электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 09, сентябрь 2015

УДК 621.43

Моделирование пневматического пуска поршневого двигателя

Семенчукова В.С., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Поршневые двигатели»

Научные руководители: Гришин Ю.А., д.т.н., профессор
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Поршневые двигатели»

Маластовский Н.С., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана
grishin@power.bmstu.ru

Пусковые системы являются неотъемлемой частью силовых установок с поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Повышение надежности пуска, улучшение эксплуатационных и экономических качеств этих систем - одно из важнейших направлений совершенствования двигателей. Наибольшее распространение получили системы электростартерного пуска и пневматического – воздушного (ПСП)[1,2]. Для сравнительно небольших двигателей автотракторного типа применяются, как правило, электрические системы, для более мощных двигателей тепловозного и судового назначения необходимо использование ПСП, так как подобные системы являются более надежными, пожаробезопасными и дешевыми вследствие меньшей относительной металлоемкости. В них не требуется применение дорогостоящих цветных металлов – меди в электромашинах и свинца в аккумуляторных батареях. Важным достоинством этих систем является также повышение плотности пускового воздуха при снижении температуры окружающей среды, в то время как в аккумуляторах электрических систем наблюдается падение силы пускового тока, что снижает надежность пуска в условиях, характерных для зимнего периода [3].

При пуске двигателя происходят сложные для описания динамические процессы, как в самой пусковой системе, так и в поршневой части двигателя, когда осуществляется разгон двигателя, обладающего инерционными характеристиками, с учетом нелинейных сил сопротивления и неидентичных термодинамических процессов в камерах сгорания до

пусковых оборотов. В этой связи, теоретические и расчетные исследования совместной работы ПС и ДВС представляются актуальными.

Целью данной работы было создание методики расчета пуска перспективного дизеля сжатым воздухом. Для этого были поставлены следующие задачи:

- разработать математическую модель расчета внутрицилиндровых и динамических процессов пуска двигателя;
- создать алгоритм расчета для моделирования пуска двигателя, реализуемый в рабочей среде Visual Studio C++;
- провести расчет пуска перспективного двигателя;

Объектом исследования является дизель 12ЧН 26,5/31 [4], с порядком работы цилиндров 1-3-5-7-9-11-2-4-6-8-12 и моментом инерции вращающихся масс M = 700 кг·м. Характеристики время-сечения впускных и выпускных органов ($\mu F_{вп}(\varphi)$, $\mu F_{вып}(\varphi)$) принимаются наперед заданными. Давление в ресивере воздушной пусковой системы принимается равным 2,5 МПа. Схема системы представлена на рисунке 1.

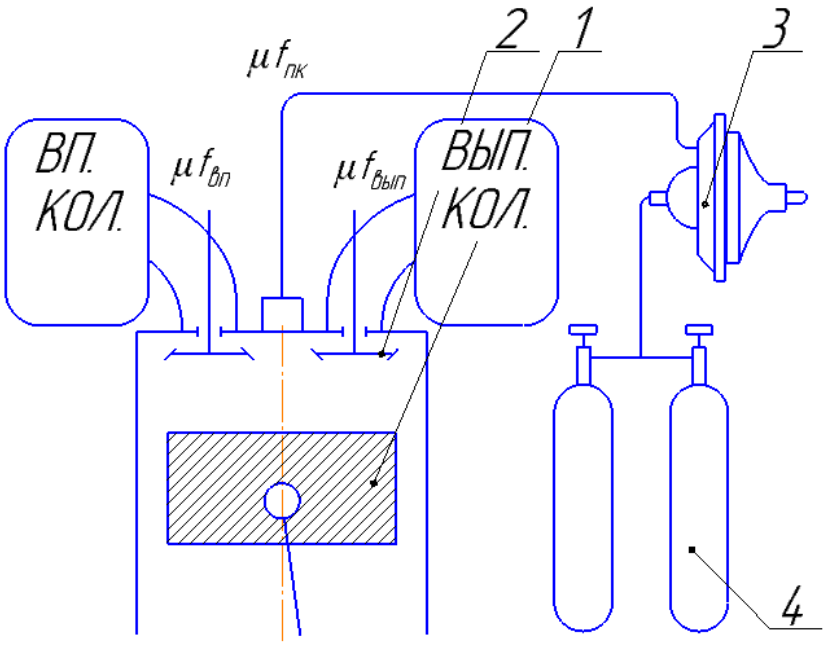

Рис. 1. Схема подачи воздуха в цилиндр: 1 – цилиндр; 2 – пусковой клапан; 3 - распределитель; 4 – ресивер (баллон)

Математическая модель включает систему дифференциальных равнений для внутрицилиндровых процессов при пуске (1)-(3), записанных относительно уравнения 1-го закона термодинамики (1):

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{dL}{dt} + \frac{dQ}{dt} + \frac{dH}{dt}, \qquad (1)$$

где

$U = C_v MT$ - внутренняя энергия рабочего тела в камере сгорания;

$L = PV$ - работа, совершаемая рабочим телом в цилиндре двигателя, а P и V – соответственно давление в цилиндре и объем.

$H = C_p MT$ - полная энтальпия.

$Q = \alpha[T - T_w][S_п + S_{кр} + S_ц]$ - теплота, отданная в стенки камеры сгорания, T_w – температура стенки; $S_п$ – площадь поршня; $S_{кр}$ – площадь огневой поверхности крышки цилиндров; $S_ц(\varphi)$ – площадь цилиндра; α – коэффициент теплоотдачи.

Расход воздуха через органы газообмена может быть записан как:

$$\frac{dG}{dt} = \mu f \cdot \rho \cdot \omega_t = \mu f \cdot \sqrt{\frac{2k}{k-1}\left[\left(\frac{p_{вых}}{p_{вх}}\right)^{\frac{2}{k}} + \left(\frac{p_{вых}}{p_{вх}}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \cdot \sqrt{p_{вх} \cdot \rho_{вх}} \qquad (2)$$

В зависимости от перепада давления ($\frac{p_{вых}}{p_{вх}}$) и величины эффективного проходного сечения (μf) могут быть реализованы процессы истечения из и в цилиндр двигателя.

Уравнение состояния:

$$PV = MRT\,, \qquad (3)$$

где

M – количество вещества в цилиндре, T – температура рабочего тела в цилиндре.

Уравнение динамики, определяющее ускорение вращающихся масс дизеля при действии суммарного крутящего момента:

$$J\frac{d\omega}{dt} = \sum M = M_{кр} + M_{сопр}, \text{ где} \qquad (4)$$

$M_{кр} = p \cdot \frac{S}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\sin(\alpha+\beta)}{cos\beta}$, S – ход поршня, D – диаметр поршня, α – угол поворота коленчатого вала, β – угол качания шатуна, *а* $M_{сопр}$ - *м*омент сопротивления при пуске дизеля, который принимается равным 2744 Н·м.

При расчете пуска были использованы следующие положения:

- пневмоклапан открывается за 10^0 угла ПКВ и закрывается в момент, когда давление в цилиндре становится больше давления в пневмосистеме, период открытия клапана - 130^0 угла ПКВ;

- на впуске и выпуске из цилиндра принимаются параметры окружающей среды;

- процессы газообмена рассматриваются в стационарной постановке;

- физическая модель воздуха – калорически совершенный газ (теплоемкости c_p и c_v постоянны);

- коэффициент теплоотдачи α рассчитывается по формуле Розенблита для внутрицилиндрового процесса [5].

Алгоритм расчета был реализован в виде двух циклов: внешнего и внутреннего. Внутренний цикл обеспечивает определение параметров рабочего тела для каждого цилиндра (текущий объем, давление, температура и масса рабочего тела - воздуха). Внешний цикл рассчитывает динамику пуска крутящий момент, значение угла ПКВ и рост частоты вращения. Для расчета внутрицилиндровых процессов изначально применялся численный метод Рунге-Кутты, для уравнений динамики – численный метод Эйлера.

После проведения расчета были получены давление в цилиндрах двигателя, суммарный крутящий момент и частота вращения (рис.2, рис.3, рис. 4). На всех графиках нанесены законы открытия клапанов.

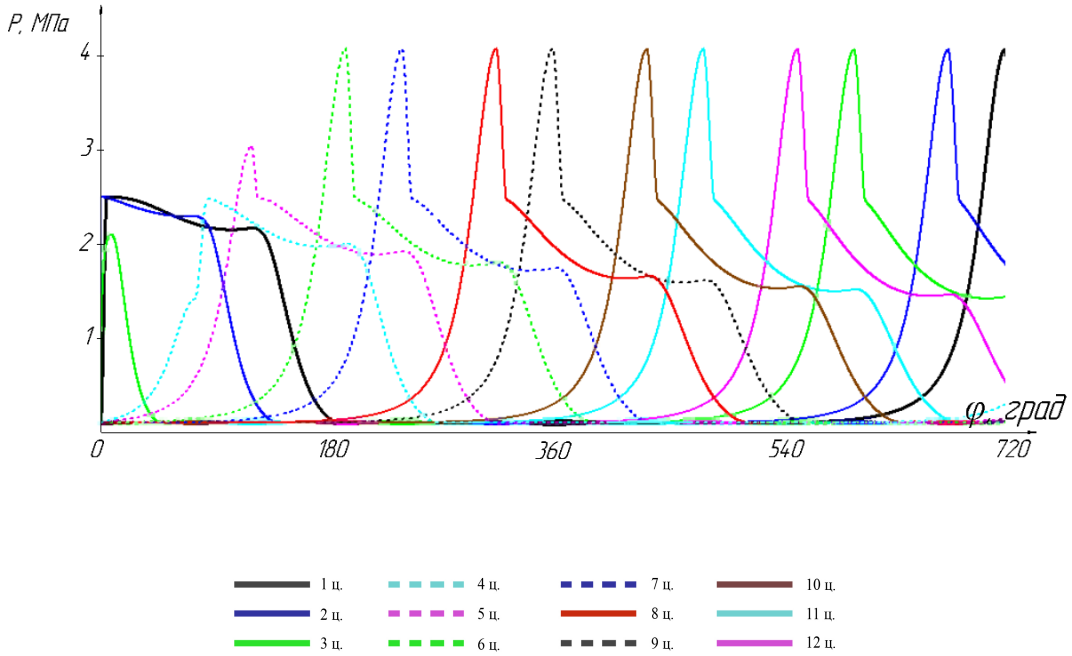

Рис. 2. Давление по цилиндрам:

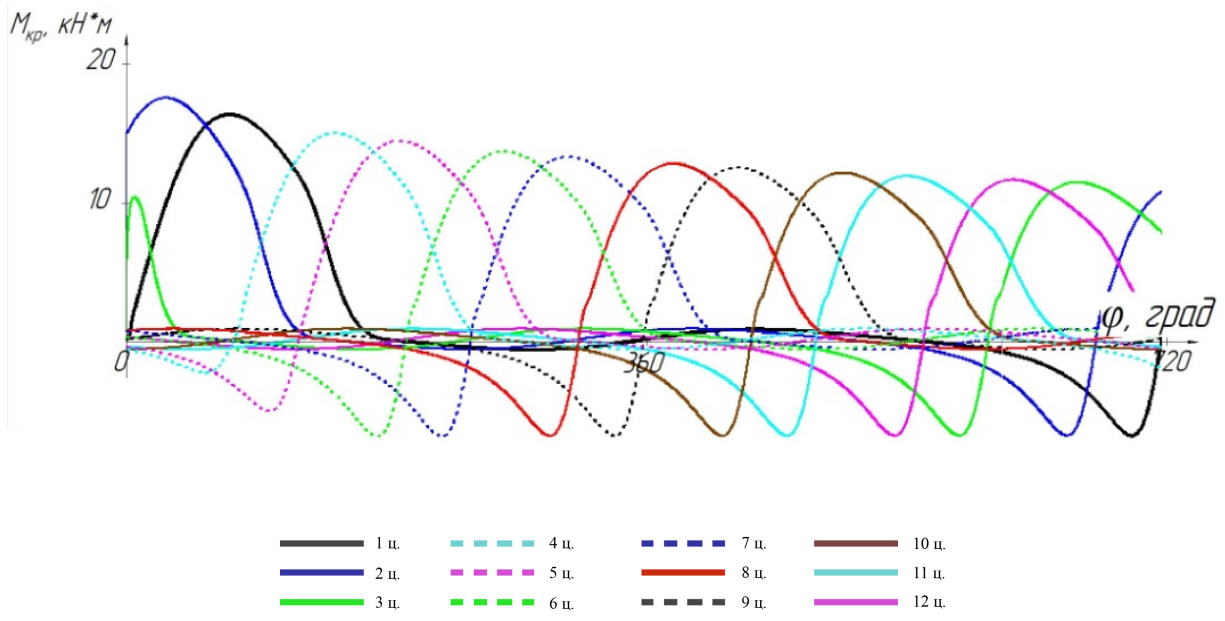

Рис. 3. Крутящий момент по цилиндрам

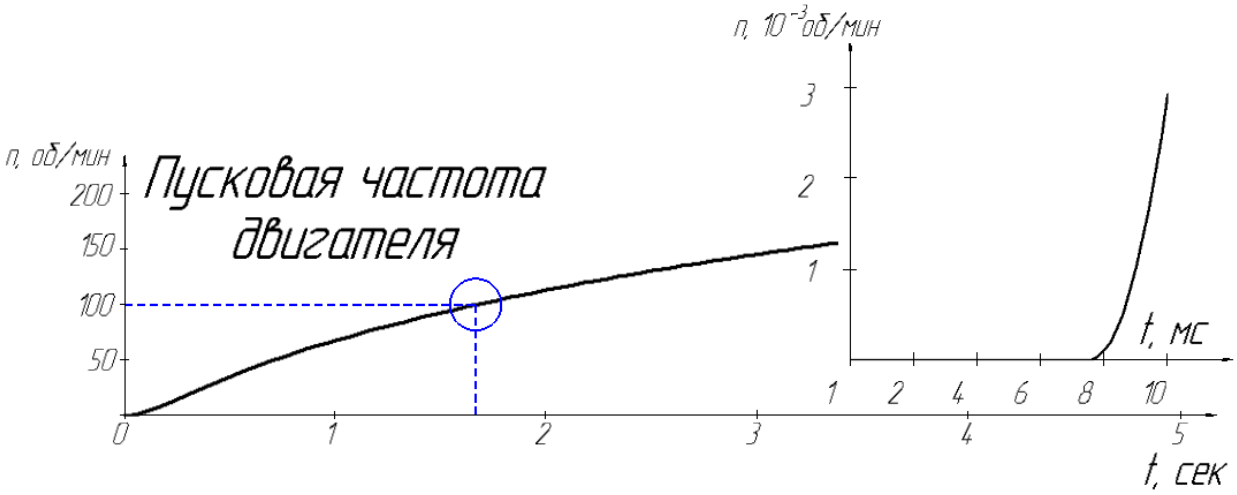

Рис. 4. Изменение частоты вращения в ходе пуска двигателя

Возможно выделить 3 характерные области: участок работы пневмоклапана, газообмен, сжатие. На участке открытого пневмоклапана давление достигает максимального значения, равного давлению в пневмосистеме – 2,5 МПа, однако в ходе разгона двигателя давления пневмосистемы не хватает для поддержания постоянного давления в цилиндре и за счет расширения рабочего пространства КС при движении поршня к НМТ давление постепенно падает. В свою очередь, при сжатии давление достигает значения 4 МПа.

Крутящий момент для отдельного цилиндра также имеет три основных участка: основной положительный крутящий момент достигается в период работы пневмоклапана, отрицательный при сжатии, практически нулевой крутящий момент на участке газообмена.

Для каждого цилиндра набор частоты вращения КВ достигается на участке работы пневмосистемы, затем на участке газообмена она поддерживается примерно постоянной и на участке сжатия наблюдается ее снижение за счет затрачиваемой на сжатие работы.

Для графика частоты вращения характерен участок преодоления силы трения покоя продолжительностью 8 мс, затем следует активный набор частоты за счет возникающего крутящего момента, суммарная величина которого по цилиндрам снижается во времени (рис. 5).

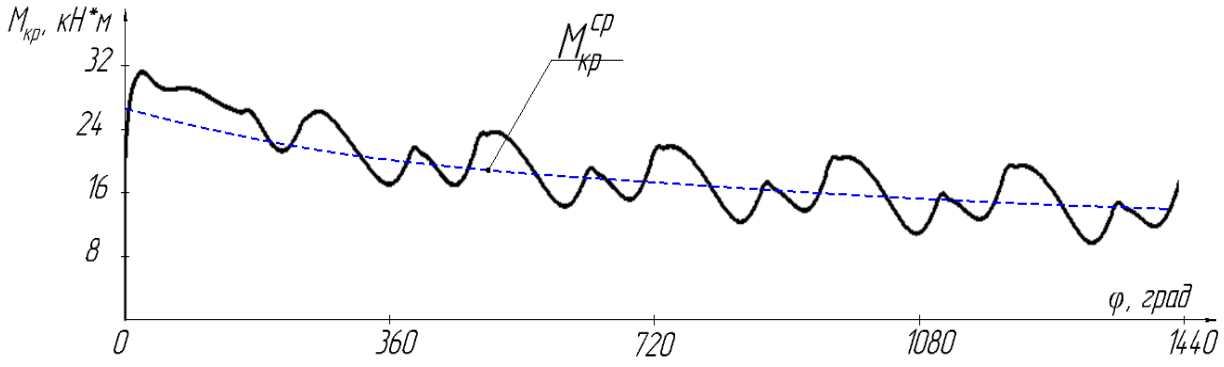

Рис. 5. Суммарный крутящий момент

В результате была разработана математическая модель расчета внутрицилиндровых и динамических процессов пневматического пуска двигателя, создан и реализован алгоритм расчета для моделирования. Также был проведен расчет пуска перспективного двигателя, который в течение 1,7 с система пневмопуска обеспечивает выход на минимальную пусковую частоту работы 100 об/мин.

Разработанная программа с достаточной точностью позволяет моделировать процесс пуска и анализировать влияние параметров пневмосистемы на время разгона двигателя до стартовых оборотов.

Список литературы

1. Орлин А.С., Круглов М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Системы поршневых и комбинированных двигателей / под ред. А.С. Орлина. М.: Машиностроение. 1985. 456 с.
2. Поликер Б.Е., Михайльский Л.Л., Марков В.А. Дизельные двигатели для электроагрегатов и электростанций / под ред. Б.Е. Поликера. М.: Автодата, 2006. 328 с.
3. Москалев И.В. Пуск дизельного двигателя с помощью вихревого турбстартера: дис. …канд. техн. наук. М., 2013. 213 с.
4. Рыжов В.А. Разработка дизелей нового поколения на Коломенском заводе // Двигателестроение. 2009. №2. С. 18-20.
5. Розенблит Г. Б. Теплопередача в дизелях. М.: Машиностроение. 1977. 216 с.