

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА РЕЖИМАХ ХОЛОСТОГО ХОДА ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАЗРАБОТАННОГО НА БАЗЕ ДИЗЕЛЯ

THE STUDY OF POSSIBILITIES FOR REDUCING FUEL CONSUMPTION FOR NATURAL GAS ENGINE BASED ON DIESEL AT IDLE SPEED

Д.В. АПЕЛИНСКИЙ, к.т.н.
В.В. ГУСАРОВ, к.т.н.
В.М. ФОМИН, д.т.н.

Московский политехнический университет, Москва,
 Россия, mixalichDM@mail.ru

D.V. APELINSKIY, PhD in Engineering
V.V. GUSAROV, PhD in Engineering
V.M. FOMIN, DSc in Engineering

Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia,
 mixalichDM@mail.ru

Конвертация дизельных двигателей для работы на газе – важная народнохозяйственная задача. При этом газовая модификация двигателя имеет ряд принципиальных отличий от дизельного: принудительное зажигание вместо самовоспламенения от сжатия; как правило, внешнее смесеобразование вместо внутреннего; количественное регулирование нагрузки – дроссельной заслонкой – вместо качественного. Последнее обстоятельство является одной из главных причин ухудшения экономичности газовой модификации особенно на малых режимах, что объясняется существенным увеличением насосных потерь при уменьшении нагрузки путем дросселирования. Наибольшее значение таких потерь соответствует режиму холостого хода двигателя. Авторы рассмотрели возможность повышения экономичности газовой модификации за счет реализации цикла Миллера, где уменьшение нагрузки достигается за счет регулирования фаз газораспределения – в основном, продолжительности и момента закрытия впускного клапана. В таком случае уменьшение нагрузки достигается без применения дросселирования топливовоздушной смеси. Анализ выполнен расчетным методом, для чего была разработана специальная программа, учитывающая основные физические процессы работы газового двигателя на малых режимах работы. Рассмотрено несколько вариантов улучшения экономичности на малых режимах работы применительно к принятому за прототип двигателю типа КАМАЗ-820.74-300, включая возможность обеднения рабочей смеси, увеличения степени сжатия, регулирования нагрузки только за счет фаз газораспределения. Найдены значения температур и давлений в характерных точках индикаторной диаграммы, а также значения индикаторного коэффициента полезного действия, расхода топлива и других параметров для пяти исследованных вариантов реализации холостого хода. Представлены расчетные индикаторные диаграммы для рабочего процесса по циклу Миллера на холостом ходу. Показан оптимальный вариант, где возможное повышение топливной экономичности на режиме холостого хода составляет 25 % по сравнению с прототипом.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, газовые двигатели, режим холостого хода, цикл Миллера, экономичность двигателя, насосные хода, фазы газораспределения, регулирование фаз газораспределения.

Diesel-to-natural gas engine conversion is an important economic task. In this modification the gas engine has some fundamental differences from the diesel: forced ignition is replaced by Compression ignition; as a rule, external mixture formation instead internal mixture formation; the quantitative load control using throttle – instead quality load control. The latter is one of the main reasons for the deterioration of the fuel economy of the gas engine especially at low loads, because of the significant increase in pumping losses when reducing the load by throttling. The greatest value of such losses is on the idle speed. The authors considered the possibility of increasing the efficiency of the gas modification due to the implementation of the Miller cycle, where the load reduction is achieved by variable valve timing – mainly the valve Duration and intake valve closing angle. In this case, the load reduction is achieved without the use of throttling the fuel / air mixture. The analysis is performed using a calculation method, which was developed a special program takes into account the main physical processes of the gas engine at low operating conditions. The authors considered several options for improving fuel economy at engine low load operation for the engine KAMAZ-820.74-300, including the possibility of using lean air fuel mixture, increasing the compression ratio, load management using changing valve timing. The authors defined the values of temperature and pressure at characteristic points of the pressure volume diagram, and the values of indicated thermal efficiency of an engine, fuel consumption and other parameters for the five variants of idling. The authors presented the calculated pressure volume diagrams of a Miller cycle at idle. The authors have shown the best option, where possible fuel economy improvement at idle is 25 % compared to the base engine.

Keywords: internal combustion engine, gas engines, idling, Miller's cycle, fuel economy of the engine, pump speed, valve timing, variable valve timing.

Введение

В сфере современного двигателестроения наметилась устойчивая тенденция по расширению применения природного газа в качестве моторного топлива для автотракторных двигателей. В РФ эти работы предусмотрены «Комплексным планом мероприятий по расширению использования природного газа в качестве моторного топлива». В большинстве случаев технология перевода двигателя на питание природным газом реализуется на основе конвертации серийного дизеля в газовый двигатель с внешним смесобразованием и количественным регулированием путем доработки головки блока цилиндров с заменой форсунки на свечу зажигания и оснащения двигателя аппаратурой подачи газа во впускной тракт. Подобная технология конвертации дизеля в газовый двигатель достигается ценой меньших производственных затрат благодаря тому, что не требуется создания новых производственных мощностей по производству собственно газовых двигателей.

Хотя вопросам совершенствования рабочего процесса газовых двигателей, созданных на базе дизелей, посвящено достаточно много исследований, среди них мало работ, относящихся к особенностям рабочих процессов на сверхнизких режимах, включая холостой ход. А между тем в современных условиях эксплуатации транспортно-технологических средств, в том числе и в сфере АПК, существенную долю режимов составляют именно режимы холостого хода.

Поскольку для этих режимов типичны высокие удельные расходы топлива и пониженные экологические качества, то актуальной проблемой современного двигателестроения является дальнейшее совершенствование эксплуатационных экономических и экологических показателей режимов холостого хода. В настоящее время разрабатываются и реально применяются различные методы и средства совершенствования показателей режимов холостого хода. К ним относятся методы и средства совершенствования протекания процессов топливоподачи, совершенствования рабочих процессов на этих режимах и т.д.

Малоизученным в исследовательской практике направлением, связанным с улучшением топливной экономичности газового двигателя на режимах холостого хода, остается направление, которое основано на применении цикла

Миллера. Здесь рабочий процесс реализуется при оптимальном регулировании продолжительности такта впуска путем варьирования углом закрытия впускного клапана. При этом, на сегодняшний день технические средства для текущего изменения момента закрытия клапана общеизвестны и широко используются в современных механизмах газораспределения с изменяемыми фазами газообмена [1].

Цель исследования

Основной целью исследования являлось выявление потенциальных возможностей по повышению топливной экономичности газового двигателя типа КАМАЗ-820.74-300, созданного на базе семейства дизелей КАМАЗ размерности S/D=130/120, на режимах холостого хода.

Методика и результаты исследования

Одна из главных причин пониженной экономичности конвертированного газового двигателя на режимах холостого хода связана с необходимостью реализации количественного способа регулирования. Как известно, при количественном способе регулирования двигателя с использованием дроссельного узла существенно возрастают потери рабочего цикла на осуществление газообмена – насосные потери.

В этой связи представляется целесообразным исследование возможностей уменьшения этих потерь газовых двигателей за счет реализации бездроссельного способа регулирования нагрузкой, который может быть реализован на базе цикла Миллера, предусматривающего возможность варьирования в заданных пределах фазами газораспределения.

В ходе исследования дополнительно изучались вопросы целесообразности применения частично качественного регулирования путем изменения (например, обеднения) качественного состава топливовоздушной смеси. Для газовых двигателей, работающих на природном газе (метане), это представляется оправданным в связи широкими качественными пределами устойчивого горения метано-воздушных топливных смесей. Например, верхняя граница обеднения смеси по коэффициенту избытка воздуха соответствует $\alpha = 1,5$ [2].

Для проведения исследования авторами была разработана специальная программа расчета, позволяющая учитывать реальные физические процессы двигателя, организованные на базе цикла Миллера.

Характер подвода теплоты к рабочему телу (тепловыделение) оценивали на основе модели сгорания, предложенной И.И. Вибс:

$$X_{\varphi} = 1 - e^{-A \left(\frac{\varphi}{\varphi_z}\right)^{m+1}},$$

где X_{φ} – относительная доля теплоты, выделившейся к моменту поворота коленчатого вала на угол φ после начала горения; A – параметр, учитывающий полноту сгорания цикловой дозы топлива; φ_z – угол поворота коленчатого вала, соответствующий концу горения, m – показатель характера горения.

Процесс наполнения цилиндров свежим зарядом с учетом свойств газообразного топлива и особенностей цикла Миллера оценивали коэффициентом наполнения $\eta_{вф}$ в виде:

$$\eta_{вф} = \eta_{вп} \cdot \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_T \cdot \alpha \cdot l_0}\right) \cdot K,$$

где $\eta_{вп}$ – значение коэффициента наполнения для случая традиционной работы двигателя; ρ_a и ρ_T – плотности воздуха и газового топлива метана соответственно, кг/м³; α – коэффициент избытка воздуха; l_0 – массовый стехиометрический коэффициент газового топлива, кг возд./кг топл.; K – коэффициент, учитывающий уменьшение наполнения цилиндра вследствие изменения угла закрытия впускного клапана: $K = \frac{V_3}{V_a} \leq 1$; V_3 – объем надпоршневого пространства в момент закрытия впускного клапана, м³; V_a – полный объем цилиндра, м³.

На каждом шаге расчета определялись текущие тепловые потери dQ_w за цикл с использованием уравнения Ньютона – Рихмана:

$$dQ_w = k \cdot (T - T_{ст}) \cdot F_{ст} \cdot dt,$$

где k – коэффициент теплоотдачи; T – текущая температура рабочего тела; $T_{ст}$ – температура поверхности теплообмена; $F_{ст}$ – площадь поверхности теплообмена; dt – промежуток времени расчетного шага: $dt = d\varphi \cdot (6 \cdot n)$; $d\varphi$ – задаваемый интервал угла поворота расчетного шага; n – частота вращения коленчатого вала двигателя.

Заметим, что характерной особенностью режимов холостого хода является высокая доля тепловых потерь через теплообменные поверхности, достигающих 41 % от всей введенной с топливом теплоты, что обусловлено малой частотой вращения. Кроме того, на этих режимах значение коэффициента остаточных газов существенно выше, чем на номинальном

режиме, что связано с особенностями количественного регулирования нагрузки.

Предложенная расчетная программа позволяла определять текущие значения температур, давлений, состав рабочего тела и продуктов сгорания на отдельных этапах протекания рабочего цикла с угловым интервалом в 1° угла поворота коленчатого вала, оценивать основные параметры: индикаторный КПД η_i , среднее индикаторное давление P_i , коэффициент остаточных газов γ_r , оптимальный угол опережения воспламенения $\theta_{зж}^0$, соответствующее максимальной работе исследуемого цикла.

Задание конструктивных параметров осуществляли по данным принятого прототипа – 8-ми цилиндрового газового двигателя типа КАМАЗ-820.74-300 с рабочим объемом 11,76 литра. Расчеты проведены для режима работы, характеризуемого значением среднего индикаторного давления $P_i = 0,135$ МПа при частоте вращения $n = 600$ мин⁻¹, что соответствует параметрам холостого хода прототипа. В качестве основного исходного условия было принято условие идентичности работы циклов для всех нижеприведенных расчетных вариантов организации рабочего процесса двигателя.

Были исследованы следующие пять вариантов организации рабочего процесса газового двигателя на данном режиме работы.

При исследовании *первого варианта* организации рабочего процесса были приняты штатные (заводские) значения коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,0$, степени сжатия $\epsilon_r = 12,0$. Фазы газораспределения приведены в таблице 1. Общая продолжительность угла открытия впускного клапана для этого варианта составляет 235°. В этом случае режим холостого хода обеспечивался за счет соответствующего дросселирования топливовоздушной смеси с помощью традиционной заслонки.

Установлено, что штатный режим работы осуществляется при уровне дросселирования, соответствующем значению давления в цилиндре в начале такта сжатия, т.е. $P_{ц.НМТ} = 0,025$ МПа. Величина индикаторного КПД в этом случае соответствовала $\eta_i = 0,263$, а часовой расход газа – $G_r = 3,17$ м³/ч.

В таблице 1 приведены расчетные значения других параметров рабочего процесса для этого варианта: максимальные давление P_z и температура T_z^0 , давление P_b и температура T_b^0 в цилиндре в момент открытия выпускного клапана, коэффициент остаточных газов γ_r ,

доля относительных потерь на осуществление «насосных ходов» $L_n\%$.

Второй вариант организации рабочего процесса газового двигателя отличался от первого значением коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,4$. В этом случае выход на режим холостого хода обеспечивается с использованием количественно-качественного регулирования – частичное уменьшение нагрузки происходит не только за счет дросселирования рабочей смеси, но и за счет ее обеднения. При выборе такого варианта исходили из общих физических представлений о возможностях улучшения экономичности на режимах холостого хода: во-первых, обеднение топливной смеси позволяет уменьшить уровень дросселирования и, соответственно, снизить работу «насосных потерь», во вторых, при этом уменьшаются потери тепла с выпускными газами из-за меньшей теплоемкости продуктов сгорания.

Результаты расчета свидетельствует, что во втором варианте значение индикаторного КПД действительно увеличилось и достигло значения $\eta_i = 0,277$. Соответственно уменьшился и часовой расход газового топлива, который составил $G_r = 3,01$ м³/ч. Основные данные этого режима приведены в таблице 1. Здесь важно заметить, что при увеличении коэффициента избытка воздуха существенно (примерно на 400 °С) уменьшилась максимальная температура цикла T_z^0 , что создает предпосылки для

существенного уменьшения доли токсичных окислов азота в составе выпускных газов [4]. Поэтому во всех последующих вариантах задавали именно эту величину коэффициента избытка воздуха.

В третьем варианте организации рабочего процесса газового двигателя исследовали эффективность применения цикла Миллера для реализации режима холостого хода. Ранее авторами была показана целесообразность такого цикла для прототипа исследуемого двигателя на режимах номинальных нагрузок за счет возможности увеличения степени сжатия до величины $\epsilon_r = 16$ без опасности детонационного сгорания [5]. Поэтому в данном варианте и последующих вариантах исследования задавали именно эту величину геометрической степени сжатия.

Как известно, существует два способа реализации цикла Миллера, их обычно называют «короткое сжатие» и «короткий впуск» [6]. Для наглядности на рисунке 1 представлена графическая иллюстрация фаз газораспределения, используемых в выполненных исследованиях.

В данном варианте исследования было принято, что уменьшение подачи топливовоздушной смеси для снижения нагрузки двигателя осуществляют за счет «укорочения сжатия», т.е. путем увеличения продолжительности открытия впускного клапана. Выявлено, что в этом случае заданный режим холостого хода

Таблица 1

Расчетные параметры для пяти вариантов организации рабочего процесса двигателя типа КАМАЗ-820.74-300 на режиме холостого хода: $n = 600$ мин⁻¹, $P_i = 0,135$ МПа

Параметры	№ варианта				
	1	2	3	4	5
ϵ_r	12	12	16	16	16
α	1,00	1,40	1,40	1,40	1,40
$\varphi_{вп.от.}^0 / \varphi_{вп.зк.}^0$	25/30	25/30	25/131	25/(-128)	25/(-128)
$\varphi_{вып.от.}^0 / \varphi_{вып.зк.}^0$	30/30	30/30	30/30	30/30	81/30
$P_{ц.НМГ}$, МПа	0,025	0,030	0,090	0,022	0,022
γ_r , %	25,9	21,2	19,4	19,8	19,2
P_z , МПа	1,54	1,36	1,38	1,43	1,43
T_z^0 , К	2432	2004	1831	1922	1862
P_b , МПа	0,064	0,061	0,053	0,055	0,090
T_b^0 , К	837	800	682	713	950
L_n , %	14,9	14,6	2,3	10,0	10,6
η_i	0,263	0,277	0,322	0,318	0,330
G_r , м ³ /ч	3,17	3,01	2,59	2,62	2,53

реализуется при угле закрытия впускного клапана спустя 131° поворота коленчатого вала после НМТ, так что общая продолжительность его открытия составляет 336° . При этом к моменту начала фактического сжатия в цилиндре остается только небольшая доля топливной смеси, необходимая для организации режима холостого хода. Таким образом, нагрузка регулируется только путем изменения угла закрытия впускного клапана (чем позднее закрывается клапан, тем меньше нагрузка).

Недостатком такого способа регулирования (в сравнении с вариантом «короткого пуска» цикла Миллера) является наличие больших пульсаций топливоздушной смеси через впускные клапаны. В процессе наполнения на ходе поршня от ВМТ до НМТ поступает смесь, соответствующая полному объему цилиндра, а затем при обратном ходе ее большая часть снова выталкивается во впускной коллектор (до момента закрытия впускного клапана). При этом во впускном коллекторе будет постоянно находиться большой объем топливоздушной смеси (равный примерно 75 % рабочего объема цилиндров). Это не только усложнит конструкцию впускного тракта, но и опасно из-за возможного произвольного воспламенения вытесненной смеси. Расчетное значение индикаторного КПД в этом варианте составило $\eta_i = 0,322$, часовой расход газа $G_r = 2,59 \text{ м}^3/\text{ч}$, что лучше, чем в предыдущих вариантах. Фи-

зически причины повышения экономичности в этом варианте (относительно 2-го варианта) объясняются как повышением геометрической степени сжатия, так и уменьшением «насосных потерь». Относительная доля работы насосных ходов характеризуется величиной $L_n = 2,3 \%$, что существенно меньше, чем в предыдущих вариантах. Расчетная индикаторная диаграмма для этого варианта показана на рисунке 2, б.

Можно отметить также и весьма существенное снижение максимальной температуры рабочего цикла в этом варианте ($T_z = 1831 \text{ }^\circ\text{K}$), что, как отмечалось выше, способствует снижению токсичности выпускных газов. Основные расчетные данные приведены в таблице 1.

В четвертом варианте организации рабочего процесса газового двигателя исследовали эффективность модифицированного цикла Миллера, где предусмотрен способ регулирования (уменьшения) нагрузки вплоть до холостого хода путем «укорочения пуска». Установлено, что для реализации заданного режима холостого хода исследуемого двигателя впускной клапан должен быть закрыт на такте впуска за 128° до НМТ при общей продолжительности его открытия всего 77° поворота коленчатого вала (рис. 1). Заметим, что регулирование нагрузки двигателя при реализации этого цикла, как и в предыдущем варианте, осуществляется только путем изменения угла закрытия впускного клапана (чем раньше

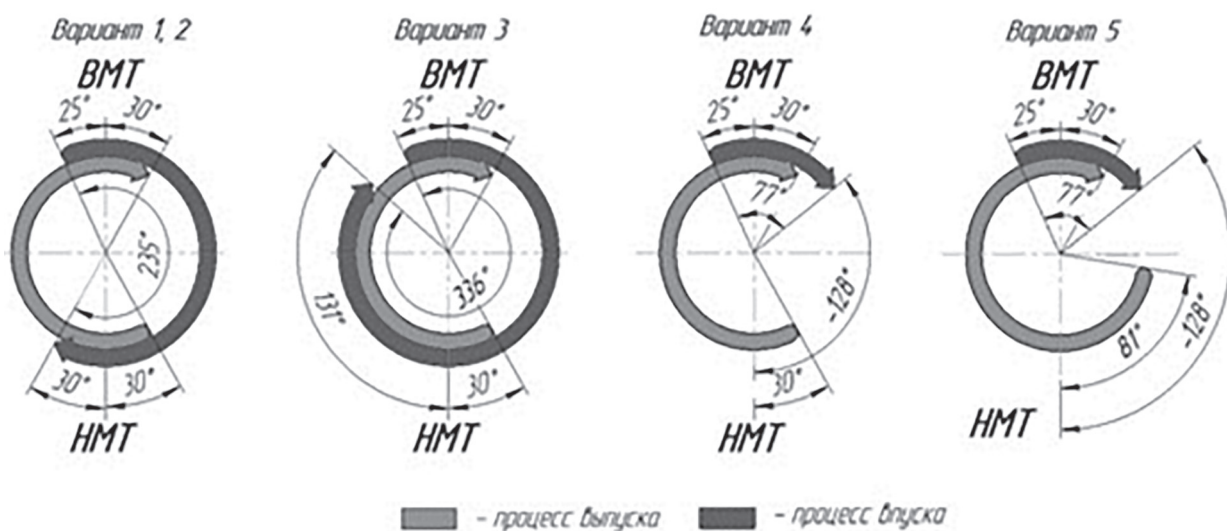


Рис. 1. Фазы газораспределения для принятых вариантов (1–5) организации рабочего процесса газового двигателя на холостом ходу при различных способах регулирования нагрузкой:

- 1, 2 – дроссельной заслонкой; 3 – увеличением продолжительности открытия впускного клапана;
- 4 – уменьшением продолжительности открытия впускного клапана; 5 – уменьшением продолжительности открытия впускного и предварением (ранним) открытием выпускного клапанов

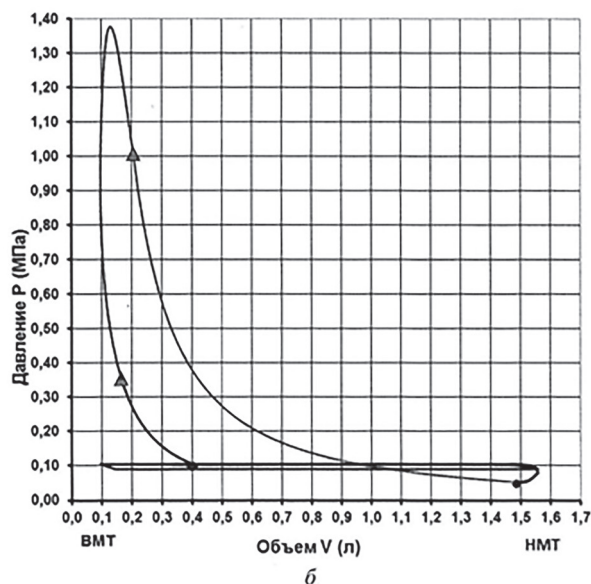
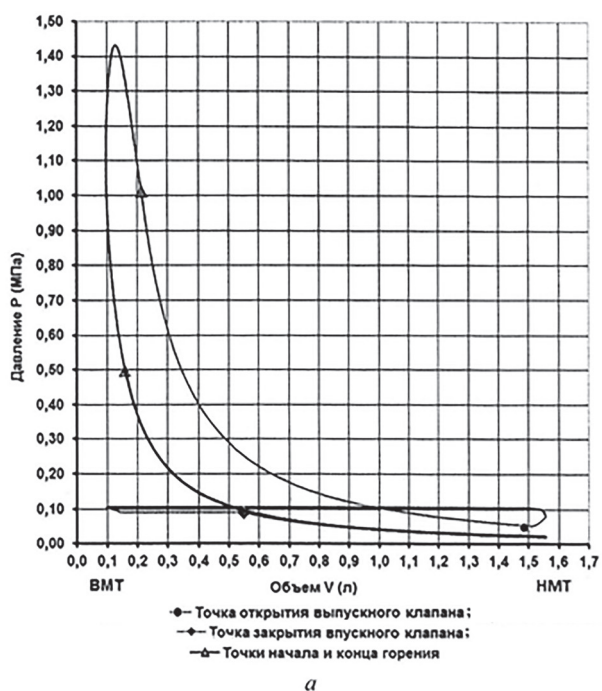


Рис. 2. Индикаторные диаграммы газового двигателя при его работе на режиме холостого хода ($n = 600 \text{ мин}^{-1}$, $P_i = 0,135 \text{ МПа}$):

- a* – вариант организации рабочего процесса № 4, в котором уменьшение нагрузки осуществляется за счет позднего закрытия впускного клапана;
- б* – вариант организации рабочего процесса № 3, в котором уменьшение нагрузки осуществляется за счет раннего закрытия впускного клапана

закрывается клапан, тем меньше нагрузка). Расчетная индикаторная диаграмма для этого варианта показана на рисунке 2, *a*.

Экономичность режима характеризуется значениями индикаторного КПД $\eta_i = 0,318$ и часового расхода газа $G_r = 2,62 \text{ м}^3/\text{ч}$, что практически аналогично предыдущему варианту.

Преимуществом этого варианта по сравнению с предыдущим является то, что через впускные клапаны за один рабочий цикл проходит в несколько раз меньшее количество рабочей смеси и характер ее движения более равномерный. В целом четвертый вариант представляется более предпочтительным, чем третий, из-за вышеуказанных особенностей процесса наполнения.

Пятый вариант организации рабочего процесса является модификацией четвертого. Здесь учтено, что на заключительном этапе такта расширения, где давление в цилиндре становится меньше атмосферного, работа расширения становится отрицательной, что вызывает дополнительные потери в цикле. Для исключения этих потерь целесообразно в момент, когда давление в цилиндре на такте расширения равно атмосферному, открыть выпускной клапан с целью повышения давления в цилиндре. Заметим, что такая рекомендация относится только к режимам холостого хода, т.к. на других нагрузочных режимах давление в цилиндре на всем такте расширения выше атмосферного.

Установлено, что для условий организации рабочего процесса по циклу Миллера с «укороченным выпуском» выпускной клапан следует открывать за 81° до НМТ ($\varphi_{\text{вып.от.}}^0 = 81^\circ$). Графическая иллюстрация фаз газораспределения для пятого варианта показана на рисунке 1. В этом случае общая продолжительность открытия впускного клапана составляет 77° , выпускного – 291° . Величина индикаторного КПД при этом увеличивается до значения $\eta_i = 0,330$, часовой расход газа снижается – $G_r = 2,53 \text{ м}^3/\text{ч}$. Таким образом, из всех исследованных вариантов организации рабочего процесса газового двигателя пятый вариант обуславливает наиболее высокую топливную экономичность.

Заклучение

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о том, что для повышения топливной экономичности на режимах холостого хода для газового двигателя типа КАМАЗ-820.74-300, созданного на базе семейства дизелей КАМАЗ размерности $S/D = 130/120$, целесообразно применение цикла Миллера, позволяющего наиболее эффективно реализовать этот режим благодаря отсутствию дроссельных потерь. На режиме холостого хода необходимое уменьшение нагрузки обеспечивается путем раннего закрытия

впускного клапана (за 128° до НМТ). Это позволяет в сочетании с обеднением топливовоздушной смеси до значения $\alpha = 1,40$, увеличением степени сжатия до значения $\varepsilon_r = 16$ и ранним открытием выпускного клапана (за 81° до НМТ) уменьшить расход газового топлива на 25 % по сравнению с серийным прототипом. Указанные меры позволяют также снизить максимальную температуру рабочего цикла, что обуславливает снижение токсичности выпускных газов. Реализация этих мер легко осуществима с использованием современных механизмов газораспределения с изменяемыми фазами газообмена. Заметим в этой связи, что применение регулируемых фаз газораспределения тем более целесообразно для газовых двигателей, так как позволяет улучшить их энергоэкономические характеристики также и в широком диапазоне изменения нагрузочных режимов [5].

Результаты исследования могут быть непосредственно использованы для экспериментальной доводки газовых двигателей, создаваемых на базе дизелей семейства КАМАЗ, и в общем виде для других модификаций дизелей, подлежащих конвертированию для работы на газообразном топливе.

Литература

1. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_valve_timing.
2. Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. др. Машиностроение. Энциклопедия. Двигатели внутреннего сгорания. Т. IV-14 / под общ. ред. А.А. Александрова и Н.А. Иващенко. М.: Машиностроение, 2013. 784 с.

3. Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатель с количественным бездроссельным регулированием мощности // Автомобильная промышленность. 2014. № 3. С. 4–11.
4. Baulch D.J. et al. High Temperature Reaction Rate Data / D.L. Baulch, D.D. Drusdale, D.D. Horne, A.C. Lloud // Report Univerity of Leeds. 1969. № 4. 58 p.
5. Фомин В.М., Гусаров В.В., Латышев А.П. Метод улучшения показателей работы газового двигателя, созданного на базе дизеля // Тракторы и сельхозмашины. 2017. № 1. С. 49–60.
6. URL <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/314770>.

References

1. URL https://en.wikipedia.org/wiki/Variable_valve_timing.
2. Engineering. Encyclopedia. Dvigateli vnutrennego sgoraniya [The internal combustion engines]. Т. IV-14 / L.V. Sins, N.A. Ivashchenko, V.A. Markov. Under the General editorship of A.A. Alexandrov and N.A. Ivashchenko. Moscow: Mashinostroenie Publ. 2013. 784 p.
3. Ter-Mkrtychyan G.G. The engine with quantitative throttle-free power control. Automobile industry. 2014. No 3, pp. 4–11 (in Russ.).
4. Baulch D. J. et al. High Temperature Reaction Rate Data / D. L. Baulch. Drusdale D. D., D. D. Horne, A. C. Lloud // Report Univerity of Leeds. 1969. № 4. 58 p.
5. Fomin V.M., Gusarov V.V., Latyshev A.P. Method of improving performance of a gas engine based on the diesel. Tractors and agricultural cars. 2017. No. 1, pp. 49–55 (in Russ.).
6. URL <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/314770>.