

УДК 621.433

Способ подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания

А. А. Воробьев¹, А. Л. Пенкин², Д. Р. Ведерникова²

¹ Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Россия, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

² Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Россия, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

Для цитирования: Воробьев А. А., Пенкин А. Л., Ведерникова Д. Р. Способ подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания // Известия Петербургского государственного университета путей сообщения. СПб.: ПГУПС, 2024. Т. 21, вып. 3. С. 661–669. DOI 10.20295/1815-588X-2024-03-661-669

Аннотация

Цель: разработка нового способа подачи топлива, так как наиболее часто реализуемые способы топливоподачи в газовых двигателях имеют существенные недостатки. **Методы:** на основе распределенной и непосредственной подачи топлива был разработан комбинированный способ, представляющий собой совокупность данных видов топливоподачи. **Результаты:** такой способ подачи топлива компенсирует недостатки как распределенной подачи (снижение наполнения цилиндров, аккумуляирование топливовоздушной смеси во впускной системе и потери топлива на перекрытии клапанов), так и непосредственной (некачественное смесеобразование в режимах низких и полных нагрузок). На различных режимах работы двигателя задействуются данные виды впрыска топлива в разных сочетаниях, ввиду чего преимущества распределенного и непосредственного впрыска топлива суммируются. В областях низких нагрузок осуществляется распределенный впрыск либо комбинация распределенного и непосредственного. На средних нагрузках возможно использование только непосредственного впрыска. При полной нагрузке возможен впрыск топлива из двух форсунок за один цикл. Предложено усовершенствование распределенной подачи в составе комбинированной с целью исключения аккумуляирования топлива во впускном коллекторе. Такой эффект достигается за счет использования редуктора с электронным управлением, позволяющего подавать топливо с разными величинами давления для создания направленного движения струи газа, что позволяет также улучшить смесеобразование. **Практическая значимость:** предложенный способ подачи природного газа обеспечивает оптимальный состав топливовоздушной смеси при всех режимах работы, повышение коэффициента наполнения, исключение потерь топлива на перекрытии клапанов.

Ключевые слова: газовое топливо, природный газ, подача топлива, коэффициент наполнения, качество смесеобразования, экологичность двигателей

Введение

Известные способы подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания — центральная и распределенная подачи — обладают рядом несовершенств, которые снижают как энергоэффективность, так и экологичность двигателя [1]. В связи с этим становятся актуальными поиск и разработка альтернатив наиболее распространенным способам подачи.

Для обоснования нового способа подачи топлива необходимо рассмотреть существующие виды топливоподачи, их преимущества и недостатки. В газовых двигателях могут применяться следующие виды подачи топлива: центральная и распределенная подача, непосредственный впрыск топлива. В газодизельных двигателях подача газа также может осуществляться через двухтопливную форсунку.

Центральная подача

Центральная подача (рис. 1) подразумевает впрыск топлива во впускной трубопровод до впускного коллектора через одну форсунку [2–4]. При внешнем смесеобразовании топливовоздушная смесь имеет тенденцию к аккумулярованию во впускном коллекторе, вследствие чего во время перекрытия клапанов часть топливовоздушной смеси, не сгорев, попадает в выпускной трубопровод. Это вызывает понижение коэффициента наполнения, а также экономичности и экологичности работы двигателя.

Центральная подача топлива имеет следующие преимущества:

- 1) простота конструкции и обслуживания по сравнению с более современными типами топливоподачи;
- 2) более совершенная оптимизация дозирования топлива по сравнению с карбюраторной системой питания;
- 3) высокая надежность ввиду расположения форсунки в потоке охлаждающего воздуха.

К недостаткам следует отнести:

- 1) неравномерность распределения компонентов топливовоздушной смеси по цилиндрам двигателя;
- 2) повышение гидравлического сопротивления во впускном трубопроводе по причине нахождения в нем форсунки;
- 3) потерю топлива во время перекрытия клапанов, а также аккумулярование топлива во впускной системе.

Распределенная подача

Распределенная подача топлива предполагает, что каждый цилиндр обслуживается отдельной форсункой, находящейся во впускном канале, вблизи впускного клапана (рис. 2).

Распределенная подача на данный момент применяется во многих двигателях и обладает следующими преимуществами:

- 1) высокая экологичность и экономичность, обусловленные более равномерным составом топливовоздушной смеси по цилиндрам и более совершенным дозированием топлива;
- 2) высокая динамичность автомобиля;
- 3) высокий коэффициент наполнения;
- 4) большие возможности для применения наддува;
- 5) автоматизация настройки параметров;
- 6) стабильность функционирования системы в различных климатических условиях [2–4].

Несмотря на наличие большого количества преимуществ данной системы по сравнению с более ранними способами топливоподачи, имеются следующие недостатки:

- 1) высокие требования к фракционному составу топлива;
- 2) высокая вероятность возникновения детонации (по сравнению с непосредственным впрыском);
- 3) потери топлива во время перекрытия клапанов.

Подача через двухтопливную форсунку

Двухтопливная форсунка одновременно подает дизельное топливо и природный газ в режиме работы двигателя по газодизельному циклу (рис. 3). При этом через отверстия форсунки подается как дизельное топливо (запальная доза), так и газовое, причем сопловые отверстия для подачи дизельного топлива имеют меньший диаметр, чем способствуют лучшему распылению и самовоспламенению. Горение в данных областях распространяется в полости цилиндра в зоны бедных топливовоздушных смесей [5].

Особым преимуществом двухтопливной форсунки является компактность, что позволяет снизить массогабаритные показатели двигателя.

Недостатками являются сложность конструкции и высокая стоимость.

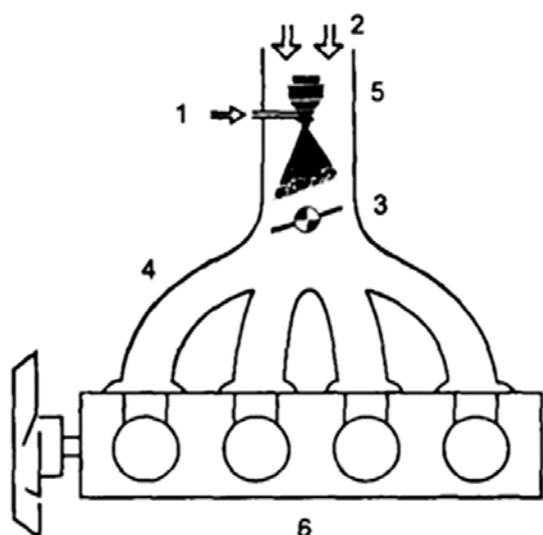


Рис. 1. Схема центральной подачи топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка; 4 — впускной коллектор; 5 — форсунка; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

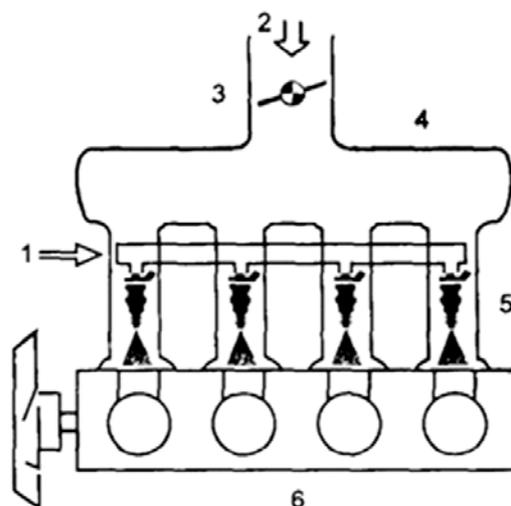


Рис. 2. Схема распределенной подачи топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка; 4 — впускной коллектор; 5 — топливная рампа и форсунки; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

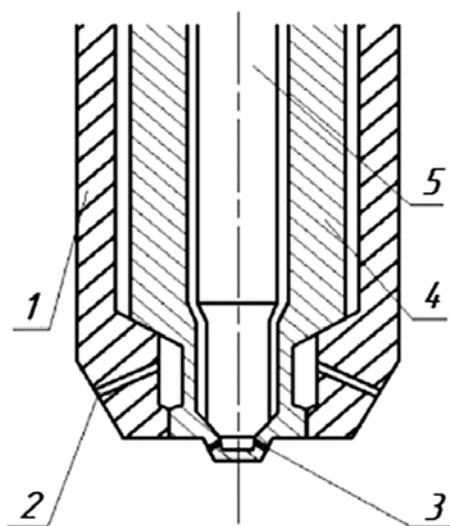


Рис. 3. Схема двухтопливной форсунки: 1 — корпус форсунки; 2 — сопла распыления природного газа; 3 — сопло распыления дизельного топлива; 4 — игла форсунки (природный газ); 5 — игла форсунки (дизельное топливо) [6]

Непосредственный впрыск

При непосредственном впрыске подача топлива осуществляется под высоким давлением, смесеобразование происходит внутри цилиндра (рис. 4, 5).

Двигатели с непосредственным впрыском, использующие природный газ в качестве моторного топлива, имеют потенциал для достижения такого же теплового КПД, как и у дизельных двигателей, сохраняя при этом выбросы NO_x и твердых частиц на более низком уровне [7, 8].

На режимах низких нагрузок непосредственный впрыск производится на такте впуска для улучшения смесеобразования. При низких оборотах двигателя в цилиндре снижена интенсивность вихреобразования, в связи с чем необходимо больше времени для образования смеси.

Послойное смесеобразование обеспечивает повышение эффективных показателей

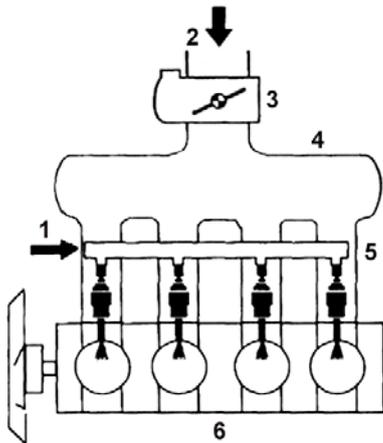


Рис. 4. Схема непосредственного впрыска топлива в газовом двигателе: 1 — подача топлива; 2 — поток воздуха; 3 — дроссельная заслонка с электронным управлением; 4 — впускной коллектор; 5 — топливная рампа и форсунки; 6 — блок цилиндров двигателя [2]

двигателя на режимах средних нагрузок за счет качественного управления. Такой подход подразумевает распределение заряда на горючую и негорючую части, при этом горючая часть заряда должна располагаться на близком расстоянии от свечи зажигания. В зависимости от нагрузки на двигатель соотношение горючей и негорючей частей заряда меняется. Однако между данными частями заряда существует переходная зона, топливовоздушная смесь в которой является переобедненной и не

сгорает. В связи с чем расслоение заряда считается наиболее качественным при сведении к минимуму количества топлива в переходной зоне. Некачественное расслоение заряда приводит к снижению индикаторного КПД и повышению выбросов СН [3]. В режиме послойного сгорания впрыск топлива осуществляется после закрытия впускного клапана.

На режимах высоких нагрузок непосредственный впрыск может увеличить турбулентность в цилиндре из-за потока распыленного топлива, что способствует сокращению времени, требуемого для смешивания топлива с воздухом. Однако относительно небольшие время и путь смешивания могут способствовать получению худшей однородности топливовоздушной смеси по сравнению с распределенной подачей топлива [8].

Также при применении непосредственного впрыска возможно использование двухстадийного впрыскивания. Данный метод смесеобразования позволяет создавать зоны стехиометрической смеси вблизи свечи зажигания при бедном составе смеси в остальной части цилиндра.

Для воспламенения газового топлива требуется высокое напряжение свечи зажигания, что может привести к более интенсивному нагарообразованию на электродах и сокращению срока службы свечи зажигания [10].

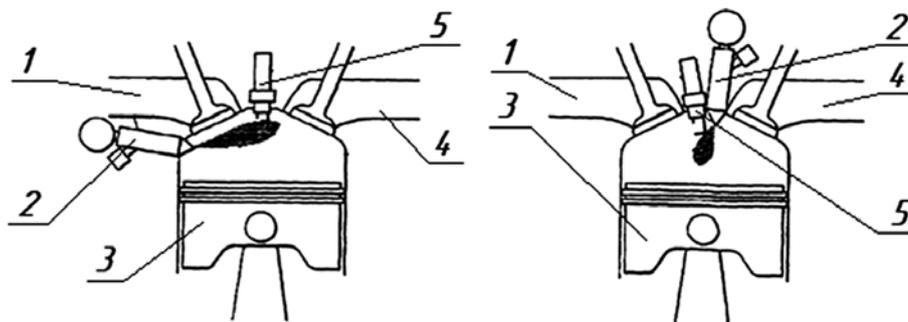


Рис. 5. Варианты осуществления непосредственного впрыска топлива: 1 — впускной канал; 2 — форсунка; 3 — поршень; 4 — выпускной канал; 5 — свеча зажигания [9]

Также среди недостатков непосредственного впрыска топлива можно отметить тяжелые температурные условия работы форсунки, необходимость применения специальных нейтрализаторов отработавших газов. В частности, для непосредственной подачи требуются специальные форсунки, способные создавать большой перепад давления, так как требуется подача большого объема газа для соответствия эффективным показателям, достигаемым при использовании жидких топлив [11].

Комбинированная подача

Комбинированная подача топлива объединяет в себе непосредственный и распределенный впрыск (рис. 6). Топливо поступает в цилиндр через две форсунки, одна из которых впрыскивает топливо во впускной канал, а другая — прямо в цилиндр двигателя. Данный вид топливоподачи на данный момент широко используется на бензиновых двигателях, но не применяется на газовых двигателях.

Данный подход обеспечивает повышение наполнения цилиндра. В связи с этим у двигателей, оснащенных таким видом подачи топлива, есть предпосылки к повышению мощностных показателей. При этом чем большее количество топлива будет подаваться непосредственно

в цилиндр после закрытия впускного клапана, тем выше будут мощностные показатели.

При осуществлении такого вида топливоподачи возможна работа двигателя по следующему алгоритму:

1. В областях низких нагрузок осуществляется распределенный впрыск либо комбинация распределенного и непосредственного. На данном режиме в цилиндр поступает недостаточное количество воздуха ввиду малого открытия дросселя. При этом в цилиндре остается большое количество остаточных газов, из-за чего на данных режимах работы наблюдается низкое качество сгорания. Для повышения качества сгорания производят обогащение смеси. Однако при наличии комбинированной подачи топлива возможен выпуск в цилиндр однородной бедной смеси, образованной во впускной системе с помощью форсунки распределенного впрыска. Данная смесь в цилиндре смешивается с остаточными газами. После закрытия впускного клапана форсунка непосредственного впрыска создает рядом со свечой зажигания зону обогащенной смеси, которая является мощным очагом воспламенения. Горение от очага воспламенения распространяется по всему цилиндру и эффективно сжигает бедную смесь.

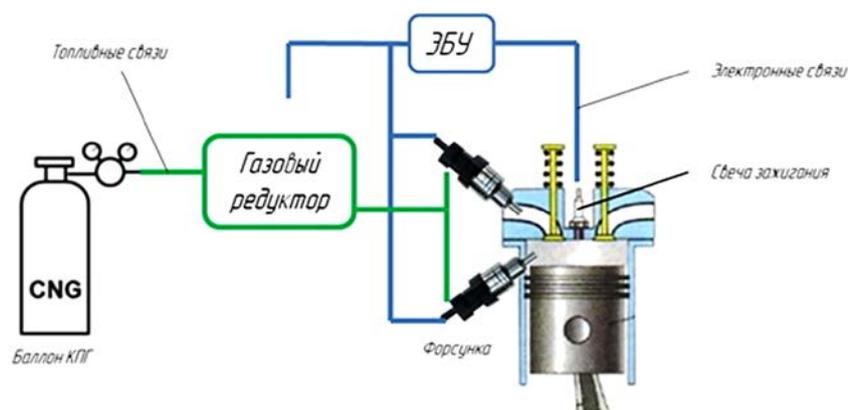


Рис. 6. Схема комбинированной подачи топлива

2. На средних нагрузках возможно использование только непосредственного впрыска. На данных режимах работы повышается коэффициент наполнения за счет введения в цилиндр только воздуха, а не топливоздушнoй смеси.

3. При полной нагрузке возможен впрыск топлива из двух форсунок за один цикл. На такте впуска топливо подается форсункой во впускном канале, а на такте сжатия происходит непосредственный впрыск недостающего количества топлива. Таким образом, в цилиндр вводится такое количество топлива, которое необходимо для текущего режима работы. При этом топливоздушная смесь в объеме цилиндра является однородной благодаря впуску топлива через форсунку во впускном канале, что обеспечивает повышение полноты сгорания и снижение токсичности отработавших газов.

На данный вид топливоподачи теоретически возможно переоборудовать серийный двигатель в эксплуатации. В газовых двигателях это возможно за счет установки дополнительных форсунок во впускных каналах или в головке блока цилиндров. На бензиновых двигателях с комбинированной подачей бензина возможно произвести замену форсунки распределенной подачи на газовую форсунку, а форсунку непосредственного впрыска — на двухтопливную форсунку. Переоборудование дизельного двигателя в газодизель возможно осуществить за счет установки дополнительных форсунок распределенного впрыска во впускные каналы и замены штатной дизельной форсунки на двухтопливную. Однако если размеры головки блока цилиндров двигателя, который конвертируется на комбинированную подачу природного газа, позволяют установить совместно со штатной форсункой дополнительную газовую, то в установке двухтопливной форсунки не будет необходимости.

Из недостатков данного вида топливоподачи можно отметить увеличение количества движущихся элементов, повышение стоимости двигателя, увеличение трудоемкости и затрат на обслуживание. Также для осуществления возможности впрыска газа под высоким давлением необходимо использовать форсунки, обеспечивающие больший перепад давления, чем для двигателей с непосредственным впрыском бензина или дизельного топлива.

Усовершенствование распределенной подачи в составе комбинированной

Как было отмечено ранее, непосредственный впрыск топлива позволяет повысить наполнение цилиндра. В то же время распределенная подача топлива по направляющим газовым трубкам снижает наполнение цилиндра воздухом [1], а также может способствовать потерям топлива во время перекрытия клапанов.

Чтобы исключить данные негативные влияния, в ряде исследований задачу улучшения смесеобразования в распределенной подаче решают без установки дополнительных элементов во впускной системе, а путем регулирования положения струи газа в потоке воздуха, что осуществляется за счет электронного регулирования давления подачи газа с использованием редуктора с электронным управлением [12, 13], который позволяет изменять давление впуска газа от 2 до 10 бар.

Редуктор с электронным управлением позволяет регулировать струю газа таким образом, чтобы топливо подавалось не во впускной коллектор, а во впускной канал, а также подача производилась после закрытия выпускного клапана.

Заключение

Рассмотрены различные виды подачи природного газа в двигатель внутреннего

сгорания. Предложен новый способ подачи газового топлива (комбинированная подача), предусматривающий для каждого цилиндра двигателя наличие двух систем подачи: распределенной и непосредственной. Предполагается, что на разных режимах работы двигателя данные виды впрыска топлива задействуются в разных комбинациях.

Для регулирования подачи топлива через форсунки распределенного впрыска с целью предотвращения аккумуляирования топлива во впускном коллекторе предлагается использование редуктора с электронным управлением, позволяющего подавать топливо с разными величинами давления для создания направленного движения струи газа. Такой подход позволяет не использовать для подачи топлива газовые направляющие трубки.

К преимуществам такого способа подачи топлива возможно отнести оптимальный состав смеси на всех режимах работы, повышение коэффициента наполнения, исключение потерь топлива на перекрытии клапанов, а также наличие возможности установки данного вида подачи топлива на серийные двигатели в эксплуатации.

Среди недостатков данного вида топливоподачи можно отметить высокую сложность и стоимость системы.

Исследования, выполняемые по данной тематике, проводились в рамках реализации федеральной программы поддержки университетов «Приоритет-2030».

Библиографический список

1. Оценка влияния элементов топливной системы на коэффициент наполнения газового двигателя / А.Л. Пенкин [и др.] // Грузовик. 2024. № 5. С. 15–20. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-5-15-20. EDN FVPAWX.

2. Системы управления бензиновыми двигателями / пер. с нем. М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2005. 432 с.

3. Двигатели внутреннего сгорания: в 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 2005. 479 с.

4. Application of Natural Gas for Internal Combustion Engines, *Advances in Natural Gas Technology / Rosli Abu Bakar* [et al.]; ed. Dr. Hamid Al-Megren. 2012.

5. Двухтопливная форсунка ДВС: патент на изобретение № 2784 858, Рос. Федерация МПК F02M 43/04 (2022.08); F02M 51/061 (2022.08). № 2022113950 / В.В. Гаврилов, Д.Д. Богачев, В.В. Калининченко. заявл. 25.05.2022. Заявитель: ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова».

6. Performance of a direct-injection natural gas engine with multiple injection strategies / M. Li [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116363.

7. *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines* / ed. by Hua Zhao. Elsevier, 2014. 312 p.

8. Moon S. Potential of Direct-Injection for the Improvement of Homogeneous-Charge Combustion in Spark-Ignition Natural Gas Engines // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 136. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.068.

9. Двигатель внутреннего сгорания на газовом топливе и способ управления двигателем внутреннего сгорания на газовом топливе: патент на изобретение № 2411 386. Рос. Федерация, МПК F02D 19/02 (2006.01) F02M 21/02 (2006.01). № 2008130588/06 / Синагава Томохиро, Судзуки Макото; Тойота Дзидося Кабусики Кайся; заявл. 28.12.2006.

10. Numerical investigations on pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* / M. Li [et al.] // Elsevier. 2021. Vol. 150.

11. Шишков В. А. Непосредственный впрыск газового топлива в камеру сгорания ДВС с искровым зажиганием // Транспорт на альтернативном топливе. 2010. № 6 (18).

12. Пенкин А. Л., Метлякова С. А. Способ повышения однородности газозвушной смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания // International Journal of Advanced Studies. 2023. Т. 13, № 1. С. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158.

13. Пенкин А. Л., Метлякова С. А., Воробьев А. А. Исследование расчетных методов проникновения

струи газового топлива в поток воздуха // ТТПС. 2023. № 1 (63).

Дата поступления: 14.06.2024

Решение о публикации: 01.09.2024

Контактная информация:

ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич —
докт. техн. наук, доцент; nttk@pgups.ru

ПЕНКИН Алексей Леонидович —
канд. техн. наук, доцент; apenkin1@gmail.com

ВЕДЕРНИКОВА Дарья Рудольфовна —
магистрант; v3dernikowad@yandex.ru

The method of supplying fuel to an internal combustion gas engine

A. A. Vorobev¹, A. L. Penkin², D. R. Vedernikova²

¹ Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, Moskovsky pr., 9, Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

² Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeiskaya Str. 4, Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

For citation: Vorobev A. A., Penkin A. L., Vedernikova D. R. Method of fuel supply to a gas internal combustion engine // Proceedings of Petersburg Transport University. PGUPS. 2024. Vol. 21, iss. 3. P. 661–669. (In Russian) DOI 10.20295/1815-588X-2024-03-661-669

Abstract

Purpose: due to the significant disadvantages of the most commonly implemented fuel supply methods in gas engines, the goal was set to develop a new method of fuel supply. The advantages and disadvantages of existing methods of fuel supply in gas engines, such as central, distributed and direct supply, fuel supply through a dual-fuel nozzle, are considered. **Methods:** on the basis of distributed and direct fuel supply, a combined method was developed, which is a combination of these types of fuel supply. **Results:** this method of fuel supply compensates for the disadvantages of distributed supply (reduction of cylinder filling, accumulation of fuel-air mixture in the intake system and fuel losses at valve closures) and direct (poor-quality mixing in low and full load modes). In different engine operating modes, these types of fuel injection are used in different combinations, which is why the advantages of distributed and direct fuel injection are summed up. In areas of low loads, distributed injection is carried out, or a combination of distributed and direct injection. At medium loads, only direct injection is possible. At full load, it is possible to inject fuel from two injectors in one cycle. An improvement of the distributed feed as part of the combined one is proposed in order to eliminate fuel accumulation in the intake manifold. This effect is achieved through the use of an electronically controlled gearbox, which allows fuel to be supplied with different pressure values to create a directional movement of the gas jet, which also improves mixing. **Practical importance:** the proposed method of supplying natural gas ensures the optimal composition of the fuel-air mixture in all operating modes, increasing the filling ratio, eliminating fuel losses on valve closures.

Keywords: gas engine, natural gas, fuel supply, filling ratio, mixing quality, environmental friendliness of engines

References

1. Ocenka vliyaniya elementov toplivnoj sistemy na koefficient napolneniya gazovogo dvigatelya / A.L. Penkin [i dr.] // *Gruzovik*. 2024. № 5. S. 15–20. DOI: 10.36652/1684-1298-2024-5-15-20. EDN FVPAWX. (In Russian)
2. *Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami / per. s nem.* M.: OOO “Knizhnoe izdatel’stvo “Za rulem”, 2005. 432 s. (In Russian)
3. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: v 3 kn. Kn. 1. Teoriya rabochih processov: uchebnik dlya vuzov / V.N. Lukanin [i dr.]; pod red. V.N. Lukanina. 2-e izd., pererab. i dop.* M.: Vysshaya shkola, 2005. 479 s. (In Russian)
4. Application of Natural Gas for Internal Combustion Engines, *Advances in Natural Gas Technology / Rosli Abu Bakar [et al.]; ed. Dr. Hamid Al-Megren.* 2012.
5. Dvuhtoplivnaya forsunka DVS: patent na izobretenie № 2 784 858, Ros. Federaciya MPK F02M 43/04 (2022.08); F02M 51/061 (2022.08). № 2022113950 / V.V. Gavrilov, D.D. Bogachev, V.V. Kalinichenko. *zayavl. 25.05.2022. Zayavitel’*: FGBOU VO “Gosudarstvennyj universitet morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova”. (In Russian)
6. Performance of a direct-injection natural gas engine with multiple injection strategies / M. Li [et al.] // *Energy*. 2019. Vol. 189. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116363.
7. *Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development: Gasoline and Gas Engines / ed. by Hua Zhao.* Elsevier, 2014. 312 p.
8. Moon S. Potential of Direct-Injection for the Improvement of Homogeneous-Charge Combustion in Spark-Ignition Natural Gas Engines // *Applied Thermal Engineering*. 2018. Vol. 136. P. 41–48. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2018.01.068.
9. Dvigatel’ vnutrennego sgoraniya na gazovom toplive i sposob upravleniya dvigatelem vnutrennego sgoraniya na gazovom toplive: patent na izobretenie № 2 411 386. Ros. Federaciya, MPK F02D 19/02 (2006.01) F02M 21/02 (2006.01). № 2008130588/06 / Sinagava Tomohiro, Sudzuki Makoto; Tojota Dzidosya Kabusiki Kajsya; *zayavl. 28.12.2006.* (In Russian)
10. Numerical investigations on pilot ignited high pressure direct injection natural gas engines: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews / M. Li [et al.] // Elsevier.* 2021. Vol. 150.
11. Shishkov V.A. Neposredstvennyj vprysk gazovogo topliva v kameru sgoraniya DVS s iskrovyim zazhiganiem // *Transport na al’ternativnom toplive*. 2010. № 6 (18). (In Russian)
12. Penkin A. L., Metlyakova S. A. Sposob povysheniya odnorodnosti gazovozdushnoj smesi v transportnyh dvigatelyah vnutrennego sgoraniya // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. T. 13, № 1. S. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158. (In Russian)
13. Penkin A. L., Metlyakova S. A., Vorob’ev A. A. Issledovanie raschetnyh metodov proniknoveniya strui gazovogo topliva v potok vozduha // *TTPS*. 2023. № 1 (63). (In Russian)

Received: 14.06.2024

Accepted: 01.09.2024

Author’s information:

Aleksandr A. VOROB’EV — D. Sci. in Engineering, Associate Professor; ntk@pgups.ru

Aleksei L. PENKIN — PhD in Engineering, Associate Professor; apenkin1@gmail.com

Dar’ya R. VEDERNIKOVA — Master’s Degree Student; v3dernikowad@yandex.ru