

УДК 621.43.056

В. Б. ПОДА

Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ С КЛАПАНАМИ ОБРАТНОГО ДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты исследования целесообразности и эффективности использования в поршневых двигателях внутреннего сгорания клапанов, открывающихся в сторону головки цилиндров. Исследование проводилось на основании сравнительных расчетов показателей работы поршневого двигателя с классическими клапанами прямого действия, открывающимися в полость цилиндра, и двигателя с клапанами обратного действия, открывающимися в сторону головки цилиндра. Анализ полученных результатов показал возможность существенного улучшения практически всех показателей работы двигателя при переходе на клапаны обратного действия, целесообразность разработок и применения газораспределительных механизмов с клапанами обратного действия.

Ключевые слова: газораспределительный механизм, клапан прямого действия, клапан обратного действия, площадь проходного сечения клапана, коэффициент расхода, показатели работы двигателя.

Введение

Последние два десятилетия прошлого столетия заслуженно считают рубежом второго рождения поршневых двигателей внутреннего сгорания, причиной чего стало резкое ужесточение требований, в основном для автомобильных двигателей, по показателям их токсичности и экономичности, а также стремление к повышению их литровой мощности. Модернизация двигателей в этих направлениях затронула практически все системы, механизмы и агрегаты двигателя, что привело к существенному усложнению их конструкции – это системы и механизмы изменения фаз газораспределения и степени сжатия, новые системы подачи и впрыска топлива с электронным управлением, впускные и выпускные тракты с изменяемой геометрией, микропроцессорные системы контроля и управления работой двигателя и т.д. и т.п.

1. Формулирование проблемы и постановка задачи

Одной из основных составных частей конструкции силового агрегата поршневого двигателя, которая в наибольшей степени влияет на показатели его работы, является механизм газораспределения (ГРМ). Неспроста совершенствование двигателя в конце прошлого столетия началось с увеличения количества клапанов на цилиндр и созданием механизмов и систем, обеспечивающих изменение фаз газораспределения и регулирующих высоту подъема

клапанов.

Для улучшения показателей работы двигателя путем реконструкции механизма газораспределения, по мнению автора, существует еще один достаточно простой способ, заключающийся в замене клапанов прямого действия, открывающихся в камеру сгорания, на клапаны обратного действия, которые открываются в сторону головки цилиндра. Подобные схемы механизмов газораспределения неоднократно предлагались различными авторами (см., например, [1, 2]), однако работ, которые бы изучали характеристики двигателей с такими ГРМ в научнотехнической литературе последних лет автор не нашел.

Упорная привязанность разработчиков двигателей к классической схеме механизма газораспределения с клапанами прямого действия очевидна – такие клапаны обеспечивают наилучшую герметичность внутрицилиндрового пространства в результате эффекта самоуплотнения клапанов. Но на этом все их преимущества и оканчиваются, так как очевидно и другое, а именно, что стержень такого клапана заметно уменьшает площадь проходного сечения горловины, а значит и клапана, а головка оказывает большое гидросопротивление потоку газов, проходящему через клапан. В то же время механизм газораспределения с клапанами, открывающимися в сторону головки цилиндров должен позволить:

– повысить коэффициент наполнения цилиндра и качество его очистки за счет увеличенной площади проходного сечения клапанов и снижения гидросопротивления, а, следовательно, мощность и кру-

тящий момент двигателя;

– увеличить крутизну кривой изменения площади проходного сечения клапанов, и, при необходимости, высоту подъема клапана и значения фаз газораспределения при положении поршня в верхней мертвой точке (ВМТ) без опасения соударения поршня с клапаном;

– снизить вероятность возникновения детонационного воспламенения бензовоздушной смеси в результате более низкой температуры выпускных клапанов (обтекание клапана выпускными газами, как в схемах с классическими клапанами прямого действия, в данных схемах будет отсутствовать), отсюда можно ожидать возможности некоторого повышения степени сжатия бензиновых двигателей.

К достоинствам применения клапанов обратного действия также можно отнести то, что затраты энергии на открытие и закрытие таких клапанов должны быть заметно ниже, чем для клапанов прямого действия, так как открытию их должно способствовать избыточное давление газов в цилиндре, а в моменты их закрытия перепад давления на клапанах будет практически отсутствовать.

Безусловными недостатками механизмов газораспределения с клапанами обратного действия можно считать возможное некоторое снижение герметичности внутрицилиндрового объема, а также большие нагрузки на стержень клапана на тактах сжатия и сгорания, что, в конечном счете, может быть сведено к минимуму выбором конструкции соответствующего механизма удержания их в закрытом состоянии.

В связи с вышеизложенным задачей настоящей работы было выяснение целесообразности и степени эффективности применения механизмов газораспределения с клапанами обратного действия.

1. Решение задачи

Решение поставленной задачи осуществлялось путем теоретического сравнения показателей работы выбранного прототипа существующего двигателя с клапанами прямого действия и аналогичного ему двигателя, но использующего клапаны обратного действия.

В качестве прототипа был выбран двигатель ВАЗ-21126. Исходные данные для сравнительных расчетов показателей работы базового двигателя и аналога, использующего ГРМ с клапанами обратного действия, представлены в табл. 1.

Определяющим фактором, влияющим на процессы газообмена, а, следовательно, и на все показатели работы двигателя является эффективная площадь проходного сечения клапана. Построение кривых изменения этих площадей для базового двига-

теля с клапанами прямого действия производилось на основании профилей кулачков распределительного вала двигателя и с использованием зависимостей коэффициента расхода μ от безразмерного хода

клапана $\frac{h}{d_k}$, представленных в работе [3], (рис. 1).

Для построения кривых изменения эффективных площадей проходного сечения клапанов обратного действия на основании расчетных формул и справочных данных работы [4] была рассчитана зависи-

мость $\mu \frac{h}{d_k}$ для таких клапанов, которая приведена на рис. 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчетов

Наименование параметра		Значение параметра
Номинальная частота вращения вала, об/мин		5600
Степень сжатия		10,3
Рабочий объем, л		1596
Диаметр цилиндра / ход поршня, мм		82/71
Количество клапанов на цилиндр		4
Диаметр тарелки клапанов, мм	впускных	29
	выпускных	25,5
Диаметр стержня впускных и выпускных клапанов, мм		7
Диаметр горловины клапанов, мм	впускных	26
	выпускных	23
Фазы газораспределения, град	опережения открытия впускных клапанов	17
	запаздывания закрытия впускных клапанов	59
	опережения открытия выпускных клапанов	59
	запаздывания закрытия выпускных клапанов	17
Угол опережения зажигания, град		25
Топливо		бензин АИ-95

Расчет и построение кривых изменения эффективных площадей проходного сечения клапанов обратного действия осуществлялось с учетом максимально допустимых динамических нагрузок на детали ГРМ для двигателей серийно выпускаемых легко-

вых автомобилей. Полученные таким образом кривые приведены на рис. 2 (НМТ – нижняя мертвая точка).

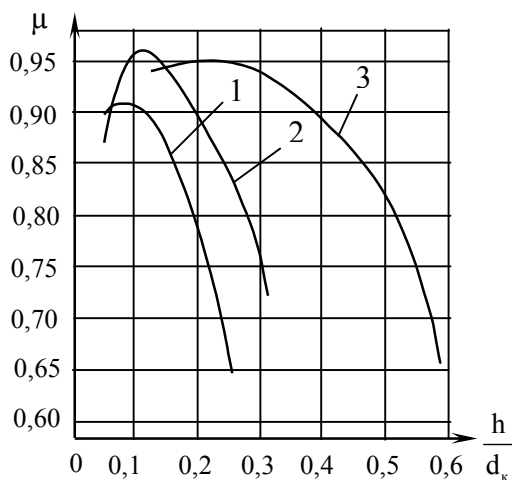


Рис. 1. Зависимость коэффициента расхода от безразмерного хода клапана:
1 – впускного; 2 – выпускного; 3 – обратного действия

Используя представленные выше исходные данные, сравнительные расчеты показателей работы базового двигателя и аналога с клапанами обратного действия на номинальном режиме производились с использованием программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК [5].

2. Результаты исследований

Результаты сравнительных расчетов основных показателей процессов, протекающих в базовом двигателе и в двигателе с клапанами обратного действия, а также в целом показателей работы сравниваемых двигателей представлены на рис. 3, 4, и 5 и в табл. 2.

Кривые изменения давления в цилиндре в те-

чение процессов газообмена (рис. 3) свидетельствуют о значительно меньшем давлении газов в процессе выпуска и большем давлении наполнения в цилиндрах двигателя с клапанами обратного действия. Следовательно, уменьшаются затраты механической работы двигателя на очистку и наполнение цилиндров, на 7,7% повышается коэффициент наполнения цилиндров свежим зарядом и улучшается их очистка от отработавших газов – коэффициент остаточных газов снижается на 8% (см. табл. 2). Так среднее давление насосных ходов для базового двигателя составляет $p_{н.х.} = -0,0909$ МПа, в то время как для двигателя с клапанами обратного действия $p_{н.х.} = -0,0556$ МПа, что на 39% меньше.

В результате более интенсивного тепловыделения в цилиндрах двигателя с клапанами обратного действия (рис. 4) скорость нарастания давления в них составляет $\frac{dp}{d\varphi} = 0,388 \frac{\text{МПа}}{\text{град}}$ по сравнению с

$\frac{dp}{d\varphi} = 0,353 \frac{\text{МПа}}{\text{град}}$ для двигателя с клапанами прямо-

го действия. Это приводит к увеличению на 8% максимального давления цикла p_z в цилиндрах такого двигателя (рис. 5 и табл. 2) и повышению значения среднего эффективного давления p_e цикла на 13,6%. При этом, как видно из рис. 5 и табл. 2, максимальная температура сгорания T_z и температура начала выпуска T_b остаются такими же, как и в цилиндрах двигателя с клапанами прямого действия, температуры же окончания наполнения цилиндров свежим зарядом T_a , конца сжатия T_c и среднестатистическая температура выпускных газов T_f снижаются на 1...2%.

В результате комплексного улучшения почти всех показателей рабочего процесса двигателя с клапанами обратного действия его эффективная

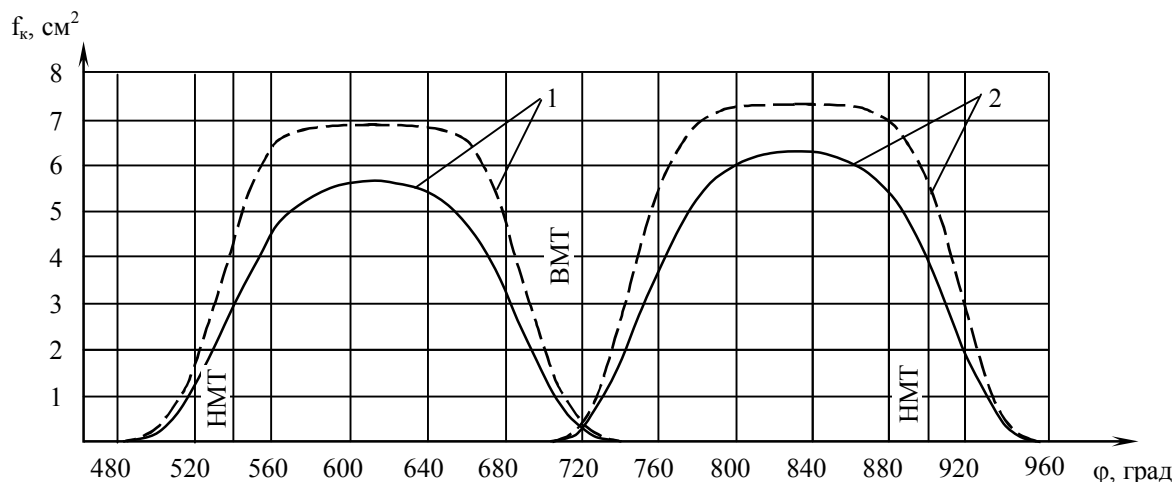


Рис. 2. Диаграммы изменения эффективной площади проходного сечения клапанов:

1 – выпускных; 2 – впускных;

— — для клапанов прямого действия; - - - - для клапанов обратного действия

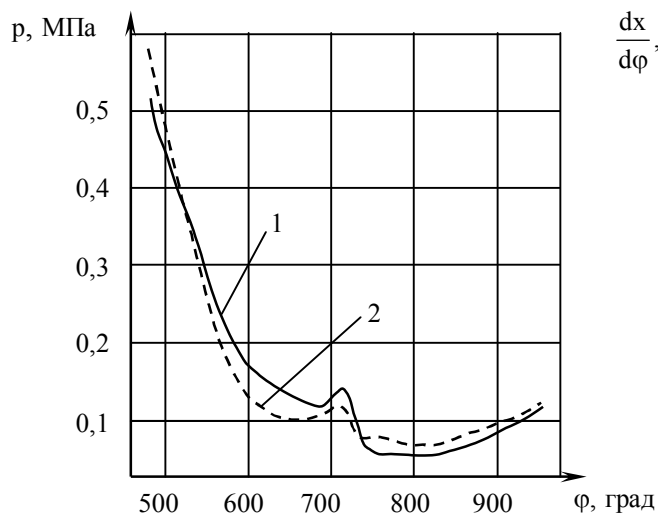


Рис. 3. Кривые изменения давления в цилиндре в процессах выпуска и наполнения:
1 – в двигателе с клапанами прямого действия;
2 – в двигателе с клапанами обратного действия

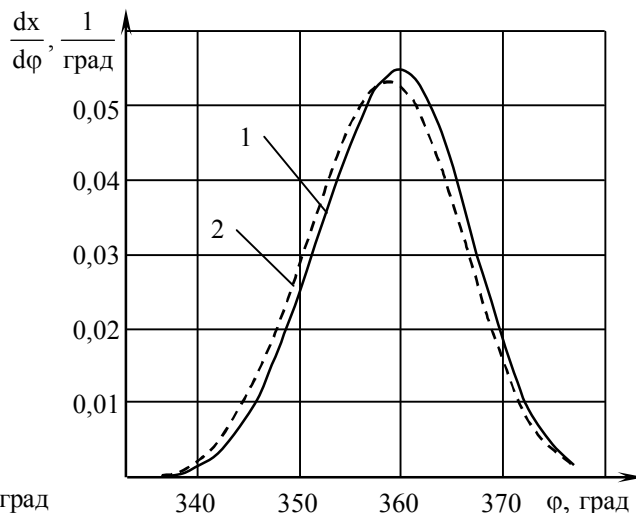


Рис. 4. Динамика тепловыделения в цилиндре:
1 – двигателя с клапанами прямого действия;
2 – двигателя с клапанами обратного действия

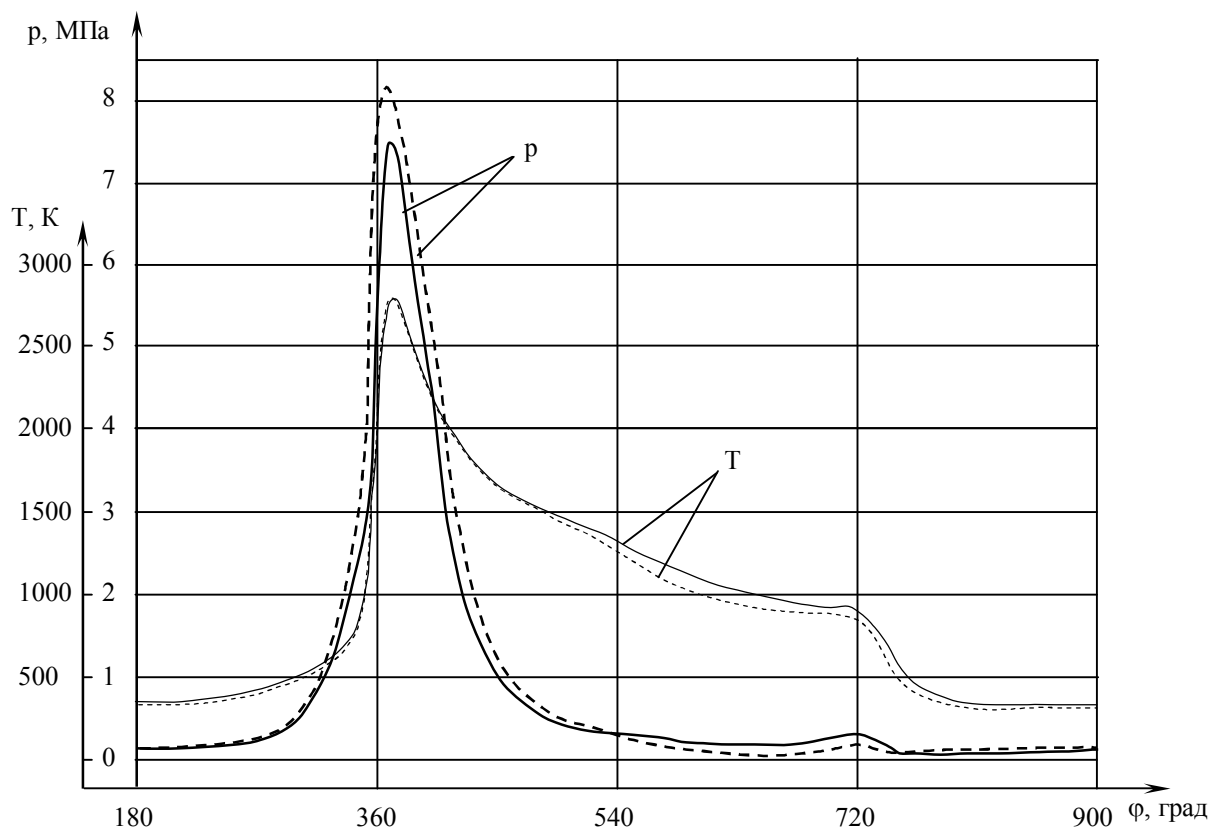


Рис. 5. Индикаторная диаграмма и изменение температуры в цилиндре двигателя:
— с клапанами прямого действия; ---- с клапанами обратного действия

мощность и крутящий момент возрастают на 10% при снижении на 5% удельного эффективного расхода топлива и повышении на 6,8% эффективного КПД двигателя. При этом, однако, в двигателе с клапанами обратного действия несколько возрастают значения тепловых потоков в крышку цилиндра и в поршень (на 5%), в результате чего температура

огневой поверхности крышки и днища поршня повышаются примерно на 1%.

Логично было предположить, что значения фаз газораспределения, оптимальные для базового двигателя с клапанами прямого действия и выбранные в качестве исходных данных для сравнительных расчетов, могут не являться оптимальными для двига-

теля с клапанами обратного действия. В связи с этим для номинального режима работы двигателя с клапанами обратного действия была проведена оптимизация фаз по максимальным значениям эффективной мощности и крутящего момента двигателя, в результате чего получено: для впускных клапанов начало открытия – 26° до ВМТ, закрытие – 55° по-

сле НМТ; для выпускных клапанов начало открытия – 67° до НМТ, закрытие – 23° после ВМТ.

Используя полученные оптимальные значения фаз газораспределения для двигателя с клапанами обратного действия, производился расчет показателей работы такого двигателя с неизменными остальными исходными данными (см. табл. 2).

Таблица 2

Результаты сравнительных расчетов показателей работы двигателей с клапанами прямого и обратного действия

Показатели двигателя и рабочих процессов	Двигатель с клапанами прямого действия	Двигатель с клапанами обратного действия	Двигатель с клапанами обратного действия и оптимальными фазами газораспределения	Изменение значений показателей в %
Эффективные показатели				
Мощность, N_e [кВт] / при 5600 об/мин	60,5	66,54	68,05	+10 (+12,4)
Крутящий момент, M_e [Н·м] / при 5600 об/мин	103,2	113,5	116	+10 (+12,8)
Среднее эффективное давление, p_e [МПа]	0,836	0,950	0,972	+13,6 (+16,2)
Удельный эффективный расход топлива, g_e [кг/кВт·ч]	0,279	0,265	0,262	-5 (-6)
Эффективный КПД, η_e	0,29	0,308	0,312	+6,8 (+7,6)
Показатели газообмена				
Коэффициент наполнения, η_v	0,845	0,910	0,920	+7,7 (+8,9)
Коэффициент остаточных газов, γ_r	0,05	0,046	0,045	-8 (-10)
Среднее давление насосных ходов, $p_{н.х}$ [МПа]	-0,0909	-0,0556	-0,0471	-39 (-48)
Заброс ОГ во впускной коллектор $G_{збр.}$ [%]	0,91	0,84	0,86	-7,7 (-5,5)
Показатели сгорания				
Коэффициент избытка воздуха, α	1,0	1,0	1,0	0 (0)
Максимальное давление цикла, p_z [МПа]	7,55	8,15	8,27	+8 (+9,5)
Максимальная температура цикла, T_z [K]	2755	2755	2755	0
Угол максим. давления, ϕ_{pz} [град. за ВМТ]	9	8	8	-11 (-11)
Угол максим. температуры, ϕ_{Tz} [град. за ВМТ]	13	12	12	-7,7 (-7,7)
Максим. скорость нарастания давления, $dp/d\phi$ [МПа/град]	0,35	0,38	0,39	+8,6 (+11,4)
Продолжительность сгорания, $\phi_{гор}$ [град.]	43	43	43	0 (0)
Показатель сгорания в цилиндре по Виббе, m_v	2,96	2,77	2,73	-5 (-7,8)
Внутрицилиндровые показатели				
Давление начала сжатия, p_a [МПа]	0,127	0,133	0,127	+5(0)
Температура начала сжатия, T_a [K]	383	375	368	-2 (-4)
Давление конца сжатия, p_c [МПа]	2,23	2,35	2,38	+5,4 (+6,7)
Температура конца сжатия, T_c [K]	774,7	762,2	759,6	-1,6 (-2)
Давление начала выпуска, p_b [МПа]	0,531	0,563	0,596	+6 (+12,2)
Температура начала выпуска, T_b [K]	1493	1493	1515	0 (+1,5)
Параметры выпускных газов в выпускном коллекторе				
Среднее статич. давление ОГ, p_r [МПа]	0,104	0,104	0,104	0 (0)
Средняя статич. температура ОГ, T_r [K]	1060,4	1038,6	1036,1	-2,1 (-2,3)
Средняя скорость газа, w_r [м/с]	268	282	286	+5,2 (+6,7)
Средняя температура стенки коллектора, T_{wr} [K]	1010	989,2	989,3	-2,1 (-2,1)
Экологические показатели				
Концентр. Влажных NO_x , [1/млн]	4607,5	4668,5	4680,4	+1,3 (+1,5)
Эмиссия NO_x , приведенная к NO , [г/(кВт·ч)]	22,787	21,784	21,607	-4,4 (-5,2)

Как видно из табл. 2, выбор оптимальных фаз газораспределения для двигателя с клапанами обратного действия позволяет еще более улучшить показатели работы такого двигателя (в среднем на 1...2%) по сравнению с базовым двигателем и в итоге добиться увеличения эффективной мощности на 12,4% и крутящего момента на 12,8%, снижения на 6% удельного эффективного расхода топлива и повышения эффективного КПД на 7,6%. При этом эмиссию оксидов азота NO_x можно снизить на 5,2%.

Выводы

Проведенные сравнительные расчеты показателей работы двигателя с классическим ГРМ, использующим клапаны прямого действия, открывающиеся в сторону камеры сгорания, и двигателя с ГРМ, клапаны которого открываются в сторону головки цилиндра, свидетельствуют о том, что значения практически всех основных внутрицилиндровых, мощностных, экономичных и экологических показателей последнего значительно выше (на 6...12%), чем у двигателя с классическим ГРМ. Это позволяет сделать вывод о целесообразности перехода на такие ГРМ, по крайней мере, для двигателей с относительно невысокими значениями p_z .

Безусловно, переход на ГРМ с клапанами обратного действия потребует разработки новой конструкции клапанов, седел, возможно, выбора новых материалов для них, механизмов их открытия и закрытия, а также оценки степени герметичности таких клапанов. Основной проблемой, конечно же, является разработка механизма удержания клапанов в закрытом состоянии с обеспечением достаточной их герметичности на тактах сжатия, сгорания и расширения, но и эта проблема является вполне разрешимой и может быть решена созданием механизма, удерживающего клапаны в закрытом состоянии без

существенных энергозатрат, например, с системой гидрокомпенсации усилий, действующих на клапан. Для дальнейшей оценки целесообразности применения ГРМ с клапанами обратного действия следует провести тщательный анализ возможных схем таких механизмов с определением их кинетических, динамических и энергетических показателей, а также с оценкой степени герметичности обратных клапанов в этих механизмах.

Литература

1. Пат. 2251005 Российская Федерация, МПК⁷ F01L 9/02, Клапанный газораспределительный механизм и способ клапанного газораспределения двигателя внутреннего сгорания [Текст] / Голубенко Г. В. ; заявитель и патентообладатель Голубенко Георгий Владимирович. – № 2003109677/06 ; заявл. 07.04.2003 ; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12. – 5 с. : ил.
2. Пат. 2448261 Российская Федерация, МПК⁷ F01L 9/02, Гидромеханическая система привода клапанов двигателя и способ ее применения [Текст] / Мелдолеси Риккардо (GB), Лейси Клайв (GB) ; заявитель и патентообладатель СКАДЕРИ ГРУП, ЭлЭлСи (US). – № 2010101968/0 ; заявл. 01.07.2008 ; опубл. 20.04.2012, Бюл. № 11. – 27 с. : ил.
3. Дьяченко, В. Г. Теория двигателей внутреннего сгорания [Текст] : учеб. для вузов / В. Г. Дьяченко. – Харьков : ХНАДУ, 2009. – 500 с.
4. Идельчик, И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст]: справочник / И. Е. Идельчик; под ред. М. О. Штейнберга. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1992. – 672 с.
5. Кулешов, А. С. Программа расчета и оптимизации двигателей внутреннего сгорания ДИЗЕЛ-РК [Текст] / А. С. Кулешов. – М. : МГТУ им. Баумана, 2004. – 123 с.

Поступила в редакцию 14.02.2014, рассмотрена на редколлегии 12.03.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов А. В. Амброжевич, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ В ПОРШНЕВИХ ДВИГУНАХ ГАЗОРОЗПОДІЛЬНИХ МЕХАНІЗМІВ ІЗ КЛАПАНАМИ ЗВОРОТНОЇ ДІЇ

В. Б. Пода

Наведено результати дослідження доцільності та ефективності використання в поршневих двигунах внутрішнього згоряння клапанів, що відкриваються у бік головки циліндрів. Дослідження проводилося на підставі порівняльних розрахунків показників роботи поршневого двигуна із класичними клапанами прямої дії, що відкриваються у бік порожнини циліндра, та двигуна із клапанами зворотної дії, які відкриваються у бік головки циліндра. Аналіз одержаних результатів довів можливість суттєвого покращення практично усіх

показників роботи двигуна у разі переходу на клапани зворотної дії, доцільність розробок і застосування газорозподільних механізмів із клапанами зворотної дії.

Ключові слова: газорозподільний механізм, клапан прямої дії, клапан зворотної дії, площа прохідного перетину клапана, коефіцієнт витрат, показника роботи двигуна.

**ESTIMATION OF EFFICIENCY OF APPLICATION IN THE PISTON ENGINES
OF GAS-DISTRIBUTING MECHANISMS WITH THE REVERSE-ACTING VALVES**

V. B. Poda

Are given the results of investigating of expediency and effectiveness in the use in the piston internal combustion engines of valves, which are opened to the side of cylinder head. The investigation was conducted on the basis the comparative calculations of the indices of the work of piston engine with the classical valves of direct action, which are opened into the cavity of cylinder, and engine with the reverse-acting valves, which are opened to the side of cylinder head. The analysis of the obtained results showed the possibility of an essential improvement in practice all indices of the work of engine upon transfer on reverse-acting valves, the expediency of developments and applying the gas-distributing mechanisms with the reverse-acting valves.

Keywords: gas-distributing mechanism, valve of direct action, reverse-acting valve, area of section of the valve through passage, factor of an expense, indicators of operation of the engine.

Пода Вадим Борисович – канд. техн. наук, доцент кафедры ракетно-космических двигателей и энергетических установок летательных аппаратов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: vadimpoda@mail.ua.