется процесс продолженного расширения выпускных газов из второго рабочего цилиндра.

**Фаза С.** Поршни в рабочих цилиндрах движутся от ВМТ к НМТ, в эспандерных цилиндрах — от НМТ к ВМТ. В первом рабочем цилиндре осуществляется сгорание (предварительное расширение), а во втором — впуск свежего заряда. В эспандерных цилиндрах осуществляется выпуск газов.

**Фаза D** аналогична Фазе В, в которой первый и второй цилиндры ВД меняются местами.

Последовательность тактов рабочего цикла дана в табл. 1. Таким образом, рабочий цикл двигателя с продолженным расширением осуществляется за два оборота коленчатого вала и состоит из двух групп процессов. Первая группа включает процессы впуска и предварительного расширения в первом или втором рабочих цилиндрах и выпуск газов из эспандерных цилиндров; вторая — процессы сжатия и вытеснения выпускных газов в первом или втором рабочих цилиндрах и дополнительное расширение выпускных газов в эспандерных цилиндрах.

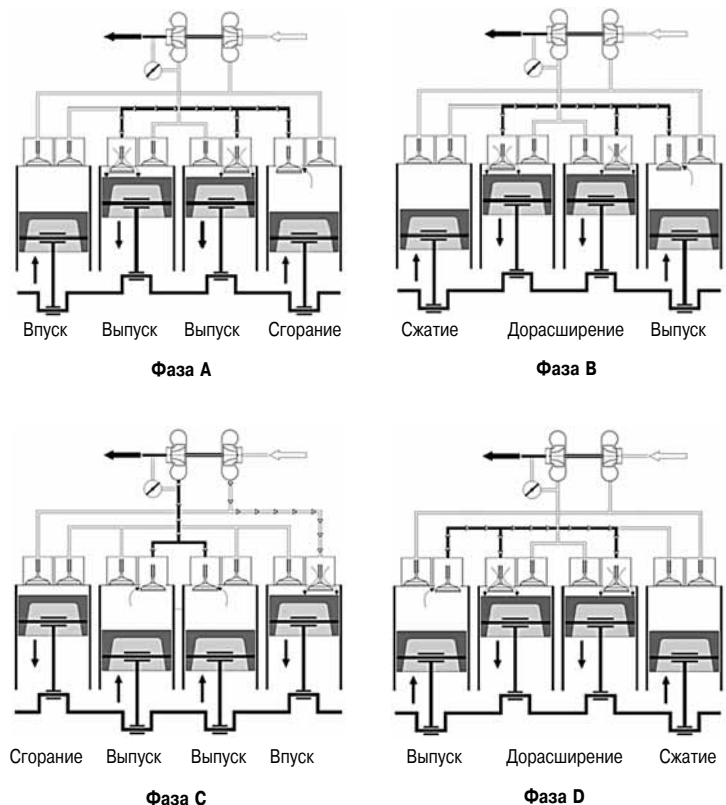


Рис. 8. Фазы рабочего цикла

Таблица 1

Последовательность тактов рабочего цикла двигателя с продолженным расширением

Фаза	Цилиндр			
	1	2	3	4
A	Впуск	Выпуск	Выпуск	Расширение
B	Сжатие	Расширение	Расширение	Вытеснение
C	Расширение	Выпуск	Выпуск	Впуск
D	Вытеснение	Расширение	Расширение	Сжатие

На рис. 9 показаны термодинамические циклы двигателя с продолженным расширением.

На высоких нагрузках (а) продолженное расширение осуществляется сначала в эспандерных цилиндрах, а затем — в турбине турбокомпрессора; на малых нагрузках (б) — только в эспандерных цилиндрах.

Для оценки влияния на топливную экономичность уменьшения рабочего объема двигателя и продолженного расширения были выполнены расчетные исследования рабочего процесса. Рассматривались следующие варианты двигателя:

➤ стандартный вариант, при котором четыре цилиндра работают без наддува;

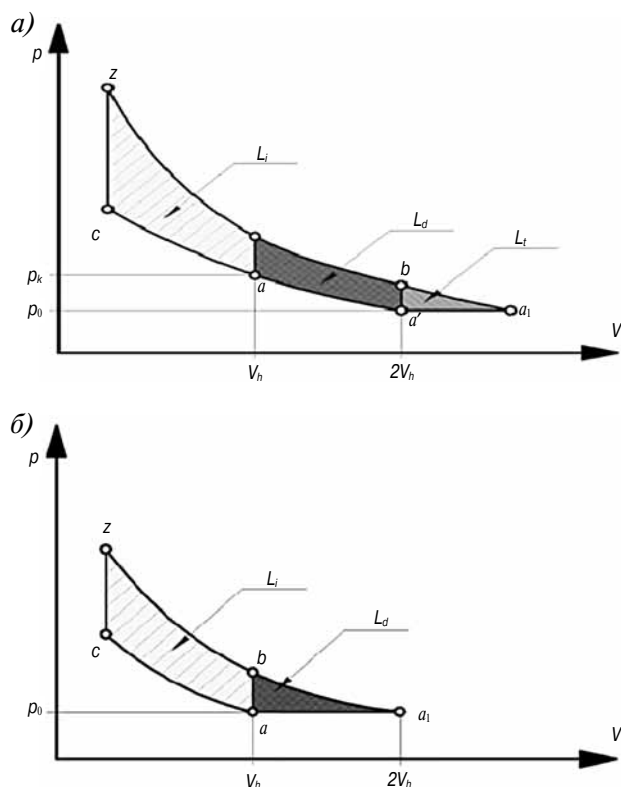


Рис. 9. Термодинамические циклы двигателя с продолженным расширением (а и б — высокие и низкие нагрузки):

$L_i$  — индикаторная работа двигателя;  $L_d$  — работа, произведенная в эспандерных цилиндрах;  $L_t$  — работа, произведенная в турбине турбокомпрессора

➤ одна пара цилиндров работает с наддувом, а в другой паре цилиндров удаляются клапаны с целью ликвидации насосных потерь;

➤ двигатель-эспандер (ДЭ), в котором одна пара цилиндров является рабочей, а в другой паре цилиндров — эспандерной осуществляется продолженное расширение.

Во всех вариантах обеспечивается приблизительно одинаковая мощность двигателя. В качестве ограничивающих факторов при форсировании двух цилиндров с помощью наддува были приняты: отсутствие детонации, максимальное давление сгорания не выше 5,5 МПа и максимальная температура газов на входе в турбину турбокомпрессора 1050 °С. Работоспособность двигателя ВАЗ 11194 с таким уровнем параметров была подтверждена в цикле испытаний в ГНЦ НАМИ [1]. В двух работающих цилиндрах, использующих наддув, степень сжатий стандартного двигателя 10,8 была уменьшена до 9,0. При этом был сохранен приемлемый уровень нагрузок на детали двигателя [5].

На рис. 10 приведены нагрузочные характеристики вариантов двигателя ВАЗ при частоте вращения коленчатого вала  $n = 4000$  об/мин.

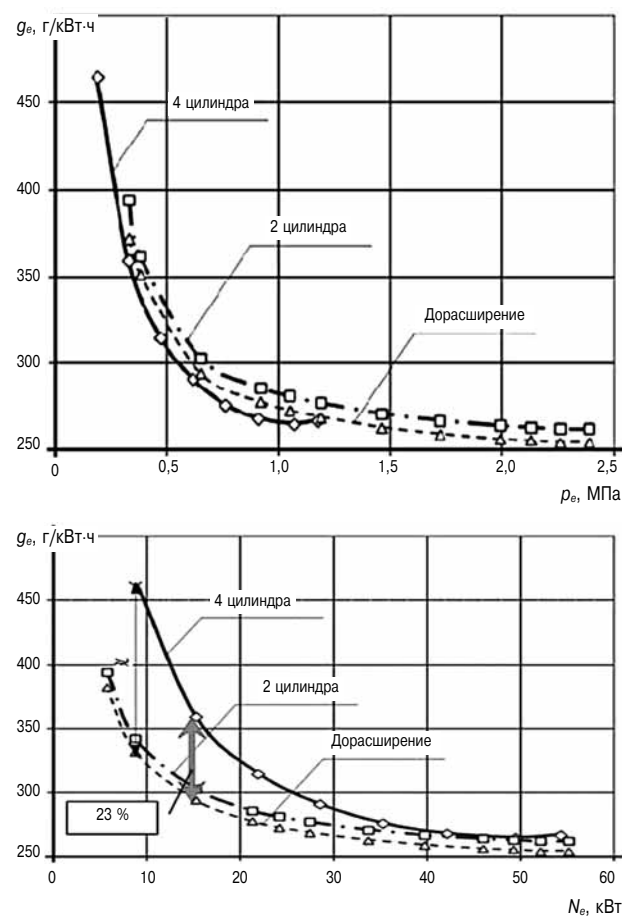
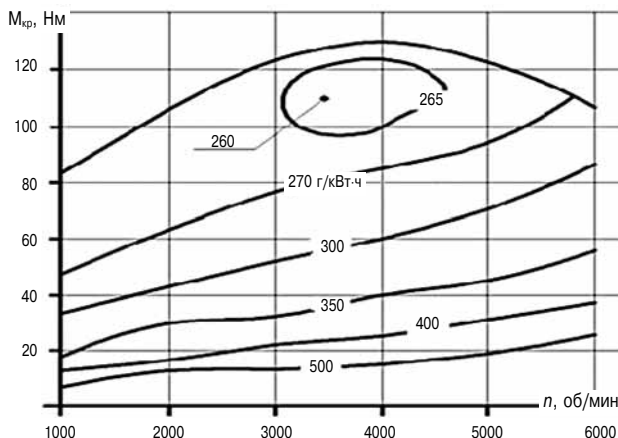


Рис. 10. Нагрузочные характеристики двигателя ВАЗ,  $n = 4000$  об/мин

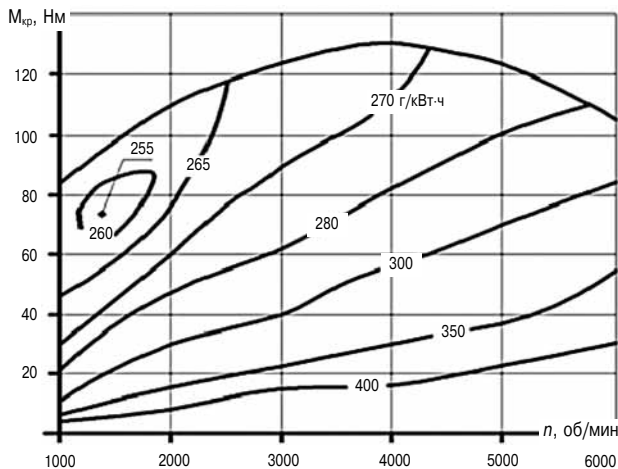
Из сравнения вариантов на графике  $g_e = f(p_e)$  следует, что при одинаковой величине среднего эффективного давления стандартный вариант имеет меньший уровень удельного эффективного расхода топлива по сравнению с другими вариантами. Указанное объясняется пониженной степенью сжатия двигателя в вариантах с двумя рабочими цилиндрами, что вызывает уменьшение индикаторного КПД, а также увеличенными механическими потерями за счет двух выключенных цилиндров.

Картина меняется при сравнении вариантов на графике  $g_e = f(N_e)$  при одинаковой мощности. В вариантах с двумя рабочими цилиндрами величина удельного эффективного расхода топлива снижается по сравнению со стандартным вариантом 4-цилиндрового двигателя без наддува, причем эффект увеличивается при снижении мощности. На характерном режиме городского движения автомобиля «Лада Калина» ( $N_e = 15$  кВт;  $n = 4000$  об/мин) вариант ДЭ с продолженным расширением по топливной экономичности бо-

а)

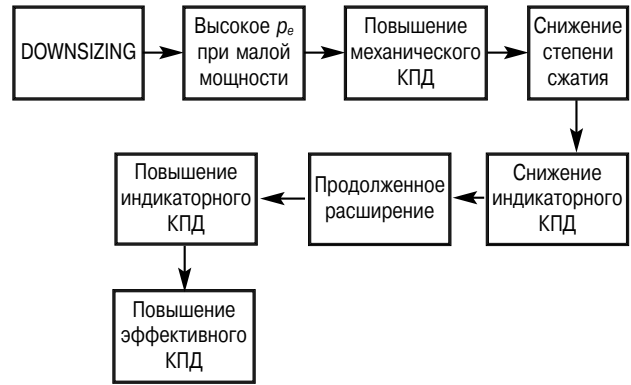


б)



**Рис. 11. Многопараметровые характеристики двигателя ВАЗ:**

а — стандартный вариант; б — двигатель-эспандер



**Рис. 12. Схема повышения топливной экономичности варианта «двигатель-эспандер»**

лее чем на 20 % превосходит стандартный вариант двигателя.

На рис. 11 приведены нагрузочные характеристики вариантов двигателя ВАЗ. У варианта ДЭ величина минимального удельного эффективного расхода топлива несколько ниже, в сравнении со стандартным вариантом. Но существенно более значимым преимуществом варианта ДЭ является смещение зоны малых величин удельного расхода топлива в область низких нагрузок и частот вращения коленчатого вала, что благоприятно сказывается на расходе топлива автомобилем.

Схема воздействия различных факторов на повышение топливной экономичности варианта «двигатель-эспандер» иллюстрируется рис. 12.

Форсирование двух рабочих цилиндров с помощью наддува позволяет обеспечить необходимую мощность двигателя на режимах частичных нагрузок при более высоком уровне среднего эффективного давления по сравнению со стандартным вариантом 4-цилиндрового двигателя без наддува. При этом ощутимо увеличивается механи-

Таблица 2

**Параметры вариантов двигателя ВАЗ 11194**

Вариант	Стандартный	ДЭ
Количество цилиндров		4
Число клапанов		16
Диаметр цилиндра, мм		76,5
Ход поршня, мм		75,6
Рабочий объем цилиндров, л	1,39	0,7 (условно)
Степень сжатия	10,8	9,0
Номинальная мощность, кВт, при $n = 6000$ об/мин		65
Максимальный крутящий момент, Нм, при $n = 4000$ об/мин		130
$g_{e \min}$ по многопараметровой характеристике, г/кВт·ч	260	255 (↓ 2 %)
$g_e$ на характерном режиме городского движения автомобиля «Лада Калина» ( $N_e = 15$ кВт; $n = 4000$ об/мин), г/кВт·ч	375	290 (↓ 23 %)



ческий КПД. Необходимость снижения степени сжатия для предотвращения детонации и уменьшения нагрузок на детали двигателя приводит к некоторому снижению индикаторного КПД, которое компенсируется за счет продолженного расширения газов в эспандерных цилиндрах. В итоге вариант «двигатель-эспандер» имеет более высокий эффективный КПД.

Параметры вариантов двигателя ВАЗ 11194 даны в табл. 2.

Дальнейшим развитием двигателей с разделенными тактами могут стать конструкции с переключением функций цилиндров, при которых они попеременно выполняют функции рабочих, эспандерных, или компрессорных цилиндров [6–8]. В последнем варианте в двух компрессорных цилиндрах осуществляется сжатие воздуха, который затем используется в рабочих цилиндрах для наддува.

#### **Заключение**

Проведенные исследования свидетельствуют о значительных резервах повышения топливной экономичности двигателей при организации продолженного расширения рабочего тела. Для осуществления продолженного расширения могут быть использованы нетрадиционные преобразующие механизмы, наиболее отработанным из которых является траверсный механизм НАМИ.

Для 4-цилиндровых бензиновых двигателей семейства ВАЗ, организация продолженного расширения возможна при использовании обычного кривошипно-шатунного механизма. Изменение последовательности процессов и функций в цилиндрах не требует значительных изменений конструкции стандартного двигателя. Однако элементы конструкции стандартного двигателя должны обеспечивать его работоспособность при более высоком уровне тепловых и механических нагрузок.

Модификации стандартного двигателя с продолженным расширением могут быть особо вос-

требованы для транспортных средств со специфическими условиями эксплуатации, например, для автомобилей, с преобладающей долей городских режимов. Несомненно, специфические особенности модификации «двигатель-эспандер» делают ее весьма привлекательной для использования в составе комбинированных энергоустановок.

#### **Литература**

1. Тер-Мкртчян Г.Г. Управление движением поршней в двигателях внутреннего сгорания. — М. : Металлургия, 2011. — 304 с.
2. Яманин А.И., Кутнев В.Ф., Тер-Мкртчян Г.Г. Интегрированные системы автоматизированного проектирования: учебное пособие. — Ярославль : Изд-во ЯГТУ, 2011. — 76 с.
3. Дьяченко В.Г. Двигатель с продолженным расширением — проблемы, перспективы. [Текст] / В.Г. Дьяченко // Грузовик &. — 2008. — № 2. — С. 22–24.
4. Ailloud, C., Delaporte, B., Schmitz, G., Keromnes, A. et al., "Development and Validation of a Five Stroke Engine," SAE Technical Paper 2013-24-0095, 2013, doi:10.4271/2013-24-0095.
5. Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатели ВАЗ — технический уровень и перспективы развития за счет регулирования степени сжатия // Автомобильная промышленность. — 2008. — № 10. — С. 17–19.
6. Пат. 2520772 Российская Федерация, МПК F02B41/06, F02B33/06. Способ работы поршневого двигателя [Текст] / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП НАМИ, опубл. 27.06.2014. Бюл. №18.
7. Пат. 2520791 Российская Федерация, МПК F02B41/06, F02B33/06. Комбинированный четырехцилиндровый двигатель [Текст] / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП НАМИ, опубл. 27.06.2014. Бюл. №18.
8. Пат. 2521704 Российская Федерация, МПК F02B41/06. Комбинированный поршневой двигатель [Текст] / Г.Г. Тер-Мкртчян, А.А. Никитин, А.В. Глатерман; заявитель и патентообладатель ГНЦ РФ ФГУП НАМИ, опубл. 10.07.2014. Бюл. №19.