

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 |
| $G_{s,выбр}$, % | 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 |
| $G_{s,забр}$, % | 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 |
| $G_{г,выбр}$, % | 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 | | |

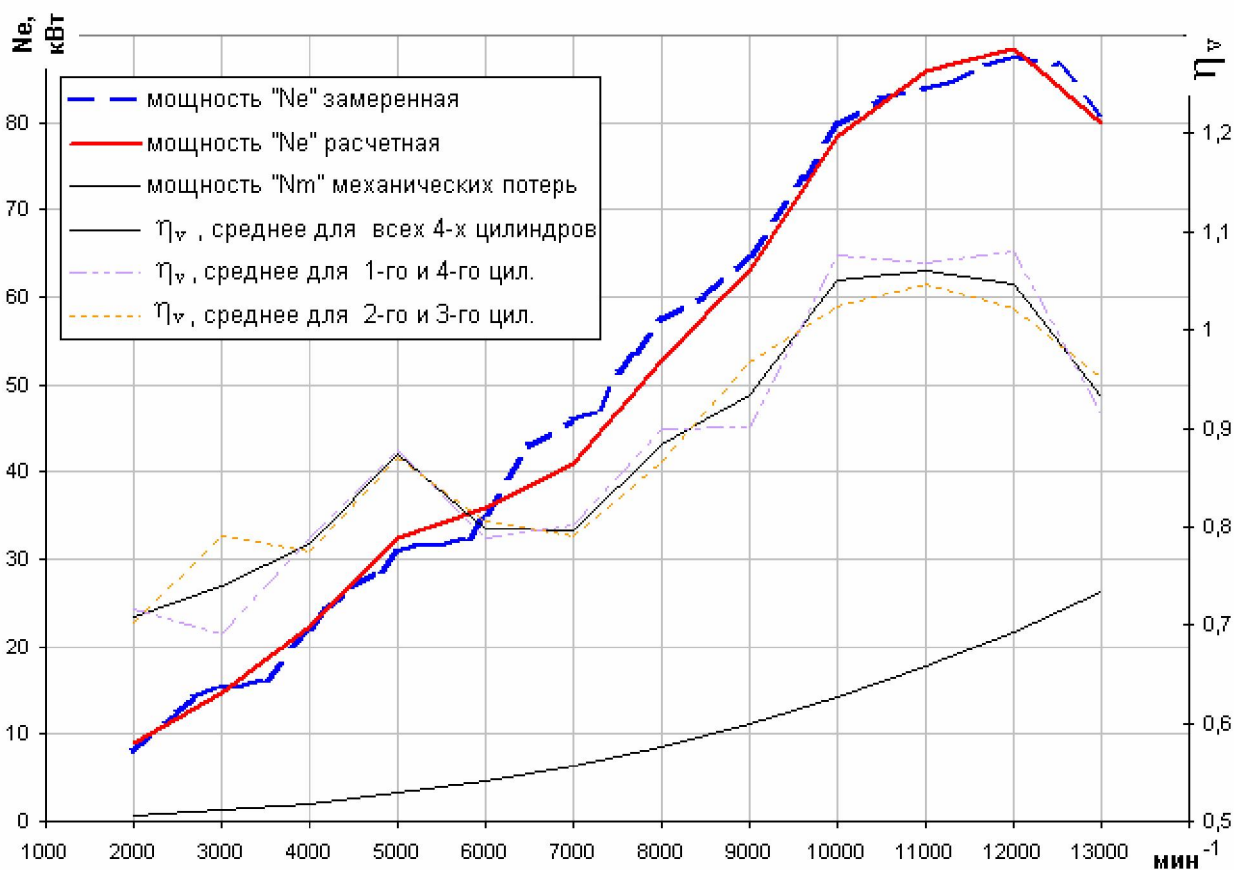


Рис. 1. Внешняя скоростная характеристика

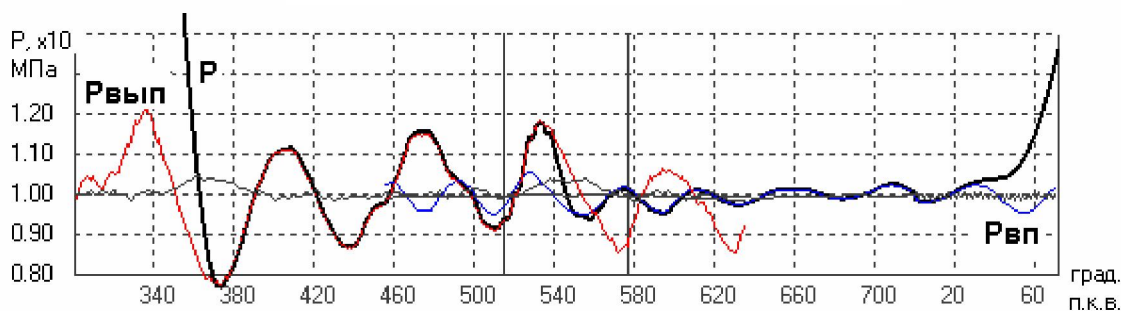


Рис. 2. Диаграмма газообмена, $n=2000 \text{ min}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

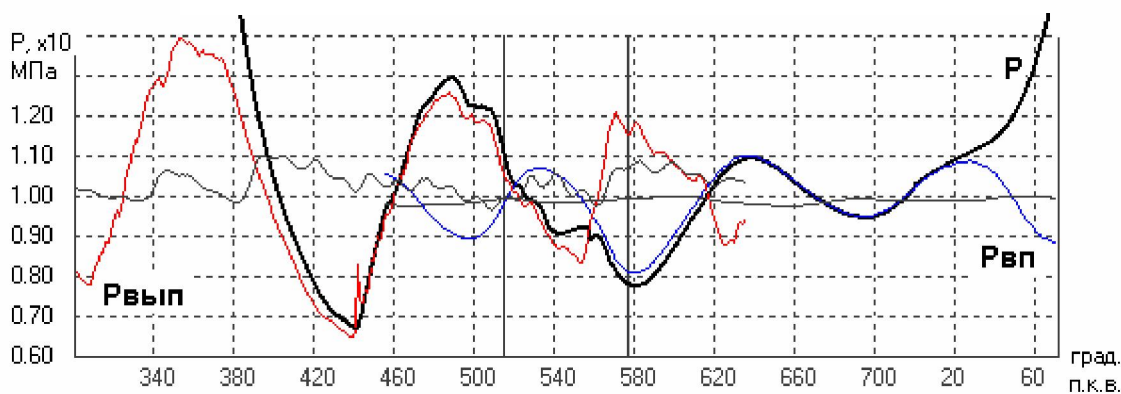


Рис. 3. Диаграмма газообмена, $n=5000 \text{ min}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

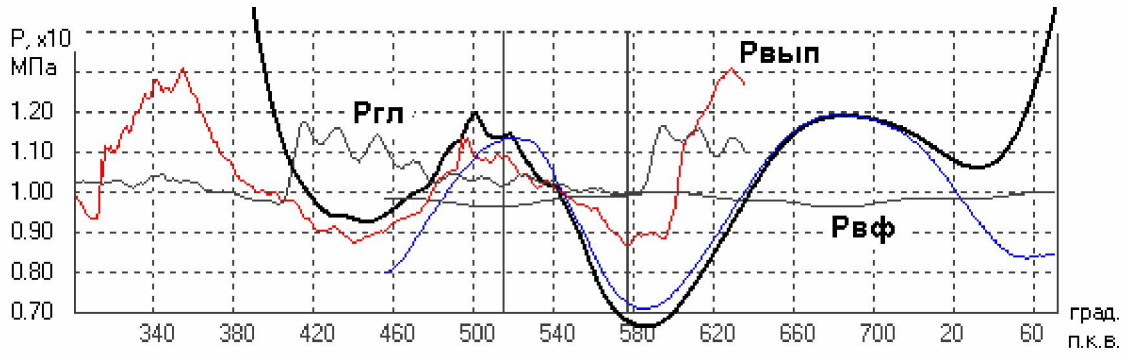


Рис. 2. Диаграмма газообмена, $n=7000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

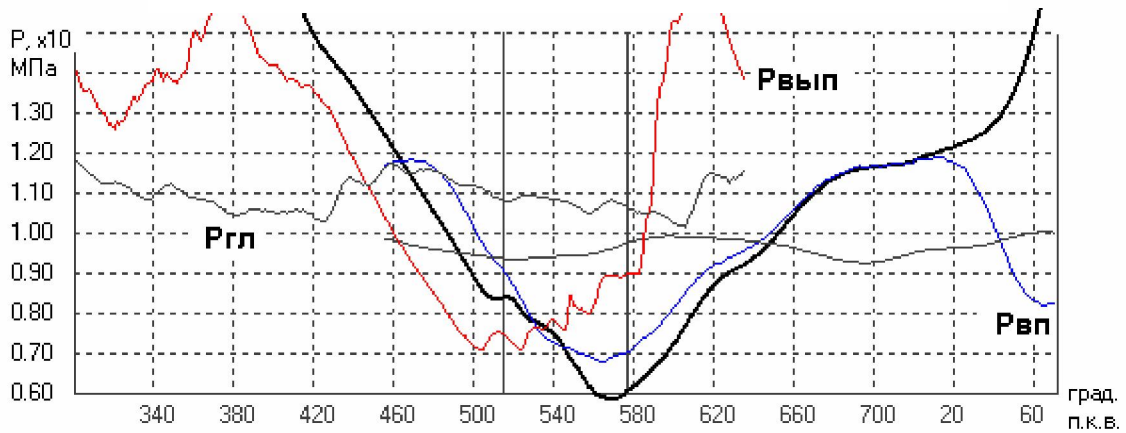


Рис. 5. Диаграмма газообмена, $n=9000 \text{ мин}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

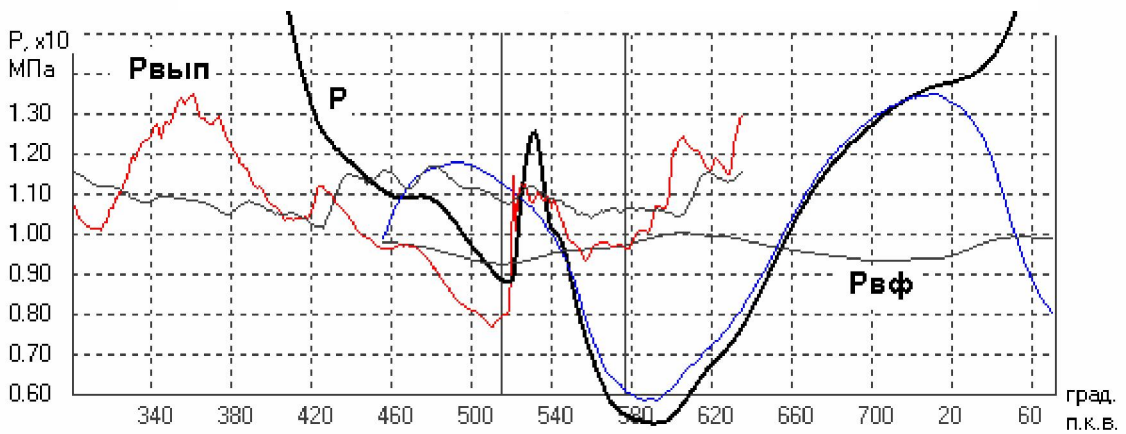


Рис. 6. Диаграмма газообмена, $n=9000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

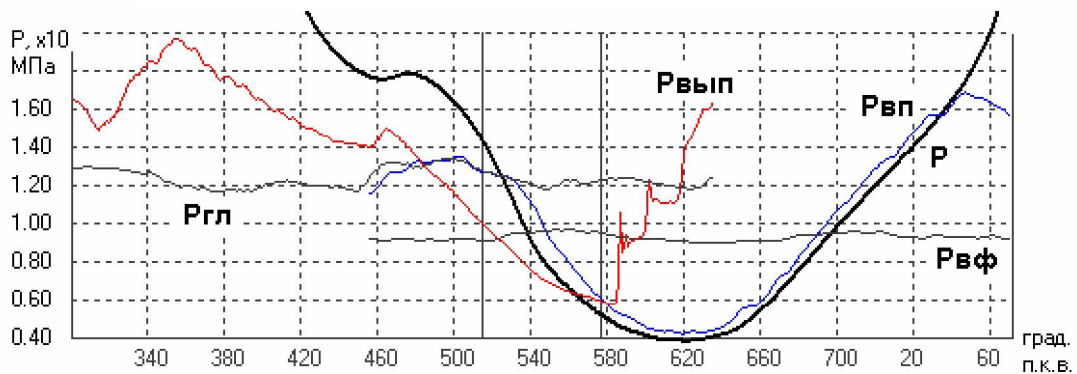


Рис. 7. Диаграмма газообмена, $n=12000 \text{ мин}^{-1}$, 1-й и 4-й цилиндры

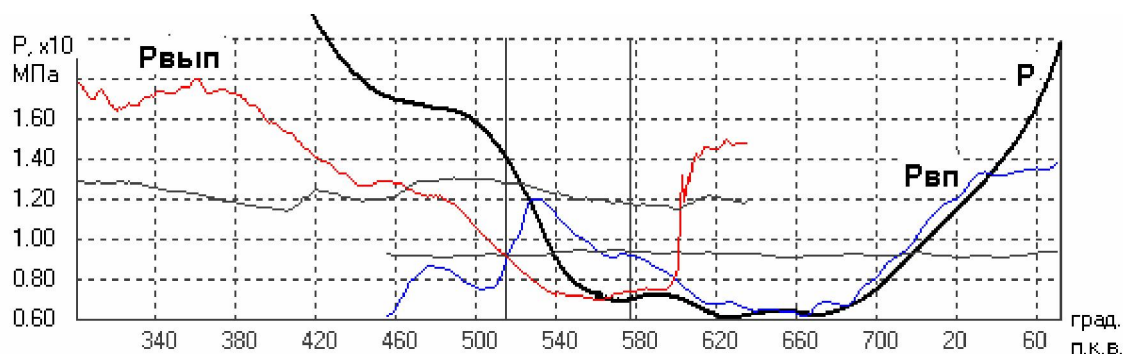


Рис. 7. Диаграмма газообмена, $n=13000 \text{ мин}^{-1}$, 2-й и 3-й цилиндры

По характеристике протекания коэффициента наполнения (см. рис. 1) отчетливо видно, что на частотах вращения ($10000 \div 12000 \text{ мин}^{-1}$) 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