

УДК 621.43.013

Е.П. Воропаев, инж.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНЕШНЕЙ СКОРОСТНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВИГАТЕЛЯ СПОРТБАЙКА SUZUKI GSX-R750

Введение

Применение трехмерных газодинамических моделей в проектировании поршневых ДВС позволяет серьезным образом оптимизировать характеристики газозвдушного тракта. Однако верификация этих моделей и их конкретных программных реализаций требует трудоемких экспериментальных исследований. Вместе с тем, о достоверности модели можно также судить по характеристикам конечных интегральных параметров двигателя (например, коэффициент наполнения η_v), протекание которых существенным образом зависит от моделируемого процесса. Для этих целей наиболее предпочтительны гоночные двигатели, т.к. у них наиболее широкий диапазон режимов работы. Последнее влечет за собой образование существенно отличающейся картины колебаний в газозвдушном тракте на режимах. Это обстоятельство будет предъявлять к модели более высокие требования.

Анализ последних достижений и публикаций

На сегодняшний день, в части моделирования газодинамических процессов в ДВС известна работа [1]. Из данной работы следует, что авторами предлагается модель, описывающая 3-х мерные течения теплопроводного вязкого газа. В своих исследованиях авторы больше останавливаются на тщательном моделировании отдельных элементов газозвдушного тракта.

В настоящей публикации используется модель, изначально разрабатывавшаяся для моделирования всего газозвдушного тракта, включая все цилиндры, объединенные общей впускной, или выпускной системой. Предлагаемая модель не учитывает теплоте-

ренос и вязкостные эффекты, однако эти упрощения позволили проводить оптимизационные расчеты всего двигателя в приемлемые, для инженерной практики, сроки.

Постановка задачи

Целью данного исследования является моделирование внешней скоростной характеристики двигателя спортбайка SUZUKI GSX-R750 с последующим анализом и сравнением результатов с экспериментальными данными. Двигатель спортбайка – четырехтактный, четырехцилиндровый, с четырьмя клапанами на цилиндр и с системой распределенного впрыска топлива. Рабочий объем двигателя – 0,7492 л. Номинальная частота вращения – 12000...13000 мин⁻¹. Номинальная мощность, указываемая производителем – 88...103 кВт (в зависимости от года выпуска модели). Система выпуска оснащена нейтрализатором, установленным в глушителе, и системой подачи дополнительного воздуха.

Для сравнительного анализа использовалась стендовая внешняя характеристика, опубликованная в журнале SuperBike Nov/1999 [2]. Её значения занесены в табл. 1. Хочется сразу высказать следующие соображения: 1) замер характеристики на стенде (максимальная мощность – 87,5 кВт) наверняка проводился без обеспечения скоростного напора воздуха; 2) мощность, указываемая производителем, наверняка дается с использованием скоростного напора. Моделирование производилось в условиях испытания на стенде – без скоростного напора.

Модель газодинамики – 3-мерная, решение системы уравнений – по методу крупных частиц [3,4].

Геометрические параметры газоздушного тракта и других необходимых деталей двигателя были сняты с реального мотоцикла. Принимая во внимание «экстремальность» двигателя, сеточная модель формировалась с особой тщательностью, например: были «выложены» входные леминискаты впускных патрубков, в выпускной системе была выполнена соответствующая перемычка между первичными трубами 2-го и 3-го цилиндров, а модель головки цилиндров была реально 16-клапанной. В сеточной модели была в точности повторена также разница в 30 мм в длинах впускных патрубков для внутренних и наружных цилиндров.

Расчетная область включала в себя: воздушный фильтр, полость воздушного фильтра, впускные патрубки, четыре цилиндра, выпускные трубы, первая камера глушителя с нейтрализатором.

Мощность расчетной сетки составила 2,436 млн. ячеек. Размер ячейки составил 2x2x2 мм. Время счета одного цикла (два оборота коленчатого вала) на микропроцессоре Core 2 Duo 6300 составило: от 7 часов на 12000 мин⁻¹ до 47 часов на 2000 мин⁻¹.

Фазы газораспределения – 25 и 73 град п.к.в. для впуска, 59 и 37 для выпуска – соответствуют указанным в описании. Предполагаемые профили кулачков и диаграмма газораспределения были получены расчетным путем.

Результаты моделирования

Был выполнен расчет двенадцати режимов внешней скоростной характеристики: от 2000 – до 13000 мин⁻¹. Основные результаты моделирования сведены в табл. 1, рис. 1, а некоторые диаграммы процессов газообмена – на рис. 2÷8.

Использованы следующие обозначения: N_e – эффективная мощность, $G_{s,выбр}$ – количество смеси, выброшенной обратно из цилиндра в конце впуска,

$G_{s,забр}$ – количество отработавших газов, заброшенных во впускной коллектор в начале открытия впускного клапана, $G_{г,возвр}$ – количество отработавших газов, вернувшихся обратно в цилиндр перед закрытием выпускного клапана, $\Delta P_{ВП}$ – разрежение во впускном коллекторе, $\Delta P_{ГЛ}$ – давление перед глушителем, $T_{ГЛ}$ – средняя температура газов перед глушителем, N_m и η_m – мощность механических потерь и механический КПД, P – давление в цилиндре, $P_{ВП}$ и $P_{ВЫП}$ – средние давления в сечениях перед впускным клапаном и за выпускным клапаном, $P_{ГЛ}$ и $P_{ВФ}$ – средние давления в сечениях перед глушителем и за воздушным фильтром.

Во время моделирования, при переходе от режима к режиму, изменялись только три параметра: коэффициент избытка воздуха α , параметры сгорания и степень подогрева воздуха на впуске $\Delta T_{ВП}$.

Степень подогрева воздуха на впуске отличается от нуля только на режимах от 5000 мин⁻¹ и ниже, причем с уменьшением оборотов – возрастает.

Расчет процесса сгорания производился по специальной методике [5]. Параметры, характеризующие процесс сгорания – момент максимальной скорости тепловыделения «FI(dx/dφ)max» (град. п.к.в.) и доля выгоревшего топлива к моменту прохода поршнем примерно одну треть пути от ВМТ «x(S=1/3)» – приведены в табл. 1.

По продолжительности сгорания $\varphi_{сгор}$ видно, что процесс сгорания начинает затягиваться уже с 7000 мин⁻¹. Это объясняется тем, что вся система газообмена оптимизирована под режим 12000 мин⁻¹. В частности это касается больших проходных сечений каналов. На малых же режимах, это приводит к значительному уменьшению скоростей потока на впуске и как следствие – к уменьшению турбулентности к началу воспламенения.

Таблица 1. Результаты моделирования внешней скоростной характеристики

n , мин ⁻¹	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	11000	12000	13000		
N_e замер, кВт	8,09	15,5	22,1	30,9	35,3	46,0	57,4	64,7	79,8	83,9	87,5	80,9		
ΔN_e , %	10,9	-5,1	1,3	5,1	2,0	-10,8	-8,0	-2,6	-1,7	2,3	1,6	-1,2		
И С Х О Д Н Ы Е Д А Н Н Ы Е П О Р Е Ж И М А М														
α	0,85	0,87	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93		
$\varphi_{сгор}$	140	130	110	100	93	93	87	83	80	77	77	77		
$Fl(dx/d\varphi)_{max}$	26	27	22	21	17	17	14	12	11	10	10	10		
$x(S=1/3)$, %	89,5	91,7	97,4	99,1	99,7	99,7	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8	99,8		
$\Delta T_{ВП}$, °С	16	10	6	3	0	0	0	0	0	0	0	0		
Р Е З У Л Ь Т А Т Ы М О Д Е Л И Р О В А Н И Я														
N_e , кВт	среднее	8,97	14,66	22,36	32,46	36,01	40,98	52,78	63,06	78,41	85,74	88,52	79,91	
	№ цил.	1	9,12	13,57	22,53	32,69	35,59	41,41	54,01	61,34	80,20	86,82	92,12	78,07
		2	8,87	15,72	22,17	32,30	36,33	40,49	51,47	64,66	76,08	84,25	85,80	82,41
		3	8,83	15,85	22,35	32,32	36,51	40,49	51,20	66,50	77,04	85,72	86,53	82,04
		4	9,04	13,52	22,42	32,57	35,67	41,62	54,53	59,86	80,43	86,31	89,77	77,19
g_e , г/кВт*ч	319,6	299,5	273,3	260,3	254,0	257,1	250,4	246,9	247,9	251,8	262,5	281,1		
η_v	среднее	0,709	0,740	0,782	0,873	0,797	0,796	0,883	0,935	1,050	1,061	1,046	0,933	
	№ цил.	1	0,720	0,691	0,790	0,878	0,789	0,800	0,897	0,910	1,076	1,071	1,084	0,916
		2	0,702	0,788	0,777	0,868	0,805	0,787	0,861	0,955	1,018	1,040	1,017	0,950
		3	0,702	0,792	0,774	0,872	0,805	0,794	0,871	0,981	1,028	1,065	1,020	0,954
		4	0,714	0,690	0,787	0,875	0,790	0,804	0,903	0,892	1,078	1,067	1,064	0,913
γ	среднее	0,072	0,060	0,045	0,023	0,034	0,044	0,041	0,036	0,025	0,025	0,025	0,028	
	№ цил.	1	0,068	0,079	0,039	0,024	0,038	0,048	0,041	0,032	0,020	0,023	0,024	0,029
		2	0,074	0,041	0,049	0,022	0,030	0,040	0,042	0,039	0,030	0,027	0,025	0,027
		3	0,072	0,039	0,049	0,022	0,030	0,039	0,042	0,037	0,030	0,027	0,025	0,027
		4	0,073	0,083	0,041	0,025	0,038	0,048	0,040	0,034	0,020	0,023	0,025	0,030
$G_{s,выб}$, %	среднее	12,95	11,14	12,21	7,10	12,99	12,71	6,80	6,90	4,31	1,18	0,32	0,19	
	№ цил.	1	11,87	12,60	10,80	6,83	12,25	10,66	7,34	6,84	6,23	1,17	0,36	0,00
		2	12,85	9,54	13,59	7,39	14,07	14,54	6,23	7,25	2,49	1,17	0,25	0,40
		3	14,67	10,09	13,54	7,60	13,58	14,60	6,58	6,81	2,47	1,22	0,28	0,36
		4	12,40	12,33	10,90	6,58	12,05	11,06	7,04	6,71	6,07	1,16	0,39	0,02
$G_{s,зоб}$, %	среднее	3,23	1,56	0,22	0	0,09	0,31	0,53	0,18	0	0,08	0	0,01	
	№ цил.	1	3,48	2,83	0,19	0	0,19	0,64	0,40	0,09	0	0,06	0	0,02
		2	2,87	0,13	0,26	0	0,02	0,00	0,71	0,33	0	0,11	0	0,00
		3	2,90	0,11	0,20	0	0,02	0,00	0,69	0,17	0	0,09	0	0,00
		4	3,68	3,18	0,24	0	0,13	0,60	0,33	0,14	0	0,07	0	0,03
$G_{г,выб}$, %	среднее	3,72	2,38	1,10	0,04	0,02	0,61	0,73	0,46	0,28	0,08	0	0	
	№ цил.	1	3,70	3,40	1,23	0,03	0,04	0,91	0,69	0,45	0,09	0,00	0	0
		2	3,66	1,20	0,97	0,03	0,00	0,33	0,81	0,50	0,49	0,17	0	0
		3	3,78	1,15	0,98	0,05	0,00	0,30	0,78	0,41	0,47	0,14	0	0
		4	3,73	3,76	1,22	0,04	0,03	0,91	0,65	0,49	0,09	0,00	0	0
$G_{топль}$, кг/ч	2,87	4,39	6,11	8,44	9,14	10,5	13,2	15,6	19,4	21,6	23,2	22,5		
$\Delta P_{ВП}$, кПа	1,257	1,716	1,561	1,827	2,063	2,475	3,192	4,353	6,724	7,107	8,169	8,151		
$P_z * 10$, МПа	32,5	33,1	37,3	43,8	44,4	45,4	56,0	62,8	74,7	78,6	78,5	69,0		
$\Delta P_{ГЛ}$, кПа	1,017	1,023	1,050	1,073	1,071	1,105	1,166	1,206	1,321	1,393	1,464	1,454		
$T_{ГЛ}$, °С	338	285	584	517	503	554	633	658	674	683	708	721		
N_m , л.с.	0,85	1,67	2,82	4,34	6,28	8,69	11,62	15,11	19,22	23,98	29,46	35,69		
η_m	0,935	0,922	0,915	0,910	0,886	0,865	0,861	0,850	0,847	0,829	0,803	0,753		

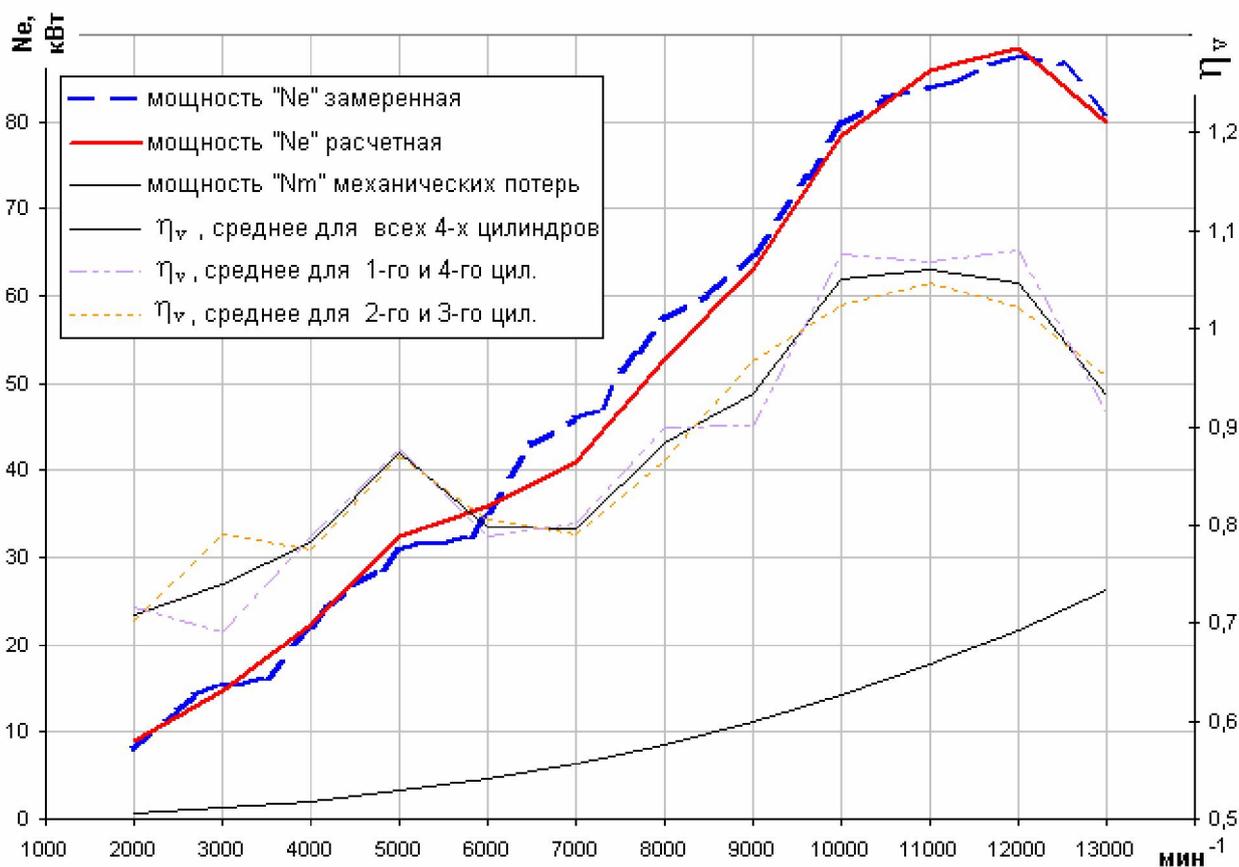


Рис. 1. Внешняя скоростная характеристика

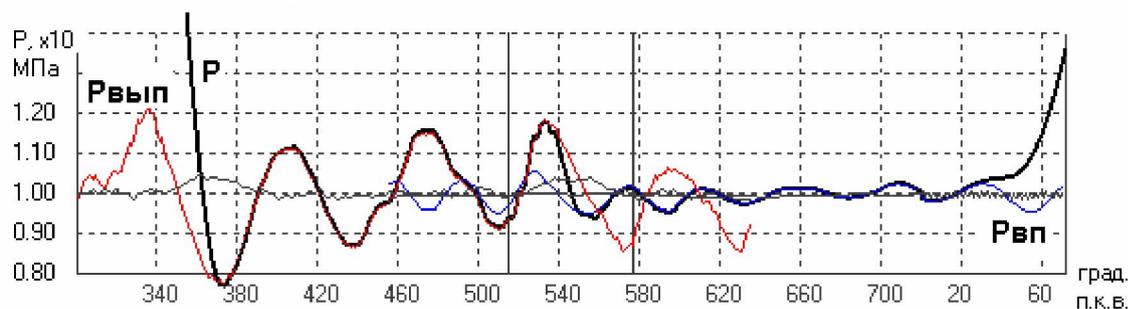


Рис. 2. Диаграмма газообмена, $n=2000 \text{ min}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

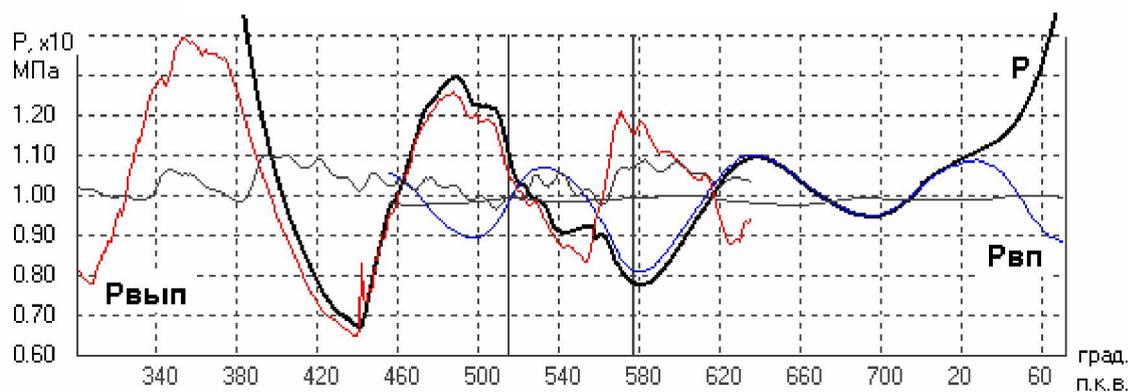


Рис. 3. Диаграмма газообмена, $n=5000 \text{ min}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

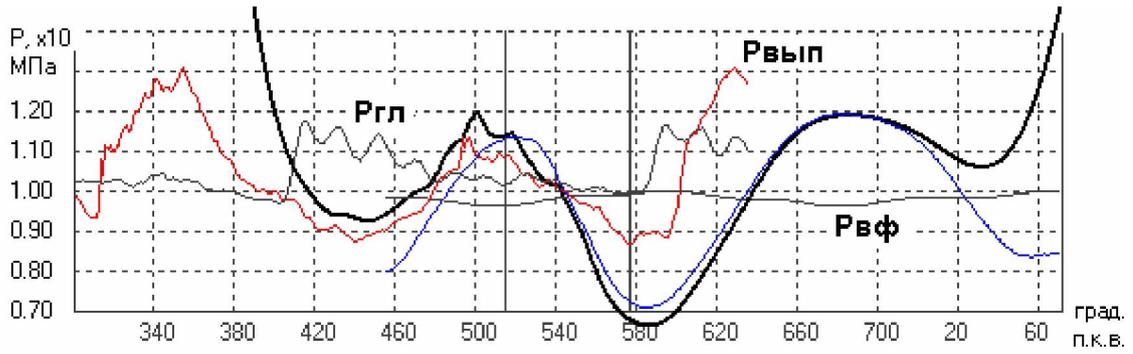


Рис. 2. Диаграмма газообмена, $n=7000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

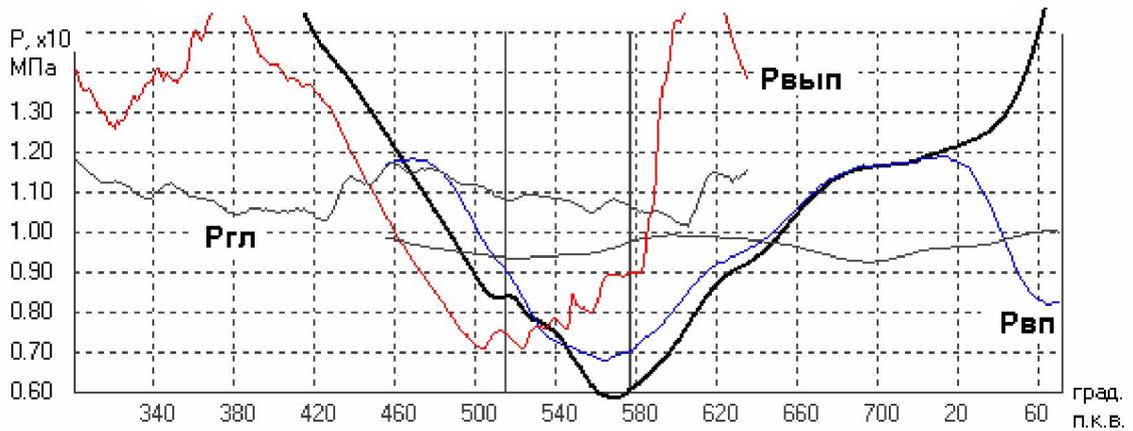


Рис. 5. Диаграмма газообмена, $n=9000 \text{ мин}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

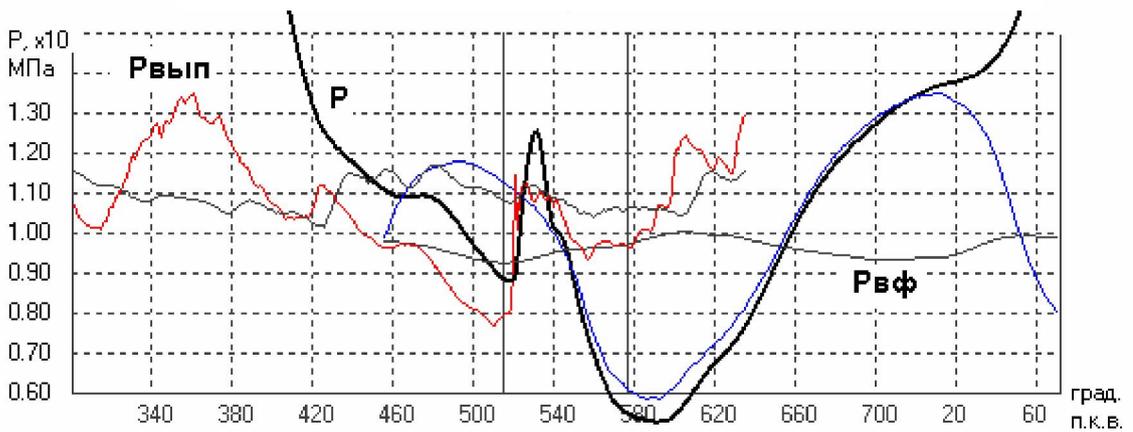


Рис. 6. Диаграмма газообмена, $n=9000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

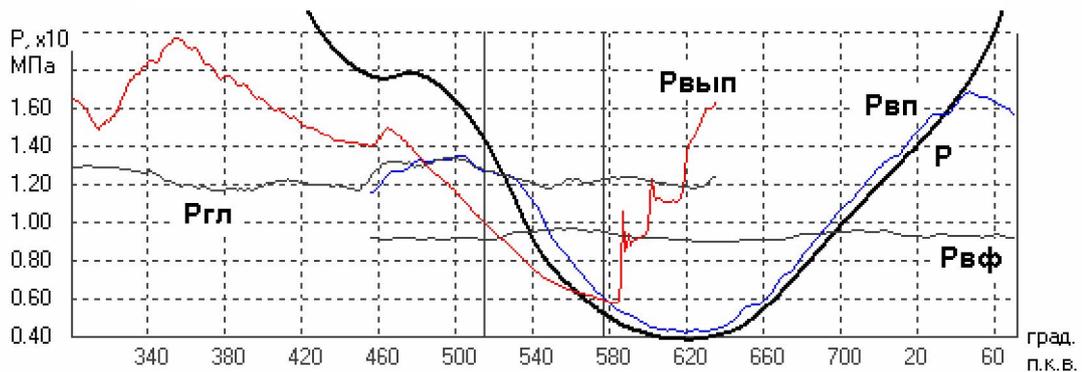


Рис. 7. Диаграмма газообмена, $n=12000 \text{ мин}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

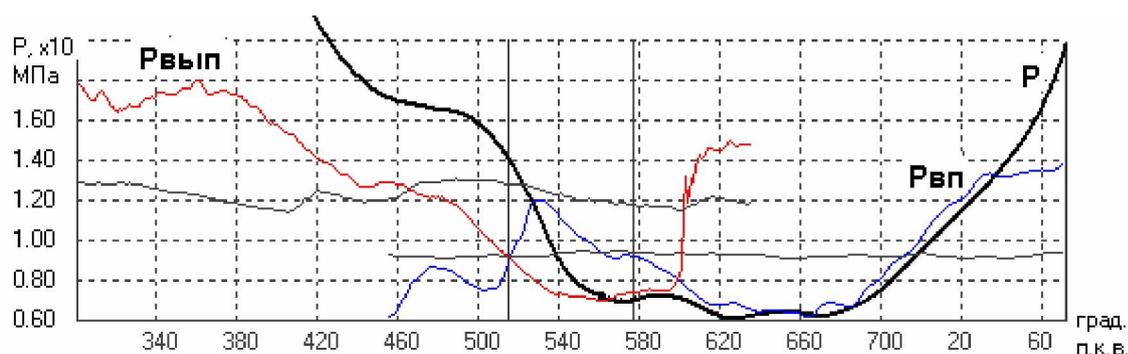


Рис. 7. Диаграмма газобмена, $n=13000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

По характеристике протекания коэффициента наполнения (см. рис. 1) отчетливо видно, что на частотах вращения ($10000 \div 12000$) мин^{-1} этот показатель превышает единицу. Это объясняется и пониженным давлением за выпускными клапанами (0,07 МПа), и соответствующей волновой настройкой впускных патрубков (см. рис. 7).

Расхождения между экспериментальной характеристикой и расчетной по мощности ΔN_e (см. табл. 1) лежат в пределах от 1,3 % до 10 % (среднее – 4,4). Нельзя, конечно, говорить о полном совпадении, но: 1) для такого широкого рабочего диапазона – это тоже удовлетворительный результат; 2) для более детального моделирования – недостаточно исходных и экспериментальных данных.

Заключение

Представленная модель показала качественно правильное моделирование характеристики столь высокооборотного двигателя: полное совпадение номинальных оборотов, виден характерный для го-

ночных двигателей прогиб характеристики. Количественно – средние по характеристике расхождения мощности на участке от 2000 до 7000 мин^{-1} составляют 5,8 %, от 7000 до 13000 мин^{-1} – 2,9 %. Вместе с тем, надо обратить более пристальное внимание процессам с наложением волн (малые и средние частоты вращения).

Список литературы:

1. Солодов В.Г., Стародубцев Ю.В., Хандримайлов А.А. Численная модель течения вблизи впускного клапана ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. - №2. – С. 81-84.
2. SuperBike magazine. – Issue 11 November 1999. – Link House Magazines. – С. 43.
3. Белоцерковский О.М., Давыдов Ю.М. Метод крупных частиц в газовой динамике. – М.: Наука. Гл. редакция физ.-мат. литературы, 1982, – 392 с.
4. Воропаев Е.П. Трехмерная газодинамическая модель четырехтактного четырехцилиндрового поршневого ДВС // Двигатели внутреннего сгорания. – 2006. - №2. – С. 54-59.
5. Воропаев Е.П. Модель тепловыделения в поршневом ДВС с принудительным воспламенением для широкого диапазона режимов работы // Вестник двигателестроения. – 2004. - №1. – С. 35-39.

УДК 621.436

А.М. Левтеров, канд. техн. наук, Л.Л. Левтерова, инж., Н.Ю. Гладкова, инж.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ, РАБОТАЮЩЕГО НА БЕНЗОЭТАНОЛЬНЫХ ТОПЛИВНЫХ КОМПОЗИЦИЯХ

Растущий интерес к использованию и производству альтернативных видов топлива (спиртов,

эфиров, биогаза) ставит ряд задач перед их производителями и потребителями. Топлива из спиртового