

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ОКНОМ В ГИЛЬЗЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ

Л.М. Жмудяк, А.Л. Жмудяк

В результате оптимизационных расчетов определены показатели четырехтактного двигателя с окном в гильзе (ДОГ) при высокой частоте вращения коленчатого вала. При высокой частоте вращения коленчатого вала (средняя скорость движения поршня 21 м/с) продувка через окно практически отсутствует – составляет 0,05%, так как при имеющемся малом перепаде давлений воздух не успевает выйти в окно. Масса выпускных газов, выходящих в окно, близка к массе газов, выходящих через выпускной клапан. Последнее снижает затраты энергии на насосные ходы (повышает работу в период газообмена), что уменьшает индикаторный и эффективный расход топлива на 11% (для исследованного ДВС).

Ключевые слова: поршневой дизельный двигатель, окно в гильзе цилиндра, двойной выпуск газов, высокая средняя скорость поршня, повышение мощности и КПД.

Как отмечено в предыдущих наших статьях, из общих соображений следует, что в двигателе с окном в гильзе (ДОГ) при фиксированном окне в гильзе с ростом частоты вращения продувка через окно уменьшается, а также уменьшается доля выпускных газов, выходящих в окно. Иллюстрация этого приведена в таблице 1, где представлены результаты расчета ДОГ ЧН 13/14. (Параметры данного двигателя выбраны соответствующими перспективным ДВС с очень высокими показателями. В таблице приведены результаты разовых, неоптимизационных расчетов). По таблице видно, что с повышением частоты вращения продувка и доля уходящих в окно выпускных газов уменьшаются.

Дальнейшее повышение частоты вращения, с одной стороны, повышает эффективность ДОГ, так как растет положительное влияние дополнительных проходных сечений в гильзе и растет теплонапряженность, снижение которой обеспечивает схема ДОГ. (Поэтому оптимальные размеры окна с ростом частоты вращения увеличиваются). С другой стороны, при росте частоты вращения давление в цилиндре в НМТ впуска падает, время, отводимое на продувку, уменьшается, подача воздуха в цилиндр требует все больших затрат энергии. В связи с падением давления на впуске возможным и в связи с затратами энергии – рациональным становится вариант ДОГ, у которого, несмотря на всегда открытое окно в гильзе, через это окно выходят выпускные газы на такте расширения, а воздух на такте впуска практически не выходит.

В ЧН 13/14 с невысоким КПД ТК с ростом частоты вращения до 3000 мин⁻¹ оптималь-

ная продувка снижается до 5% (оптимизация только по фазам), а при $n = 4500$ мин⁻¹ продувка практически исчезает. Результаты оптимизации по всем параметрам при $n = 4500$ мин⁻¹ приведены в таблице 2.

Как видно из таблицы, в оптимальном ДОГ (оптимизация 2) продувка через окно практически отсутствует – составляет 0,05%, т.к. при имеющемся малом перепаде давлений воздух не успевает выйти в окно. Масса выпускных газов, выходящих в окно, близка к массе газов, выходящих через выпускной клапан. Последнее снижает затраты энергии на насосные ходы (повышает работу в период газообмена – p_e), что уменьшает индикаторный и эффективный расход топлива на 11% (для данного ДВС с высоким сопротивлением выпуска – один выпускной клапан и на режиме со средней скоростью движения поршня $c_m = 21$ м/с). Оптимум, найденный программой для ДОГ, отличается от оптимальных параметров базового двигателя. Для уменьшения продувки в окно снижено π_k , а потеря мощности компенсирована понижением α , снижением (немалым при данных частотах вращения) затрат энергии на выпуск и (в малой степени) повышением ε , увеличивающим КПД.

Вместе с тем, и при таких высоких частотах вращения, возможно, существует открытие окна, обеспечивающее продувку. Для исследования продувки необходимо повторить оптимизацию, сделав лимитирующими ограничения на тепловые потоки или температуру перед турбиной.

Таблица 1 - Результаты расчетов ДОГ при высоких частотах вращения

Вариант двигателя					
S	D	$\eta_{тк}$	число клапанов		
M		–	впуск.	выпуск.	
0,14	0,13		1	1	

(продолжение таблицы 1)

№	Исходные значения варьируемых параметров									Показатели цикла		
	α	ε	θ	φ_b	φ'_b	$\varphi_{ок}$	φ_a	φ'_a	π_k	g_i	g_e	$g_e^{y,\varepsilon}$
	°ПКВ									г/(кВт.ч)		
1	2,22	16,0	-3,9	140	390	140	590	340	3,08	160,1	187,7	186,0
2	2,22	16,0	-3,9	140	390	140	610	340	3,08	160,8	182,2	179,9
3	1,70	16,0	-3,9	140	390	140	610	340	3,08	171,7	187,2	185,3

(продолжение таблицы 1)

№	Показатели цикла										
	p_i	p_e	$p_e^{y,\varepsilon}$	p_{max}	p_k	p_x	p_m	p_e	$p_{н.х.}$	$T_{ок}$	
	МПа										К
1	1,65	1,41	1,42	16,9	0,294	0,287	0,239	0,215	-0,016	747	
2	1,75	1,55	1,56	18,7	0,294	0,287	0,251	0,235	-0,005	726	
3	2,14	1,96	1,98	19,7	0,294	0,287	0,243	0,314	-0,020	777	

(продолжение таблицы 1)

№	Показатели цикла										Примечания
	γ_r	ψ	x_w	Q_r	Q_w	$m_{ок}/m_T$	$\delta_{пр}$	$T_{м.кл}$	$T_{тк}$		
	–		%	Дж/цикл		–	%	К			
1	0,011	1,33	12,6	258	783	1,60	23,9	676	703	$n = 2300 \text{мин}^{-1}$	
2	0,010	1,42	14,1	308	931	1,83	30,5	645	675	$n = 1800 \text{мин}^{-1}$	
3	0,008	1,64	16,1	451		2,59	39,2	668	699	$n = 1380 \text{мин}^{-1}$	

Таблица 2 - Результаты расчетов ДОГ

Вариант двигателя					
S	D	$\eta_{тк}$	n	число клапанов	
M		–	мин ⁻¹	впуск.	выпуск.
0,14	0,13	0,569	4500	1	1

(продолжение таблицы 2)

№	Исходные и оптимальные значения варьируемых параметров									Показатели цикла			
	α	ε	θ	φ_b	φ'_b	$\varphi_{ок}$	φ_a	φ'_a	π_k	b	g_i	g_e	$g_e^{y,\varepsilon}$
	°ПКВ									г/(кВт.ч)			
1	1,86	10,7	-3,2	116	367	–	546	296	5,75	–	241,7	319,8	319,8
2	1,60	13,2	-1,7	140	398	146	546	318	4,28	0,6	214,3	283,5	283,5

(продолжение таблицы 2)

№	Показатели цикла										
	p_i	p_e	p_{max}	p_k	p_x	p_m	p_e	$p_{н.х.}$	$T_{ок}$	T_m	$T_{тк}$
	МПа										К
1	1,666	1,259	13,0	0,548	0,536	0,392	-0,02	-0,406	1063	–	1063
2	1,666	1,260	13,1	0,408	0,399	0,281	0,204	-0,118	1052	984	1018

(продолжение таблицы 2)

№	Показатели цикла										Примечания
	γ_r	ψ	x_w	Q_r	Q_w	$m_{ок}/m_T$	$\delta_{пр}$	π_T	$l_{ок}$		
	–		%	Дж/цикл		–	%	–	мм		
1	0,036	0,92	8,33	205	733	0	0	3,90	140,0	оптимизация базовый	
2	0,051	1,05	9,09	204	708	0,894	0,05	2,69	130,9	оптимизация	

Выполненное выше исследование ДОГ с ТК при $p_k/p_m > 1$ позволяет кратко описать особенности его работы. При описании под низкими p_k/p_m понимаются p_k/p_m , незна-

чительно превышающие единицу, а высокие p_k/p_m соответствуют перспективным ДВС с высокими КПД ТК и форсированием.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ С ОКНОМ В ГИЛЬЗЕ ПРИ ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ ВРАЩЕНИЯ

1. Продувка 10–13% (масса воздуха, проходящего через цилиндр и окно вблизи НМТ впуска составляет 10–13% от массы поступившего в цилиндр воздуха) не снижает индикаторных и эффективных показателей (включая мощность) при низких p_k / p_m и незначительно повышает эти показатели при высоких p_k / p_m . До 13–23% продувку и соответствующее снижение теплонапряженности можно довести без снижения эффективного расхода топлива (но с незначительным снижением мощности). Большая цифра относится к двигателям с высокими p_k / p_m и оптимальным уровнем форсирования по среднему эффективному давлению p_e .

2. Небольшое увеличение π_k в двигателе с окном в гильзе позволяет восстановить p_{max} и мощность ДОГ до уровня базового двигателя. С использованием такой компенсации потерь мощности продувку в ДОГ без снижения мощности и экономичности можно довести до 15–18% при низких p_k / p_m и до 35–42% при больших p_k / p_m . Дальнейшее увеличение продувки вызывает плавное повышение эффективного расхода топлива и быстрое снижение мощности.

3. В ДОГ с рассматриваемыми окнами и продувкой температура газов на 40–180° ниже, чем в базовом двигателе. Расходы выпускных газов, выходящих в окно и выпускной клапан сравнимы. Большой поток выпускных газов в окно существенно снижает теплонапряженность головки цилиндров и затраты энергии на выпуск. (Облегчение выпуска компенсирует затраты энергии на продувку).

4. При неизменных размерах окна и величине π_k с ростом частоты вращения в связи с падением давления в цилиндре вблизи НМТ впуска продувка практически прекращается, а выпускные газы выходят через окно в меньшем, но сравнимом с выпуском через выпускные клапаны количестве.

Снижение теплонапряженности головки (происходящее как от уменьшения потока выпускных газов, так и от продувки) можно оценить величиной продувки ($\delta_{пр}$). Снижение теплонапряженности остальных деталей цилиндро–поршневой группы можно оценить половиной величины продувки.

При такой оценке можно сказать, что в ДОГ теплонапряженность головки снижается на 10–40%, а теплонапряженность поршня на 5–20%.

Рассмотрим использование ДОГ с постоянно открытым окном. Такой ДОГ целесообразно применять, когда основными по частоте эксплуатации являются два режима: 1) пуск и близкие к нему режимы холостого хода и малых нагрузок; 2) режимы полных нагрузок.

Режим 2 имеет варианты. 2а– номинальный режим высокооборотного дизеля. 2б– номинальный режим при обычных скоростях поршня. 2в– работа по регуляторной характеристике.

В варианте 2а при высоких средних скоростях поршня (в районе 15–20 м/с) можно получить два эффекта. Первый – при практически нулевой продувке повышение показателей за счет облегчения выпуска, второй – продувка с незначительным улучшением показателей или без их улучшения. Очевидно, возможна и комбинация эффектов. В варианте 2б ДОГ обеспечивает снижение теплонапряженности или форсирование, соответствующее снижению уровня теплонапряженности.

Целесообразность повышения уровня форсирования двигателя очевидна. Причем у дизелей с уровнем форсирования ниже оптимального повышение форсирования по p_e снижает удельный расход топлива. Снижение теплонапряженности по сравнению с базовым двигателем можно использовать двояко: понизить мощность вентилятора (это незначительно повышает показатели двигателя) или уменьшить габариты системы охлаждения двигателя (блока цилиндров, головки и т.п.). Упрощение конструкции за счет последнего мероприятия может быть сравнимо с усложнением конструкции ДОГ по сравнению с базовым дизелем. Если в базовом дизеле лимитирующей являлась теплонапряженность головки, то схема ДОГ позволяет снизить теплонапряженность или увеличить форсирование на 10–40%. Если в базовом двигателе лимитирующей являлась теплонапряженность поршня, то в ДОГ теплонапряженность снижается или форсирование повышается на 5–20%.

Когда повышение уровня форсирования лимитируется температурой газов перед турбиной, в ДОГ по сравнению с базовым ДВС форсирование можно увеличить на столько, что температура газов перед турбиной повысится на 40–180° и станет равной температуре газов в базовом двигателе.

В варианте 2в при работе по регуляторной характеристике (по её корректорной вет-

ви) ДОГ настраивается на режим максимального крутящего момента.

Если схема ДОГ используется для снижения теплонапряженности, то при продувке до 10% π_k не меняется. При больших продувках π_k следует незначительно повысить. При регулируемом ТК это повышение π_k уменьшается с ростом частоты вращения, ввиду уменьшения продувки. При нерегулируемом ТК с повышением частоты вращения, чтобы компенсировать повышение p_{max} и p_e , вызванные повышением π_k , α повышается больше, чем в базовом ДВС.

Когда ДОГ используется для повышения p_e , π_k повышается существенно (а ε снижается, чтобы выдержать уровень p_{max} базового дизеля). При регулируемом ТК с возрастанием частоты вращения коленчатого вала π_k должно снижаться. Это снижение обусловлено тем, что уменьшается продувка, следовательно, возрастает p_{max} . При нерегулируемом ТК с возрастанием частоты вращения снижение p_e обеспечивается только коэффициентом избытка воздуха.

Выше рассмотрено использование ДОГ с постоянно открытым окном. При окне, перекрываемом в функции нагрузки (например, поворачиваемым в функции нагрузки золотником в форме полый трубы), ДОГ можно использовать при работе на переменных нагрузках. Для этого окно открывают на режиме пуска и холостого хода, а также на полных нагрузках. На остальных режимах окно закрывают.

Увеличивая частоту вращения по сравнению с частотой максимального крутящего момента, рационально открывать окно в гильзе и на тактах впуска-сжатия, чтобы сохранять продувку. Особенно рационально открывать окно при нерегулируемом ТК. Тогда открытие окна не только сохраняет продувку, но и препятствует повышению p_{max} сверх допустимых значений.

(Как известно, если не принять специальных мер, π_k повышается с ростом частоты вращения по внешней скоростной характеристике. Регулируемое окно в гильзе предоставляет еще один метод снижения p_{max} по внешней скоростной характеристике: увеличение открытия окна, а следовательно, и продувки с ростом частоты вращения. Краткое исследование этого метода не выявило его преимуществ по сравнению с обычным повышением α . Если преимущества существуют, то для их обнаружения нужны основательные исследования. Возможно, более отчетливо эти преимущества проявятся при высоких p_k / p_m и значительном росте КПД ТК с частотой вращения.)

В заключение оценим рациональность внедрения ДОГ. Поскольку ДОГ даже с постоянно открытым окном (без механизма его закрывания) немного сложнее традиционного дизеля, область его применения ограничена не только рассмотренными выше режимами, но и эффективностью. Поэтому использование ДОГ при отношении p_k / p_m , мало превышающем единицу, вряд ли целесообразно, кроме случая очень высоких частот вращения коленчатого вала (точнее, высоких средних скоростей поршня).

При $p_k / p_m > 1,25$ ДОГ конкурентоспособен, если лимитирующими являются теплонапряженности головки и/или турбины ТК. При $p_k / p_m > 1,4$ использование ДОГ рационально и тогда, когда по теплонапряженности лимитирующим является поршень. При таких p_k / p_m уже можно исследовать замену обычного внешнего охлаждения внутренним, осуществляемым продувкой.

Жмудяк Л.М., д.т.н., проф.,

Жмудяк А.Л., к.т.н.,

АлтГТУ им. И.И. Ползунова, Барнаул,

e-mail: ljmoudiak@hotmail.com,

тел. (3852)368408.

Работа выполнена в порядке реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы