

ОСОБЕННОСТИ ПУСКА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ИСКРОВЫМ ЗАЖИГАНИЕМ НА ГАЗОВОМ ТОПЛИВЕ

© 2011 В. А. Шишков

Самарский государственный аэрокосмический университет
имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассмотрен пуск двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с искровым зажиганием с электронной системой управления на газовом топливе. Показано влияние температуры ДВС на характеристику газовой подачи во время пуска и прогрева. Предложен алгоритм пуска ДВС с электронной системой управления на газовом топливе.

Двигатель внутреннего сгорания, электронная система управления двигателем, газовое топливо, алгоритм, пуск двигателя.

1. Основы пуска ДВС на газовом топливе

В зависимости от температурного состояния ДВС и температуры окружающей среды различают:

- холодный пуск при температурах ниже 0°C. Для природного газа характеризуется особенностями топливоподачи и содержанием паров воды в газе. Для пропан-бутана из-за необходимости испарения обязателен пуск на бензине с последующим прогревом ДВС до 30°C и переключением на газовое топливо. Если температура редуктора-испарителя после останова не снизилась ниже 30°C, то пуск может осуществляться на пропан-бутане;

- пуск при нормальной температуре от 0°C до 30°C для природного газа и пропан-бутана аналогичен пуску ДВС при отрицательных температурах окружающей среды;

- пуск при повышенных температурах ДВС и окружающей среды выше 30°C (перегретый ДВС после термошока) как для природного газа, так и пропан-бутана осуществляется на газовом топливе.

В зависимости от применяемого типа газового топлива и его фазового состояния возникают свои условия пуска ДВС:

- пропан-бутан в баллоне автомобиля находится в жидкой фазе при соответствующих давлении и температуре, поэтому для его испарения необходимо подвести определённое

количество теплоты от двигателя, т.е. пуск ДВС осуществляется на бензине с последующим прогревом и переключением на газ. Существуют системы подачи пропан-бутана в жидкой фазе в камеру сгорания двигателя. Это требует значительного усложнения топливоподающей аппаратуры со значительным повышением давления в ней, достигающим значения до 3,5...4,0 МПа, при рабочих температурах элементов двигателя для устранения процесса парообразования в элементах топливной системы и, в частности, в газовых форсунках. К таким системам газобаллонного оборудования (ГБО) относится система голландской фирмы Vialle;

- компримированный природный газ (КПГ) при достаточной его очистке от тяжёлых фракций углеводородов и паров воды не требует специального подогрева при пуске двигателя. Температура газа за счёт эффекта дросселирования в редукторе с максимального значения давления 25 МПа до 0,1...0,3 МПа при начальных температурах двигателя и газа в баллоне на уровне -30°C может составлять -50...-67°C. При наличии паров воды в газе в диапазоне температур окружающего воздуха -3...+10°C может происходить нарушение работы клапана газового редуктора (подвижный элемент клапана редуктора примерзает к седлу). В этом случае обязателен подогрев клапанной пары редуктора: ДВС необходимо прогреть на бензине,

а затем переключиться на КПП. При температурах ниже 0°C происходит замерзание как воды, так и её паров в газовом баллоне и если баллон(ы) находится за пределами салона автомобиля (обычно под днищем кузова), то он не прогревается и вода не попадает в газовый редуктор;

- сжиженный метан – для устойчивого пуска двигателя требуется испарение газа перед подачей его в камеру сгорания. При достаточной массе и теплопередающей поверхности теплообменника испарителя (достаточность накопленной теплоты в металле теплообменника испарителя) пуск можно осуществлять непосредственно на метане;

- водород в газовой фазе – его добавка в любой вид топлива во всём диапазоне температур окружающей среды и ДВС улучшает процесс пуска, т.к. молекулы водорода в топливовоздушной смеси являются активными центрами воспламенения;

- жидкий водород – как и для сжиженного метана для устойчивого пуска двигателя требуется его испарение перед подачей в камеру сгорания;

- светильный газ – условия пуска ДВС аналогичны КПП и т. д.

В зависимости от фазового состояния газового топлива в баллоне(ах) транспортного средства появляются особенности подготовки топлива и его качества по содержанию паров воды:

- газ в жидком состоянии – требуется система для испарения газа с достаточным количеством внешней теплоты или значительное увеличение давления газа для ускорения его преждевременного испарения в газовых форсунках и появления неустойчивых процессов газовой подачи и работы ДВС;

- в газообразном состоянии – требуется достаточная очистка от паров воды и тяжёлых углеводородов для устранения примерзания элементов клапанных пар газового редуктора и электромагнитных газовых форсунок.

В зависимости от применяемой системы электронного управления ДВС топливоподача при пуске может осуществляться:

- с асинхронной подачей газового топлива – применяется практически во всех си-

стемах управления ДВС до момента определения верхней мёртвой точки первого цилиндра перед рабочим ходом, т.е. ограничивается порогом чувствительности датчика положения коленчатого вала. При асинхронной газовой подаче все форсунки в начальный момент прокрутки, когда частота вращения коленчатого вала, например, достигла 60 мин⁻¹, подают газовое топливо в течение 80...120 мс. Далее при возрастании частоты вращения коленчатого вала происходит определение фаз и переход на другой вид газовой подачи, приведённый ниже;

- с одновременной подачей газового топлива – может использоваться для увеличения частоты вращения коленчатого вала во время пуска до устойчивого режима холостого хода;

- с попарно параллельной подачей газового топлива – так же как и предыдущая, только для улучшения точности дозирования газового топлива при пуске двигателя для норм токсичности отработавших газов до Евро-3;

- с фазированной подачей газового топлива – также как и предыдущая, только для улучшения точности дозирования газового топлива при пуске двигателя для норм токсичности отработавших газов выше Евро-3.

В зависимости от исправности или неисправности датчиков системы электронного управления ДВС пуск может быть:

- в штатном режиме по соответствующему алгоритму в зависимости от внешних условий и температурного состояния двигателя;

- в резервном режиме с неисправным датчиком массового расхода воздуха – подача газового топлива осуществляется в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и положения дроссельной заслонки. В этом случае расход воздуха при пуске выбирается по резервным таблицам его осреднённых значений в зависимости от вышеназванных условий. Эти резервные таблицы расхода воздуха через ДВС формируются в процессе доводки калибровок на двигателе при испытаниях в моторном боксе и корректируются при проведении испытаний в составе автомобиля;

- в резервном режиме с неисправным датчиком температуры охлаждающей жидкости ДВС – количество газового топлива корректируется в зависимости от времени, прошедшего от начала пуска двигателя, и количества пусков в течение малого периода времени;

- в резервном режиме с неисправным датчиком положения дроссельной заслонки (обрыв или короткое замыкание цепи датчика) – газовая подача осуществляется по частоте вращения коленчатого вала и сигналу с датчика массового расхода воздуха при достижении порога его чувствительности и т.д.

При неисправности регулятора холостого хода, когда происходит подклинивание его червячного вала, можно выделить два случая: заклинивание вала регулятора в закрытом положении клапана и в открытом положении клапана. В этом случае электронный блок управления двигателем не может определить данные неисправности и поэтому он не включает контрольную лампу «Check Engine» на панели приборов автомобиля. Водителю придётся провести пробные пуски для обоих вышеназванных случаев неисправностей. При закрытом положении клапана регулятора пуск ДВС можно осуществить путём незначительного приоткрытия дроссельной заслонки с помощью педали акселератора во время прокрутки коленчатого вала стартёром с последующим её удержанием для поддержания стабильного режима на холостом ходу. При заклинивании в открытом положении клапана регулятора холостого хода при пуске ДВС необходимо попытаться перекрыть входной воздушный патрубок с помощью дополнительных средств, чтобы уменьшить количество воздуха, поступающего в цилиндры. При этом необходимо следить, чтобы вспомогательные средства не попали в воздушный фильтр двигателя.

Успешный пуск ДВС зависит от отсутствия пропусков воспламенения, т.е. от его исправности и исправности его систем топливоподачи и зажигания [1]. Кроме этого, на режим пуска влияет содержание свободных молекул водорода в газовом топливе, которые являются центрами воспламенения в

процессе зажигания в газозвдушной среде в камере сгорания ДВС.

Пуск состоит из раскрутки коленчатого вала стартёром, начала топливоподачи и зажигания с последующим нарастанием частоты вращения коленчатого вала до режима устойчивого холостого хода. Поэтому на процесс пуска, кроме выше приведённых, влияют следующие факторы:

- характеристики масла в картере ДВС (плотность и вязкость; чем они выше, тем ниже обороты прокрутки коленчатого вала стартером);

- наличие обкатки ДВС или соответствующего пробега автомобиля, т.е. внутренние механические потери на трение в шатунно-поршневой группе и подшипников двигателя, трение в элементах сцепления в нажатом состоянии педали;

- степень сжатия в цилиндрах ДВС: чем выше степень сжатия, тем выше температура топливозвдушной смеси в конце процесса сжатия и тем лучше воспламенение, но увеличение степени сжатия требует повышенной мощности стартера;

- величина зарядки аккумуляторной батареи: при большом разряде батареи снижается частота прокрутки коленчатого вала стартёром;

- минимальная частота вращения коленчатого вала при прокрутке стартёром: чем выше, тем выше давление и температура в конце процесса сжатия и выше вероятность нормального пуска двигателя;

- мощность стартёра: чем она выше, тем выше частота вращения при прокрутке коленчатого вала, что особенно важно при отрицательной температуре двигателя и моторного масла в его картере;

- масса всех деталей, приводимых в движение стартёром: чем меньше масса, тем выше частота вращения при прокрутке коленчатого вала стартером при пуске двигателя;

- количество впрыскиваемого газа при пуске двигателя: при недостаточном или избыточном количестве газа возникает неустойчивое горение газозвдушной смеси, пропуски воспламенения и малая скорость нарастания частоты вращения коленчатого вала

от частоты прокрутки до устойчивого холостого хода часто приводят к неудачным пускам. Для каждого вида газового топлива можно определить различные уровни допустимого обеднения или обогащения газоздушной смеси при пуске двигателя, это зависит от диапазона горения газа в воздухе. Например, для горения метана в воздухе диапазон составляет от 5 до 15% объёмных долей при стехиометрическом составе 9,53 объёмные доли или это соответствует от 8,47 до 25,42 весовых долей при стехиометрии 16,15 весовых долей, что, в свою очередь, соответствует составам смеси с α от 0,52 до 1,57. Это также показывает, что создать двигатель, работающий на сверхбедных смесях метана с воздухом с α большим, чем 1,57, физически не представляется возможным, если только не разложить метан на радикалы углерода и водорода или добавить чистый водород в метановоздушную смесь перед подачей её в камеру сгорания двигателя. Водород с воздухом горит от 4 до 75 % объёмных долей, и его добавка расширит диапазон горения по составу смеси практически для всех видов углеводородных топлив;

- фазы впрыска газового топлива: она должна быть синхронизирована с фазами открытия и закрытия впускных и выпускных (при наличии условия перекрытия фаз) клапанов двигателя;

- организация процесса приготовления газоздушной смеси: подача газа во впускной трубопровод при его впрыске под перепадом давления должна осуществляться по потоку воздуха в впускном коллекторе [2] и работать как эжекторный насос. Если это условие не выполнено, то впрыскиваемый газ будет являться газодинамической гидравлической шайбой, которая повышает сопротивление при впуске воздуха в цилиндр. Общее количество воздуха, попавшего в цилиндр, уменьшится, и в результате упадут крутящий момент и мощность двигателя;

- от исправности элементов системы зажигания: свечей зажигания, высоковольтных проводов и катушки зажигания;

- величины высоковольтного напряжения: чем выше напряжение на свечах зажигания, тем больше энергии выделяется при

искровом разряде, что улучшает процесс воспламенения газоздушной смеси;

- мощности искрового разряда на свечах зажигания: чем больше время накопления заряда в катушке зажигания, тем больше мощность искрового разряда.

2. Прогрев двигателя при работе на газе

Неотъемлемой частью после пуска является прогрев ДВС от исходной до рабочей температуры. Ускорение режима прогрева связано с высокими требованиями по токсичности отработавших газов. По контрольному ездовому циклу, при проверке по правилам ЕЭК ООН по нормам Евро-3 и выше, замер токсичности отработавших газов начинается с момента пуска ДВС при окружающей температуре от 18 до 25°C. Для быстрого прогрева нейтрализатор из под днища кузова автомобиля перенесён в катколлектор в непосредственной близости от выпускных клапанов.

Температура горения компримированного природного газа в камере сгорания ДВС при одинаковом составе топливоздушной смеси, по сравнению с бензином, ниже примерно на 150...200°C. Это приводит к увеличению времени прогрева ДВС и катколлектора примерно на 120...240 с, что неприемлемо для норм токсичности Евро-3 и выше.

Прогрев ДВС при работе на бензине обычно осуществляется с соответствующим обогащением топливоздушной смеси примерно от $\alpha = 0,8$ до 1,0 в зависимости от начальной температуры ДВС по определённой зависимости его изменения от температуры двигателя, т.е. $\alpha = f(T_{двс})$. Состав топливоздушной смеси, равный 1,0, достигается примерно через 120...300 с с момента пуска двигателя в зависимости от начальных значений температур. Обогащение топливоздушной смеси при пониженных температурах окружающей среды и ДВС связано с тем, что большая часть жидкого бензина выпадает в топливную плёнку на стенки впускного трубопровода и камеры сгорания и фактически состав смеси оказывается более бедным по сравнению с расчётной топливоподачей. В процессе прогрева ДВС количество бензина в топливной плёнке снижается, и поэтому

расчётный состав топливоздушной смеси приближается к реальному и при рабочей температуре двигателя становится равным 1. На рис. 1 показан пример изменения состава топливоздушной смеси в зависимости от температуры ДВС при пуске и прогреве на бензине.

Для ускорения прогрева двигателя и катколлектора при работе на газовом топливе (природный газ, метан и пропан-бутан) характеристика изменения состава газоздушной смеси имеет противоположную тенденцию. Топливо в этом случае находится в газовой фазе и не выпадает в виде жидкой плёнки на стенки впускного трубопровода и камеры сгорания. При этом состав изменяют с соответствующим обеднением от $\alpha = 1,2$ до 1,0 в зависимости от начальной температуры ДВС и по определённой зависимости. Это сделано для повышения температуры горения газоздушной смеси. В этом случае время прогрева катколлектора становится примерно таким же, как и при работе на бензине. Обеднение до $\alpha = 1,3 \dots 1,57$ при работе на метане или пропан-бутане может привести к местным прогарам выпускных клапанов из-за повышенной температуры отработавших газов и к неустойчивому горению смеси в камере сгорания, что затруднит пуск и прогрев двигателя. На рис. 2 показан пример изменения состава топливоз-

душной смеси в зависимости от температуры ДВС при пуске и прогреве на природном газе или пропан-бутане.

Повышение количества свободного молекулярного или радикалов водорода в газовом топливе увеличивает температуру горения газоздушной смеси, а значит и ускоряет прогрев катколлектора или нейтрализатора.

Часто производители автомобиля и электронной системы управления газовым двигателем, если ДВС рассчитан для работы на двух видах топлива (бензине и газе), вопросы его пуска и прогрева сводят к работе на бензине. После прогрева вручную или автоматически в зависимости от температуры ДВС переключают с бензина на газ. Это уменьшает проблемы с доводочными процессами по токсичности отработавших газов на данных режимах, т.к. используется программа управления со всеми калибровками при работе на бензине с отработанным пуском и прогревом конкретного типа двигателя. Это неприемлемо для однопаливных газовых автомобилей, не имеющих резервной бензиновой системы топливоподачи.

3. Алгоритм пуска ДВС на газовом топливе

Алгоритм пуска на газовом топливе практически такой же, как и на бензине, только имеются свои особенности:

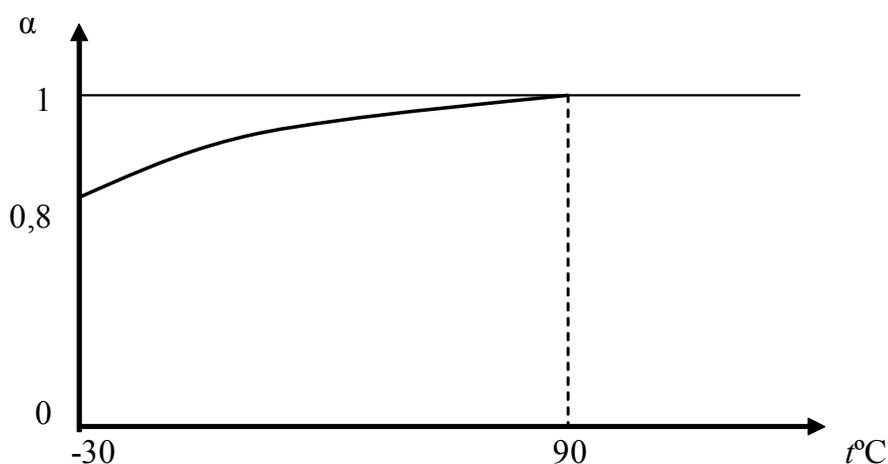


Рис. 1. Изменение состава топливоздушной смеси в зависимости от температуры двигателя при пуске и прогреве на бензине

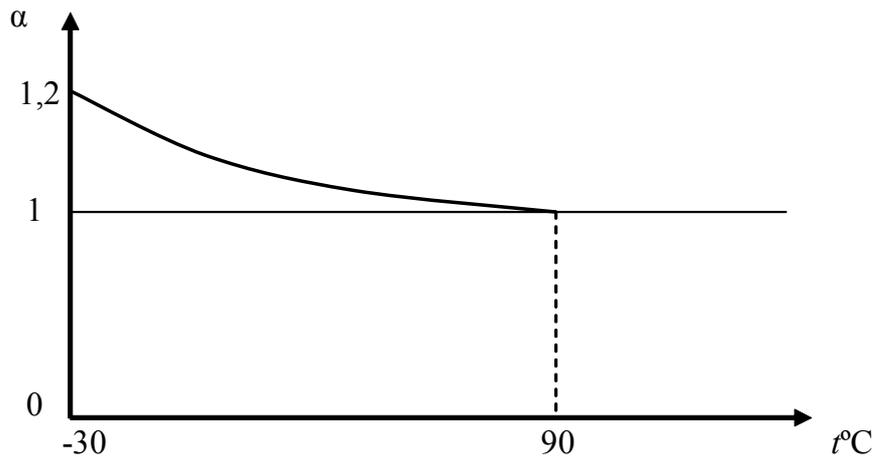


Рис. 2. Изменение состава топливоздушной смеси в зависимости от температуры двигателя при пуске и прогреве на природном газе или пропан-бутане

1. При пуске на газовом топливе частота вращения коленчатого вала нарастает с высокой скоростью. Это может привести к масляному «голоданию» на трущихся поверхностях ШПГ. Поскольку вязкость моторного масла в сильной степени зависит от температуры, то и количество прокачиваемого через ДВС масла будет различным из-за высоких гидравлических сопротивлений масляных каналов. В этом случае для уменьшения износа трущихся поверхностей двигателя необходимо ограничивать скорость нарастания частоты вращения коленчатого вала при пуске путём соответствующего дозирования газа при возрастании частоты вращения, или управлением подачи воздуха в цилиндры (увеличение количества циклового воздуха при нарастании частоты вращения при пуске ДВС снижает скорость её нарастания и наоборот - повышает - за счёт увеличения газовых сил на поршень двигателя в процессе сжатия). В зависимости от начальной температуры ДВС, например от -30°C до $+100^{\circ}\text{C}$, время нарастания частоты вращения коленчатого вала соответственно должно быть примерно от 6 до 2 с.

$$t_{\text{пуска}} = f(T_{\text{двс}}),$$

$$dn / dt = f(T_{\text{двс}}; G_{\text{ц.возд}}),$$

где $t_{\text{пуска}}$ – время от начала прокрутки коленчатого вала стартером до достижения устой-

чивой частоты вращения коленчатого вала на режиме холостого хода; dn / dt – скорость изменения частоты вращения коленчатого вала при пуске; $T_{\text{двс}}$ – температура двигателя; $G_{\text{ц.возд}}$ – цикловой расход воздуха через цилиндр двигателя.

2. Состав газовой смеси в зависимости от температуры двигателя при пуске и прогреве изменяется, например, по рис. 2:

$$a = f(T_{\text{двс}}).$$

3. Газовое топливо может иметь широкий диапазон по составляющим его углеводородам и примесям (например, от чистого метана в жидком состоянии до КПГ с содержанием метана 80...99 %). В этом случае для устойчивого пуска двигателя необходимо использовать алгоритм адаптации к химическому составу газового топлива [3]:

$$G_{\text{ц.газ}} = f(\text{химический состав топлива}),$$

где $G_{\text{ц.газ}}$ – цикловой расход газа.

4. Из-за снижения мощности и крутящего момента двигателя при работе на газе, по сравнению с бензином из-за уменьшения количества воздуха, поступающего в цилиндр в соответствии с объёмным коэффициентом стехиометрии, необходимо увеличить частоту вращения коленчатого вала на режиме холостого хода на газе примерно в относительной пропорции к изменению кру-

тящего момента или мощности. Это связано с механическими потерями на трение в зависимости от температуры ДВС. На прогревом до рабочей температуры двигателе частота вращения коленчатого вала при работе на газе может быть равна частоте при работе на бензине, если достаточно мощности и крутящего момента для устойчивой работы на режиме холостого хода.

$$n_{газ\ xx} / n_{бенз\ xx} = Ne_{бенз\ xx} / Ne_{газ\ xx}$$

$$\text{или } n_{газ\ xx} / n_{бенз\ xx} = M_{бенз\ xx} / M_{газ\ xx},$$

где $n_{газ\ xx}$ – частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода при работе на газе; $n_{бенз\ xx}$ – частота вращения коленчатого вала на режиме холостого хода при работе на бензине; $Ne_{бенз\ xx}$, $M_{бенз\ xx}$ – соответственно, мощность и крутящий момент двигателя при работе на бензине на режиме холостого хода; $Ne_{газ\ xx}$, $M_{газ\ xx}$ – соответственно, мощность и крутящий момент двигателя при работе на газе на режиме холостого хода.

5. В случае, если газ находится в баллоне в жидком состоянии, то обязательное условие пуска двигателя на бензине с последующим его прогревом, например, для пропан-бутана как минимум до $+30^{\circ}\text{C}$, и при достижении соответствующей температуры с автоматическим или ручным переключением на газ.

6. В случае подачи газа в жидком состоянии при пуске двигателя должно быть или достаточно теплоты от элементов ДВС для его испарения во время пуска и прогрева на режиме холостого хода или должна быть дополнительная система с повышенным давлением газа выше линии насыщения и его контролем в зависимости от режима работы двигателя и его температуры. Последнее усложняет и удорожает систему подачи газового топлива.

7. Для улучшения наполнения цилиндров газовой топливной смесью и снижения вероятности «хлопковых» эффектов во впускной системе ДВС необходимо правильно выбрать фазы впрыска газового топлива. Лучшим вариантом является впрыск газа на открытый впускной клапан. Это позволяет, во-первых, использовать энергию перепада

давления газового топлива на форсунке в качестве эжекторного насоса для улучшения наполнения цилиндров газовой топливной смесью [2]. Во-вторых, практически весь газ, поступивший во впускной трубопровод, попадет в цилиндр двигателя, что обеспечит его надёжную «бесхлопковую» работу. На рис. 3 показана наилучшая фаза впрыска газового топлива во впускную трубу двигателя по отношению к фазам открытия и закрытия впускного клапана.

Для снижения потерь газа при продувке цилиндра при одновременно открытых выпускном и впускном клапанах (между φ_1 и φ_2) желательно фазу φ_2 начала впрыска сместить в более позднюю сторону по отношению к фазе φ_1 открытия впускного клапана (рис. 3) и совместить её с фазой закрытия выпускного клапана.

Для снижения количества газового топлива, оставшегося во впускном трубопроводе, фаза φ_3 (рис. 3) конца его впрыска должна закончиться раньше, чем закроется впускной клапан φ_4 , т. к. необходимо время, чтобы весь газ от форсунки через впускной клапан попал в цилиндр двигателя. Это зависит от расстояния от сопла газовой форсунки до впускного клапана, от гидравлического сопротивления впускного трубопровода на этом участке и суммарной скорости движения газовой топливной смеси. Чем больше расстояние от форсунки до клапана, тем раньше необходимо заканчивать впрыск газа по отношению к фазе закрытия впускного клапана, и наоборот. Чем ближе расположена форсунка к впускному клапану, тем более широкий импульс ($\varphi_3 - \varphi_2$) можно получить для впрыска газового топлива во впускной трубопровод, т. к. время движения газа до клапана снижается. Для выполнения этих условий необходимо правильно выбрать расходную характеристику газовой форсунки в точках динамической и статической настройки [4], которые определяют весь рабочий диапазон режимов ДВС от минимальной частоты вращения коленчатого вала без нагрузки до максимальной частоты и максимальной нагрузки.

8. Подача газового топлива должна осуществляться в зависимости от его темпера-

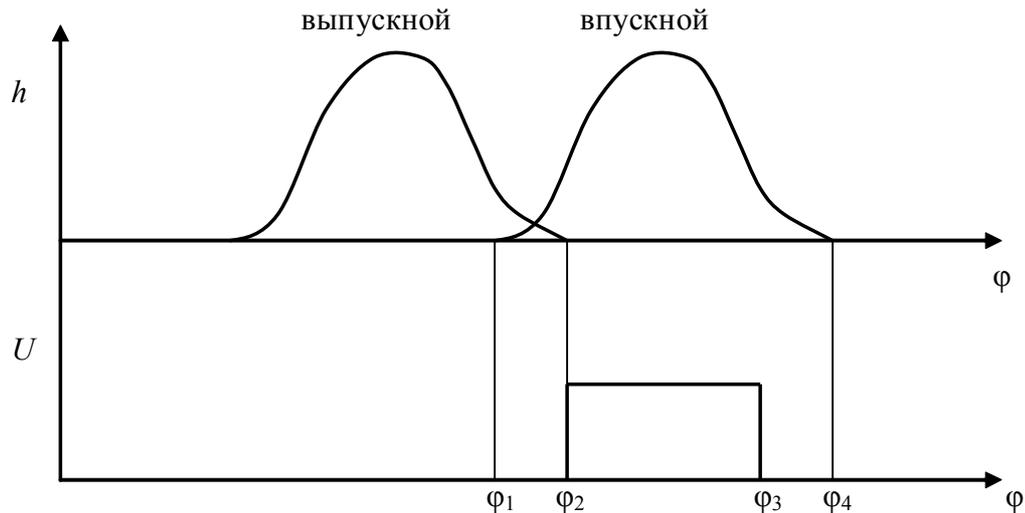


Рис. 3. Схема фаз открытия и закрытия впускного клапана и впрыска газового топлива по углу положения коленчатого вала во впускной трубопровод ДВС:
 h – высота подъема впускного клапана; U – напряжение питания клапана газовой форсунки;
 φ – угол положения коленчатого вала

туры и давления в рампе перед форсунками, т.к. при их работе возникают значительные колебания давления. Амплитуда колебания давления газа в рампе форсунок зависит от типа впрыска (асинхронный, одновременный, попарно параллельный, фазированный), т. е. от количества одновременно открытых клапанов форсунок. Эта амплитуда может иметь значения от 0,01 до 0,1 МПа в зависимости от расхода и уровня давления газа в рампе. Изменение перепада давления газа на форсунках приводит к изменениям расхода газа, что важно учитывать для правильного его дозирования во время пуска с получением необходимого состава газоздушной смеси в цилиндрах двигателя. Кроме этого, по длине газовой рампы появляются стоячие волны давления, что приводит к увеличению разности расходов газа по отдельным форсункам и повышению токсичности отработавших газов. Это можно учесть в алгоритме управления путём введения специальных коэффициентов коррекции газовой подачи в отдельных форсунках по результатам испытаний в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и расхода воздуха в процессе пуска двигателя. Поскольку топливо подаётся через форсунки в газообразном состоянии, то из-за объёмного расхода скорость заполнения трубопроводов газом низкая, при

этом происходит вытеснение воздуха или азота при первом пуске после монтажа газовой аппаратуры на автомобиль. В этом случае скорость нарастания давления газа перед форсунками значительно ниже, чем у жидкого топлива. Это приводит к затягиванию процесса пуска по времени, т.к. коэффициент коррекции топливоподачи увеличит время открытого состояния газовых форсунок и приведёт к ещё большему провалу давления газа в рампе и большей амплитуде колебаний давления в ней.

Плотность газового топлива зависит также от температуры, и поэтому коррекция его расхода также необходима при пуске двигателя. Особенно это важно, если газовое топливо находилось в жидкой фазе, а после прохождения испарителя - в газовой фазе. При приближении к линии насыщения газа при его испарении появляются значительные флуктуации плотности по его объёму, что сложно учесть при дозировании расхода через газовые форсунки. Поэтому рекомендуется прогреть двигатель на бензине до температуры газового редуктора-испарителя не ниже $+30^{\circ}\text{C}$ с последующим переходом на пропан-бутан. Для сжиженного метана или водорода эта температура значительно ниже, т.к. линия насыщения для них находится в области криогенных температур (для метана

ниже -160°C , а для водорода ниже -253°C). Цикловое время впрыска газового топлива при пуске с учётом коррекции можно представить в следующем виде:

$$t_u = t_{u_{\text{нп}}} + t_p,$$

где $t_{u_{\text{нп}}}$ – цикловое время впрыска газа через электромагнитные форсунки при нормальных условиях, например, при $T=293,15^{\circ}\text{K}$ и $P=0,1$ МПа; $t_p = f(p; T)$ – время коррекции впрыска является функцией плотности газового топлива или температуры и давления.

Применение датчиков давления и температуры газа в рампе форсунок позволяет выполнять коррекцию топливоподдачи также и при снижении давления газа, из-за уменьшения его количества в баллоне до минимального значения, что, в свою очередь, увеличивает выработку газа из баллона, а значит и увеличивает пробег автомобиля на газовом топливе.

9. При впрыске газового топлива как в газообразном, так и в жидком состоянии при пуске двигателя не образуется топливной плёнки на внутренних поверхностях впускного воздушного трубопровода и на стенках камеры сгорания. В случае пуска со второй, третьей или последующих попыток (по ГОСТ допускается три попытки нормального пуска двигателя) в алгоритм управления двигателем не требуется вводить коррекцию газовой подачи в виду отсутствия топливной пленки, в отличие от повторных пусков на бензине. Оставшееся количество газа в газообразном состоянии в цилиндре (при отсутствии воспламенения) практически можно оценить и учесть в алгоритме управления двигателем по степени наполнения цилиндров газовой смесью и последующим её удалением из цилиндра через выпускные клапаны.

10. Одним из путей улучшения наполнения цилиндров газовой смесью и управления процессом пуска ДВС является использование электропривода (электромагнитных клапанов) выпускного и впускного клапанов. Это позволяет с помощью программы управления двигателем во время раскрутки коленчатого вала убрать режим продувки цилиндров, т. е. изменять фазы закры-

тия выпускного и открытия впускного клапанов таким образом, чтобы не было их одновременно открытого состояния. В этом случае уменьшаются потери газового топлива, снижается количество выбросов углеводородов в отработавших газах и повышается безопасность пуска из-за устранения вероятности «хлопка» в выпускной системе двигателя. Использование электропривода клапанов позволяет управлять скоростью нарастания частоты вращения коленчатого вала при пуске двигателя путём изменения фаз открытия и закрытия выпускного и впускного клапанов. Например, если раньше открыть выпускной клапан, то давление в камере сгорания снизится тоже раньше и соответственно уменьшатся силы давления на поршень. Это приведёт к снижению скорости нарастания частоты вращения коленчатого вала. Уменьшение ширины фазы открытого состояния впускного клапана приведёт к снижению наполнения цилиндра газовой смесью, что снизит газодинамические силы при сжатии. Это увеличит скорость нарастания частоты вращения коленчатого вала при пуске двигателя.

4. Развитие алгоритма управления при пуске ДВС на газовом топливе

Основные причины неустойчивого пуска ДВС или его отсутствие возникают при неисправности его элементов, элементов топливной системы или датчиков системы электронного управления:

- нарушение подачи газового топлива, например, из-за изменения расходных характеристик газовых форсунок или газового редуктора в процессе эксплуатации, отклонений в показаниях датчика массового расхода воздуха, из-за изменения наполнения цилиндров газовой смесью в процессе износа поршневой группы и впускных и выпускных клапанов и т. д.;
- плохое качество газового топлива из-за содержания большого количества механических примесей и жидкого конденсата;
- различный химический состав газового топлива из-за различных его месторождений или изготовителей и поставщиков;
- неисправности в системе зажигания;

- частота вращения коленчатого вала при прокрутке, недостаточная для пуска ДВС из-за пониженного напряжения в аккумуляторной батарее или высокой вязкости моторного масла при отрицательных температурах окружающего воздуха и т. д.

При пуске ДВС первые четыре причины практически невозможно разделить, не имея дополнительных контрольных датчиков, и поэтому для них решение по алгоритму адаптации топливоподачи при пуске можно объединить. Пятую причину можно идентифицировать с помощью датчика положения коленчатого вала, имеющего чувствительность к низкой частоте вращения.

Соответственно совершенствовать алгоритм пуска необходимо при вышеназванных отклонениях. При пуске ДВС из-за того, что датчик кислорода начинает выдавать рабочий сигнал только после его прогрева до рабочей температуры, а датчик расхода воздуха имеет свой порог чувствительности, невозможно определить, бедная или богатая газоздушная смесь поступает в цилиндры. Поэтому обычно газовая подача при пуске осуществляется по средним таблицам расхода воздуха в зависимости от частоты вращения коленчатого вала и температуры двигателя. Более точный расчёт газовой подачи можно делать при пуске двигателя по зависимости расхода воздуха от значений измеренного давления и температуры воздуха в его впускной системе. Соответственно алгоритм адаптации пуска можно построить следующим образом:

- ввести счётчик количества пусков ДВС, значение которого сбрасывается до 0 по прохождении заданного времени, например 200...300 с;

- алгоритм изменения газовой подачи необходимо включать не ранее второй или третьей попытки пуска ДВС в течение заданного времени;

- при отсутствии пуска ДВС с первой попытки во второй и последующих попытках организовать подачу газового топлива при пуске так, чтобы она изменялась, например, от бедного к богатому составу смеси до появления устойчивых вспышек в цилиндрах. Наличие устойчивых вспышек в цилин-

драх можно фиксировать по нарастанию частоты вращения коленчатого вала. При этом следует прекратить изменение коэффициента коррекции газовой подачи или его отсутствие;

- сохранить в памяти контроллера значение коэффициента обучения, при котором состоялся пуск ДВС, для последующих его пусков, например, для мультипликативной функции циклового расхода газа:

$$G_{ци\ газ} = G_{ц0\ газ} K_{об} ,$$

где $G_{ци\ газ}$ – значение цикловой подачи газа при i -ом пуске; $G_{ц0\ газ}$ – номинальное значение цикловой подачи газа; $K_{об} = f(n; G_g; t_{двс}; N_g)$ – безразмерный коэффициент обучения, который является функцией частоты вращения коленчатого вала, расхода воздуха G_g через ДВС, его температуры $t_{двс}$ и количества пусков N_g . Эту функцию можно задать в виде линейной характеристики, изменяющейся от 0,5 до 2. Если коэффициент коррекции не достиг своего предельного значения, равного 2, то при последующем неустойчивом пуске он продолжает увеличиваться до этого значения или до значения устойчивого пуска двигателя.

Функцию цикловой подачи газа при i -ом пуске можно задать и в аддитивной форме, например: $G_{ци\ газ} = G_{ц0\ газ} (1 + K_{об})$, где функция коэффициента обучения $K_{об}$ будет изменяться от -0,5 до +1.

При низких значениях частоты вращения коленчатого вала при прокрутке ДВС (его пуске) наполнение цилиндров газоздушной смесью значительно меньше, чем при более высокой частоте. Соответственно будет низким значение давления в камере сгорания в конце процесса сжатия. Это значит, что будут занижены и поцилиндровая мощность, и крутящий момент, что затруднит раскрутку коленчатого вала при пуске ДВС. Для двигателей, не адаптированных по степени сжатия под газовое топливо, это ещё больше усугубит положение при пуске из-за снижения мощности и крутящего момента при переключении с бензина на газовое топливо. В этом случае рекомендуется пуск выполнять на бензине. При пуске на газе возможно реализовать следующий алгоритм:

- при прокрутке коленчатого вала стартером, если частота вращения, например, ниже 60 1/мин, включается алгоритм обеднения газовой смеси при пуске двигателя;

- необходимо так организовать его цикловую подачу, чтобы газоздушная смесь была бедной на 10...20 % в зависимости от частоты прокрутки коленчатого вала. При этом, чем ниже частота, тем больше процент обеднения. В этом случае коэффициент коррекции газовой подачи при пуске задают в зависимости от частоты прокрутки и температуры двигателя;

- при пуске двигателя необходимо управлять углом опережения зажигания в зависимости от параметров, указанных в работе [5].

Одним из перспективных направлений совершенствования двигателя и его пуска при работе на газовом топливе является непосредственный впрыск газа в камеру сгорания в процессе сжатия. В этом случае можно избежать потерь мощности и крутящего момента путём улучшения наполнения цилиндров газоздушной смесью. Но реализация непосредственного впрыска приведёт к усложнению газовой топливной системы и снижению выработки газа из баллона.

Заключение

1. В отличие от пуска на бензине, на процесс пуска двигателя на газовом топливе оказывают влияние дополнительные факторы, которые определяются особенностями его состояния на борту транспортного средства.

2. Для выполнения высоких требований по токсичности отработавших газов прогрев двигателя на газовом топливе необходимо осуществлять при соответствующем обеднении газоздушной смеси, поступающей в цилиндры.

3. В электронном блоке управления показаны особенности алгоритма пуска ДВС на газовом топливе.

4. Даны предложения по развитию алгоритма управления при пусках ДВС на газовом топливе при различных отклонениях от средних параметров топлив, показаний датчиков системы управления и технического состояния двигателя.

Библиографический список

1. Шишков, В. А. Работа системы управления ДВС с искровым зажиганием на газовом топливе при пропусках воспламенения [Текст] / В. А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. Международный научно-технический журнал. - 2009. - №4. - С.14-21.

2. Шишков, В. А. Использование энергии перепада давления газа на электромагнитных форсунках (эжекция) для улучшения наполнения цилиндров ДВС смесью газового топлива с воздухом [Текст] / В. А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. Международный научно-технический журнал. - 2009. - №3. - С.31-35.

3. Шишков, В. А. Алгоритм адаптации электронной системы управления ДВС к различным химическим составам газового топлива [Текст] / В. А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. Международный научно-технический журнал. - 2008. - №1. - С.30-35.

4. Шишков, В. А. Алгоритм управления и диагностики состояния электромагнитных газовых форсунок ДВС с искровым зажиганием [Текст] / В. А. Шишков // АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо. Международный научно-технический журнал. - 2006. - № 6 (30). - С.46-48.

5. Шишков, В. А. Определение величины увеличения угла опережения зажигания при переключении с бензина на газ в зависимости от скорости горения топливной смеси [Текст] / В. А. Шишков // Транспорт на альтернативном топливе. Международный научно-технический журнал. - 2008. - №3. - С.20-23.

**PECULIARITIES OF STARTING A SPARK-IGNITION
GAS FUEL INTERNAL COMBUSTION ENGINE**

© 2011 V. A. Shishkov

Samara State Aerospace University
named after academician S. P. Korolyov (National Research University)

The paper deals with starting a spark-ignition gas fuel internal combustion engine with an electronic control system. The influence of the engine temperature on the gas supply characteristics during starting and warming up is shown. The basics and peculiarities of the algorithm of starting a gas fuel internal combustion engine with an electronic control system are described.

Internal combustion engine, electronic system of engine control, gas fuel, algorithm, starting an engine.

Информация об авторе

Шишков Владимир Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроения, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С. П. Королёва (национальный исследовательский университет), начальник технического отдела ООО «Рекар». E-mail: Vladimir-Shishkov@yandex.ru. Область научных интересов: системы управления ДВС на альтернативных видах топлива.

Shishkov Vladimir Alexandrovitch, candidate of technical sciences, associate professor of the department of mashinostroenie, Samara State Aerospace University named after academician S. P. Korolyov (National Research University). E-mail: Vladimir-Shishkov@yandex.ru. Area of research: control systems of internal combustion engines using alternative kinds of fuel.