

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ВЫПУСКА В ЧЕТЫРЕХТАКТНЫХ ДВС

А.С. Сорокотяга, доцент, к.т.н., ХГТУСА,  
С.С. Жилин, доцент, к.т.н., ХНАДУ

*Аннотация.* Предложена комбинированная система выпуска отработавших газов через окна, выполненные в цилиндре, и выпускной клапан в головке цилиндра. Приведены результаты расчетного исследования процесса выпуска для дизеля с наддувом и автомобильного бензинового двигателя с комбинированной системой выпуска. Выбраны рациональные параметры системы выпуска отработавших газов.

*Ключевые слова:* предварительный выпуск, эффективность выпуска, проходное сечение окон, фаза открытия окон.

### Введение

Для организации процесса выпуска отработавших газов (ОГ) из цилиндра в четырехтактном ДВС используют выпускную систему с выпускными органами, размещенными в головке цилиндра и включающими выпускной клапан с приводом и выпускной канал. Определяющим органом является выпускной клапан, который с помощью механизма привода должен обеспечивать необходимые проходные сечения в течение процесса выпуска.

### Анализ публикаций

В нефорсированных и низкооборотных ДВС используется одноклапанная система выпуска для одного цилиндра [1], удовлетворяющая требованиям очистки цилиндра и затратам мощности при этом. В современных форсированных ДВС с целью повышения эффективности процесса выпуска увеличивают проходное сечение выпускных органов применением двух выпускных клапанов для одного цилиндра [2]. С целью интенсификации процесса выпуска в начальный период увеличивают скорость подъема выпускного клапана [3] дополнительными специальными устройствами [4]. Для современных уровней форсирования эта система также удовлетворяет требованиям очистки цилиндра, но при

этом существенно усложняется конструкция ДВС и увеличивается его теплонапряженность.

Независимо от степени совершенства существующей выпускной системы, она имеет предельные возможности по увеличению проходного сечения выпускных органов для конкретной размерности ДВС. Конструктивная сложность головки цилиндра и отведение через нее всех ОГ из цилиндра способствуют росту ее теплонапряженности, которая может стать ограничительной для достижения высоких уровней форсирования ДВС. Выпускные клапаны при этом требуют дополнительного охлаждения.

### Цель и постановка задачи

Целью является поиск и исследование новых путей организации эффективного процесса и системы выпуска ОГ из цилиндра ДВС.

Процесс выпуска состоит из предварительного свободного выпуска ОГ и принудительного выталкивания поршнем оставшейся в цилиндре части ОГ.

Предварительный выпуск протекает в начальный период процесса выпуска при движении поршня вблизи нижней мертвой точки (НМТ). При этом количество свободно выхо-

дящих из цилиндра ОГ определяется перепадом давлений  $p_{ц}/p_{в}$  и временем сечения выпускных органов в этот период. Здесь:  $p_{ц}$  – давление в цилиндре, Па;  $p_{в}$  – давление в выпускном канале, Па.

Процесс предварительного выпуска будет оптимальным при достижении перепада  $p_{ц}/p_{в} = 1$ , и является определяющим, так как при этом из цилиндра свободно выйдет максимально возможное количество ОГ, которое превысит 50 %.

Авторами выполнены расчеты процесса выпуска номинального режима работы дизельного двигателя со средним наддувом СМД-62 и бензинового двигателя ВАЗ 2108. Необходимые для анализа результаты приведены в табл. 1, где:  $M_{ОГ}$  – количество ОГ, отводящихся из цилиндра за цикл;  $M_{ОГп}$  – количество ОГ, уходящих из цилиндра в период предварительного выпуска за цикл.

Таблица 1 Результаты расчета выпуска

Двигатель	Результаты расчета		
	$\frac{M_{ОГп}}{M_{ОГ}} \cdot 100, \%$	$\frac{p_{ц}}{p_{в}}$ в начале выпуска	$\frac{p_{ц}}{p_{в}}$ в конце предвар. выпуска
СМД-62	50	3,5	1,2
ВАЗ 2108	40	6,5	3,4

Расчеты показали, что количество ОГ, уходящих из цилиндра в период предварительного выпуска, не достигло максимума, так как отношение  $p_{ц}/p_{в} > 1$  в конце этого процесса. Худшие показатели у двигателей ВАЗ-2108 объясняются тем, что он имеет меньший угол начала открытия выпускного клапана (СМД-60 –  $\varphi_{кл} = 65$  °ПКВ до НМТ; ВАЗ-2108 –  $\varphi_{кл} = 47$  °ПКВ до НМТ), а также меньшую продолжительность по времени предварительного выпуска (СМД-62 –  $n = 2000$  мин<sup>-1</sup>; ВАЗ-2108 –  $n = 5600$  мин<sup>-1</sup>).

Для повышения эффективности предварительного выпуска и процесса выпуска в целом исходных указанных двигателей и при их форсировании можно совершенствовать их системы выпуска традиционным путем, но при этом появятся указанные выше существенные недостатки.

Учитывая определяющее значение процесса предварительного выпуска и то, что этот процесс осуществляется при движении поршня вблизи НМТ, декларативным патентом № 58445 (бюллетень № 7 от 15.07.03) предложен способ, в котором предварительный выпуск осуществляется в выпускной канал, выполненный в блоке цилиндра, через окна, расположенные в цилиндре, в области перемещения поршня вблизи НМТ.

Предложенный способ позволяет оптимизировать процесс предварительного выпуска для широкого диапазона форсирования ДВС, отводить из цилиндра основную часть ОГ кратчайшим путем за пределы ДВС, минуя головку цилиндра, и минимизировать параметры оставшейся в цилиндре части ОГ на начало принудительного их выталкивания. Отведение принудительно выталкиваемой из цилиндра части ОГ обеспечивается при этом простой одноклапанной системой с механическим приводом клапана.

Таким образом, предлагаемый способ выделяет процесс предварительного выпуска отводом ОГ из цилиндра в отдельную систему выпуска со своими преимуществами, обеспечивает применение упрощенной одноклапанной системы принудительного выпуска и объединяется с ней в комбинированную систему выпуска ОГ в ДВС.

Задачей данного исследования является оценка эффективности комбинированной системы выпуска в ДВС.

### Исследование эффективности комбинированной системы выпуска ДВС

Оптимизация процесса предварительного выпуска по предложенному способу осуществляется определением проходного сечения окон цилиндра, обеспечивающего свободное отведение максимального количества ОГ из цилиндра при минимальной продолжительности их открытия для конкретной размерности и заданного уровня форсирования.

Комбинированная система выпуска обуславливает перекрытие фаз начала открытия выпускного клапана головки цилиндра и закрытия окон цилиндра.

Для оценки влияния величины проходного сечения окон цилиндра и продолжительности их открытия по углу поворота коленчатого вала, а также перекрытия указанных фаз, на основные показатели процесса выпуска, и для определения оптимального значения проходного сечения окон цилиндра, выполнены исследования процесса выпуска дизельного двигателя со средним наддувом СМД-62, с использованием трехфакторного расчетного эксперимента.

Процесс выпуска в опорных точках рассчитывался по методике, разработанной на кафедре ДВС ХНАДУ на основе теории профессора Глаголева Н.М.

В качестве варьируемых (табл. 2) приняты следующие факторы:  $\varphi_{\text{кл}}$  – угол начала открытия выпускного клапана головки цилиндра относительно НМТ. При изменении  $\varphi_{\text{кл}}$  сохранялся закон подъема клапана;  $h_o$  – высота окна в цилиндре, мм;  $l_o/l_{\text{оц}}$  – отношение длины дуги, образующей окно по внутренней окружности цилиндра ( $l_o$ ), к длине внутренней окружности цилиндра ( $l_{\text{оц}}$ ). Факторы  $h_o$  и  $l_o/l_{\text{оц}}$  определяют величину проходного сечения окон цилиндра и продолжительность их открытия по углу поворота коленчатого вала.

Таблица 2 План эксперимента

Факторы	Уровень варьирования		
	1	2	3
$h_o$ , мм	12,88	10,335	7,79
$l_o/l_{\text{оц}}$	0,4	0,325	0,25
$\varphi_{\text{кл}}$	25° (до НМТ)	0	25° (после НМТ)

Функциями отклика приняты:

- работа насосных ходов ( $L_{\text{нх}}$ );
- масса ОГ, выходящих из цилиндра в период предварительного выпуска в процентном отношении к общему количеству ОГ, находящихся в цилиндре к началу процесса выпуска ( $\frac{M_{\text{огп}}}{M_{\text{ог}}} \cdot 100, \%$ );
- температура ОГ в цилиндре в конце предварительного выпуска ( $T_{\text{ц}}$ ).

Выполнены расчеты процесса выпуска для опорных точек план-матрицы и определены коэффициенты регрессии функций отклика. Среднеквадратическая погрешность абсолютных значений коэффициентов регрессии функций отклика составила 2 – 3 %. Резуль-

таты планирования эксперимента приведены на рис. 1, 2, 3.

Анализ результатов расчетов позволяет сделать следующие основные выводы:

1) в период предварительного выпуска через окна цилиндра отводится максимальное количество ОГ, соответствующее 62 % от общего количества ОГ за цикл (рис. 1). При этом температура ОГ в цилиндре в конце предварительного выпуска уменьшается на 30 ° (рис. 3);

2) в заданных пределах варьирования факторов имеется область оптимальных значений функций отклика, ограниченная высотой окон цилиндра  $h = 9,6 - 13,4$  мм, что соответствует углу начала их открытия 35-45 °ПКВ до НМТ. Это увеличивает продолжительность расширения газов в цилиндре на 20 – 30 °ПКВ;

3) Угол начала открытия выпускного клапана ( $\varphi_{\text{кл}}$ ) основное влияние оказывает на величину потерь в процессе принудительного выталкивания ОГ из цилиндра. Так, в пределах варьирования  $\varphi_{\text{кл}}$  (50 °ПКВ) работа насосных ходов уменьшается (в оптимальной зоне) на 30 % (рис. 2), а количество отводимых из цилиндра ОГ увеличивается только на 2 %.

На основании анализа функций отклика ( $L_{\text{нх}}$ ,  $M_{\text{огп}}/M_{\text{ог}}$ ,  $T_{\text{ц}}$ ) исследуемого двигателя СМД-62 выбраны два варианта значений факторов варьирования, которые предположительно могут быть оптимальными для двигателя ВАЗ-2108:

- вариант 1 –  $\varphi_{\text{кл}} = 25$  °ПКВ до НМТ,  $h_o = 7,8$  мм,  $l_o/l_{\text{оц}} = 0,4$ ;
- вариант 2 –  $\varphi_{\text{кл}} = 45$  °ПКВ до НМТ,  $h_o = 7,8$  мм,  $l_o/l_{\text{оц}} = 0,4$ ;

Здесь  $h_o = 7,8$  мм соответствует  $\varphi_{\text{кл}} = 45$  °ПКВ до НМТ. Для этих вариантов выполнены расчеты процесса выпуска двигателя ВАЗ-2108 с целью проведения их сравнительного анализа и их сравнения с исходным вариантом.

На рис. 4, 5 приведены графики изменения параметров  $p_{\text{ц}}$ ,  $M_{\text{ог}}$ , по углу поворота коленчатого вала на участке процесса выпуска. Из графиков видно, что при реализации варианта 1 в период предварительного выпуска можно отвести ОГ примерно 75 %, а в конце предварительного выпуска можно достичь соотношения  $p_{\text{ц}}/p_{\text{т}} \approx 1,19$ . При реализации варианта 2 в период предварительного вы-

пуска можно отвести ОГ примерно 77 %, а в конце предварительного выпуска можно достичь соотношения  $p_{ц}/p_{т} \approx 1,05$ , что близко к оптимальному для процесса предварительного выпуска. При этом в пределах изменения  $\varphi_{кл}$  (20 °ПКВ) количество ОГ, отводимых в период предварительного выпуска изменяет-

ся примерно на 2 %, работа насосных ходов – примерно на 6 % и температура ОГ в конце предварительного выпуска – примерно на 60°. Следовательно, в безнаддувном ДВС в период предварительного выпуска через окна цилиндров в выпускной канал блока цилиндра можно отводить ОГ до 75 %.

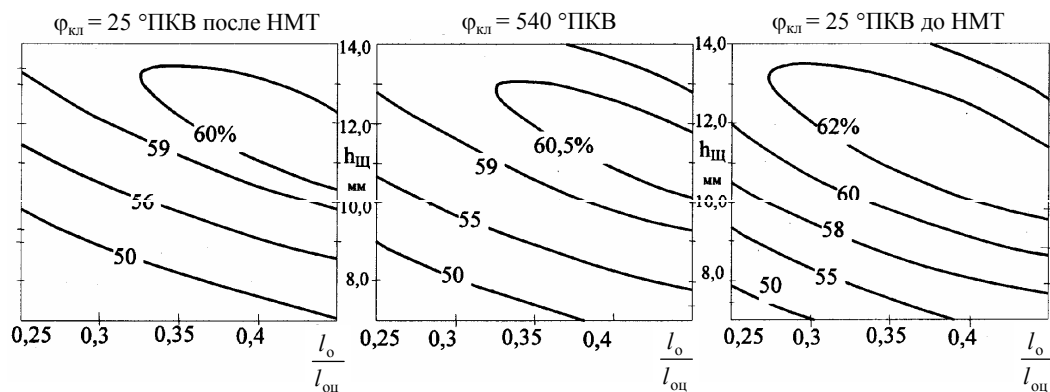


Рис. 1. Количество ОГ, вышедших за период предварительного выпуска

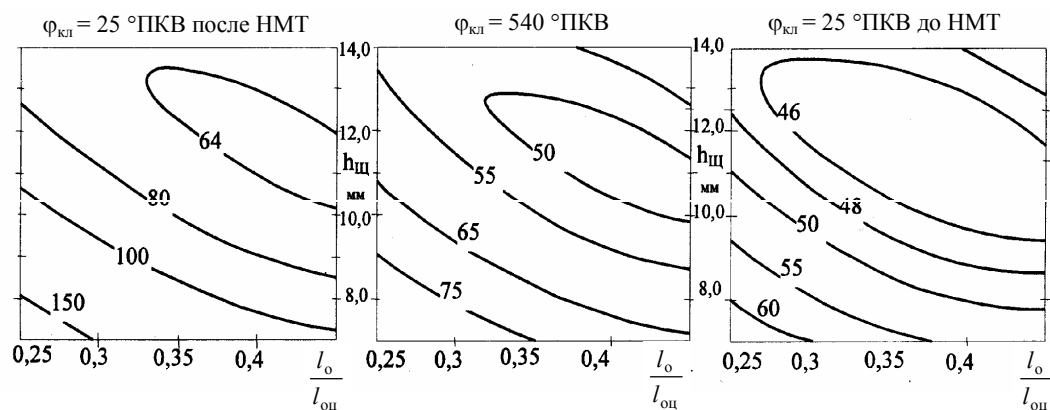


Рис. 2. Работа насосных ходов ( $L_{нх}$ ), затрачиваемая на газообмен

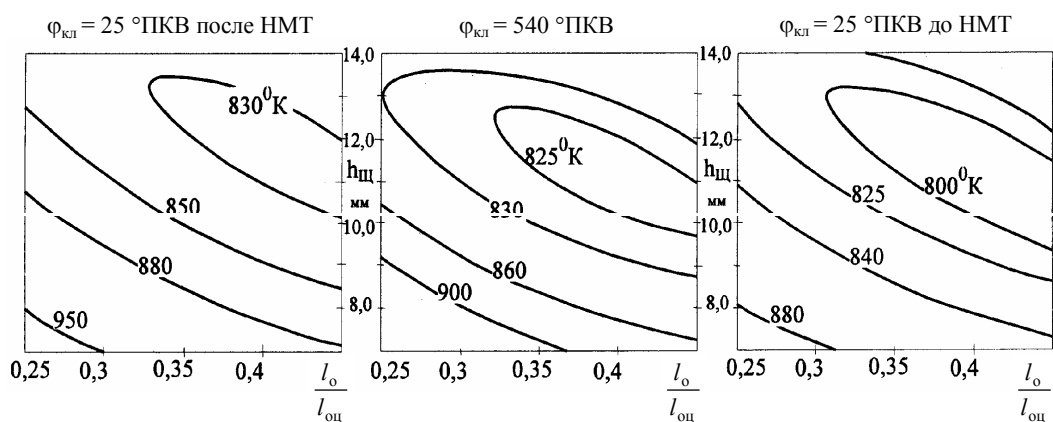


Рис. 3. Температура рабочего тела в цилиндре двигателя в конце периода предварительного выпуска

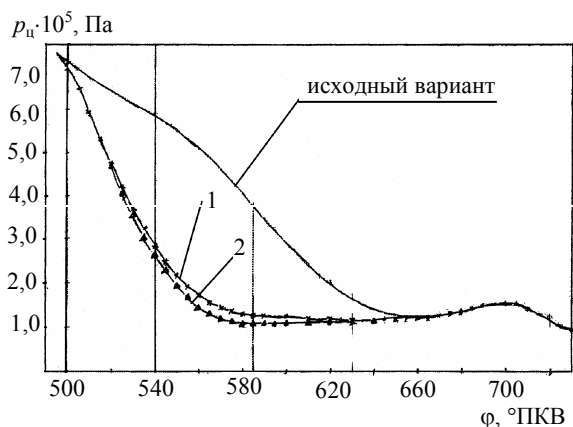


Рис. 4. Изменение давления рабочего тела в цилиндре двигателя на участке процесса выпуска

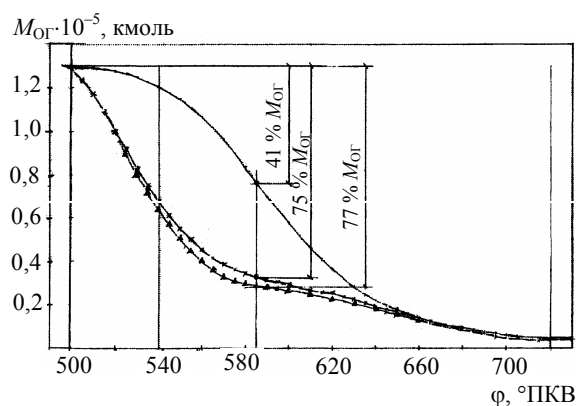


Рис. 5. Изменение количества рабочего тела в цилиндре двигателя на участке процесса выпуска

В сравнении с исходным вариантом, в исследуемых вариантах:

- количество отводимых ОГ в период предварительного выпуска увеличивается примерно в 1,85 раза и может достигать 75 – 77% от общего количества ОГ за цикл;
- работа насосных ходов уменьшается примерно в 2,8 раза;
- температура ОГ в цилиндре к концу предварительного выпуска уменьшается на 370° в варианте 1 и на 430° в варианте 2.

### Выводы

На основе выполненных исследований можно сделать выводы о том, что применение предлагаемого способа позволяет:

- 1) в период предварительного выпуска отводить через окна цилиндра в канал блока до 62 % ОГ в исследуемом двигателе со сред-

- ним наддувом и до 75 % в исследуемом двигателе без наддува;
- 2) снизить потери на газообмен на 30 % в исследуемом двигателе со средним наддувом и примерно в 2,8 раза в исследуемом двигателе без наддува;
- 3) снизить температуру ОГ в цилиндре в конце предварительного выпуска на 30° в исследуемом двигателе со средним наддувом и на 370 – 430° в исследуемом двигателе без наддува;
- 4) увеличить продолжительность расширения ОГ в цилиндре в исследуемых ДВС на 20 – 30 °ПКВ.

Это способствует повышению индикаторных показателей, снижению теплонапряженности и упрощению конструкции головки цилиндра, а также снижению теплонапряженности ДВС в целом.

Предлагаемый способ позволяет форсировать исследованные двигатели по  $p_e$  и  $n$ , так как имеются резервы по оптимизации проходных сечений окон цилиндра с обеспечением допустимых значений угла начала открытия выпускных органов.

### Литература

1. Двигатели внутреннего сгорания: Конструкция и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд. перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
2. Марченко А.П., Рязанцев М.К., Шеховцов А.Ф. Двигуни внутрішнього згорання. Розробка конструкцій форсованих двигунів наземних транспортних машин / За ред. проф. А.П. Марченка та засл. діяча науки України проф. А.Ф. Шеховцова. – Харків: Прапор, 2004. – 384 с.
3. Мацкерле Ю. Современный экономичный автомобиль / Пер. с чешск. В.Б. Иванова; Под ред. А.Р. Бенедиктова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
4. Новые двигатели // Автостроение за рубежом. – 2000. – № 7. – С. 7 – 14.

Рецензент: А.Н. Пойда, профессор, д.т.н., ХНАДУ.

Статья поступила в редакцию 2 октября 2007 г.