

УДК 62-144.3+62-621.2

## Исследование процесса впуска в газовых двигателях с внешним смесеобразованием

А. Л. Пенкин<sup>1</sup>, А. А. Воробьев<sup>2</sup>, А. А. Соболев<sup>2</sup>, С. А. Метлякова<sup>2</sup>,  
Д. Р. Ведерникова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Российская Федерация, 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4

<sup>2</sup>Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

**Для цитирования:** Пенкин А. Л., Воробьев А. А., Соболев А. А., Метлякова С. А., Ведерникова Д. Р. Исследование процесса впуска в газовых двигателях с внешним смесеобразованием // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 4. — С. 902–908. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-902-908

### Аннотация

**Цель:** Обозначить существующие проблемы, а именно низкую однородность топливовоздушной смеси и потери топлива при перекрытии клапанов, и преимущества центральной подачи топлива, а именно ее относительную простоту настройки и расположения газовых форсунок, и ее основные отличия от распределенной подачи. Обозначить существующие способы решения указанных проблем. Показать неэкологичность и неэкономичность применения центральной подачи. Рассчитать количество топлива, попадающего в выпускную систему двигателя при перекрытии клапанов. Показать пути повышения полноты использования топлива в процессе работы двигателя. **Методы:** Расчет массы природного газа, попадающего в выпускную систему двигателя в период перекрытия клапанов, с учетом длительности периода, площади сечения клапанной щели, общего количества топлива, поданного в процессе такта впуска, плотности топлива, скорости потока при попадании в цилиндр и стехиометрического соотношения. **Результаты:** Показана необходимость учета количества топлива, потребляемого при работе газового двигателя. Указаны существующие проблемы применения центральной подачи топлива. Сформулирован и обоснован способ расчета потерь газового топлива при перекрытии клапанов. Установлено, какие параметры оказывают влияние на массу топлива, не попавшего в цилиндр в процессе впуска. Сделан вывод о необходимости применения иных способов подачи либо значительного усовершенствования процесса впуска при центральной подаче. **Практическая значимость:** Показано влияние способа подачи топлива в газовый двигатель внутреннего сгорания на экологичность работы двигателя и эффективность использования топлива. Сформулирован способ расчета потерь газового топлива в период перекрытия клапанов с учетом конструктивных параметров системы впуска и длительности открытия впускных клапанов.

**Ключевые слова:** Газовый двигатель, газодизельный двигатель, природный газ, однородность газовой смеси, газоздушная смесь, аккумуляция топлива.

## Введение

В современных газовых и газодизельных двигателях в основном применяются два способа подачи топлива: центральная или распределенная. При центральной подаче газ подается в поток воздуха во впускном трубопроводе задолго до его попадания в цилиндр. Распределенная подача предполагает впрыск топлива на ближайшем возможном расстоянии от впускного клапана (например, во впускной коллектор или во впускной канал), при этом топливо подается в строго необходимом для одного цилиндра количестве. В настоящее время центральная подача является более распространенной как более простая в настройке и более легко осуществимая конструкционно.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются при центральной подаче, — это недостаточно высокая однородность топливовоздушной смеси и потери топлива, которое не попало в цилиндр на такте впуска, при перекрытии клапанов. Первая проблема может быть решена полностью или частично за счет применения турбулизаторов и миксеров (рис. 1, 2, а), позволяющих дополнительно гомогенизировать газовоздушный поток (рис. 2, б, в) [1–4], значительным недостатком которых является препятствование проникновению потока в цилиндр, а значит, снижение коэффициента наполнения. Вторая проблема остается нерешенной.

## Материалы и методы исследований

В настоящем исследовании предпринята попытка количественной оценки потерь газового топлива при центральной подаче.

В качестве предположения принято, что при центральной подаче образуется стехиометрическая топливовоздушная смесь, которая имеет тенденцию к аккумулярованию во впускном коллекторе. Так как в большинстве двигателей применяется наддув, давление во впускном коллекторе выше, чем в цилиндре и выпускном

коллекторе. В связи с чем во время перекрытия клапанов часть топливовоздушной смеси, не сгорев, попадает в выпускной трубопровод через цилиндр в качестве продувочного воздуха. Данное явление снижает общую экологичность от применения газового топлива, так как углеводородные топлива при попадании в атмосферу усиливают парниковый эффект. Также снижается экономичность, так как топливо не используется и его сгорание не производит полезную работу, при этом снижается промежуток времени между дозаправками.

Для оценки количества топлива, потерянного при перекрытии клапанов, следует рассчитать массу топлива, попадающего в выпускную систему во время перекрытия клапанов. В качестве топлива в данном исследовании принят природный газ, чьим основным компонентом является метан.

Массу природного газа, потерянного при перекрытии клапанов, найдем из уравнения (1):

$$m_{\text{пг}} = \rho_{\text{пг}} V_{\text{пг}}, \quad (1)$$

где  $V_{\text{пг}}$  — объем природного газа в топливовоздушной смеси, м<sup>3</sup>;

$\rho_{\text{пг}}$  — плотность природного газа.

Так как стехиометрическое соотношение для природного газа к воздуху равняется соответственно 1:9,52 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>[5], можно определить, что объем природного газа в топливовоздушной смеси (2):

$$V_{\text{пг}} = 0,095 V_{\text{твс}}, \quad (2)$$

где  $V_{\text{твс}}$  — объем топливовоздушной смеси, вытесняемой в выпускной трубопровод в процессе впуска.

При этом объем топливовоздушной смеси  $V_{\text{твс}}$ , вытесняемой в выпускной трубопровод в процессе впуска, можно вычислить по формуле (3):



Рис. 1. Турбулизатор, используемый при центральной подаче

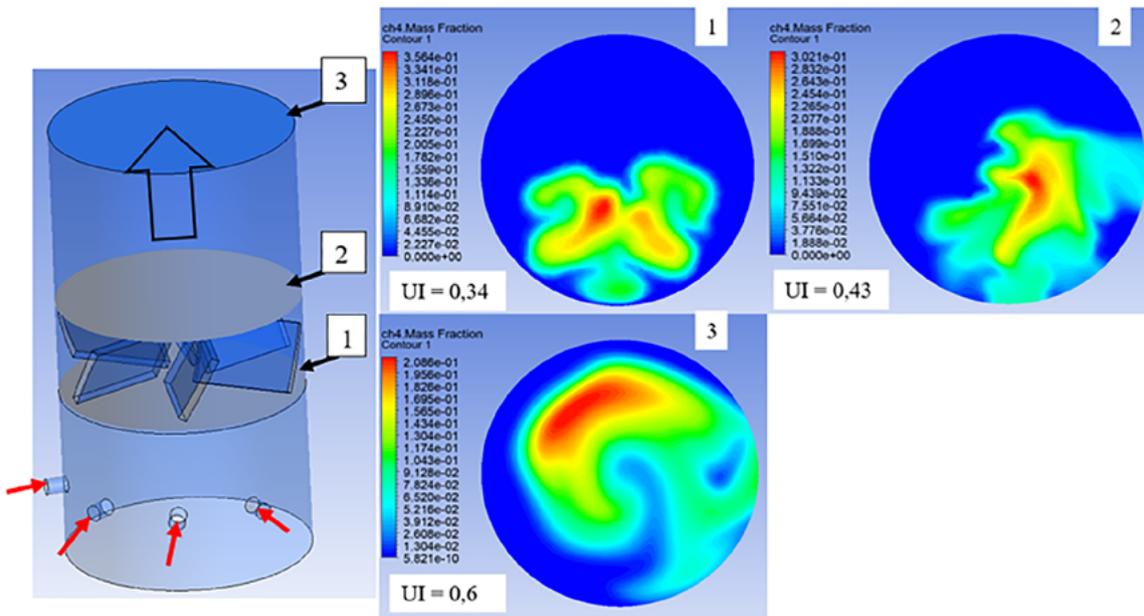


Рис. 2. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3 при давлениях: воздух — 1 атм, метан — 2,5 атм

$$V_{\text{твс}} = f_{\text{кл}} y w t - \left( \frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} S_{\text{п}} \right)_{\text{ост}}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{твс}}$  — объем топливоздушнoй смеси, м<sup>3</sup>;  
 $f_{\text{кл}}$  — площадь проходного сечения клапанной щели, м<sup>2</sup>;  
 $y$  — количество одноименных клапанов;  
 $w$  — средняя скорость течения потока топливоздушнoй смеси (первая условная средняя скорость потока) через клапанную щель, м/с;  
 $t$  — длительность перекрытия клапанов, с;  
 $V_a$  — полный объем цилиндра, м<sup>3</sup>;

$\varepsilon$  — степень сжатия;  
 $S_{\text{п}}$  — ход поршня, совершаемый за время перекрытия клапанов, м;  
 $d$  — диаметр цилиндра, м;  
 $\gamma_{\text{ост}}$  — коэффициент остаточных газов.  
 Величина  $fvt$  характеризует количество топливоздушнoй смеси, прошедшей через впускной клапан во время перекрытия клапанов, а  $\left( \frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} S_{\text{п}} \right) \gamma_{\text{ост}}$  — количество смеси, оставшейся в камере сгорания после закрытия

выпускного клапана, выражающееся как сумма объема камеры сгорания и объема, освобождаемого поршнем при движении вниз. Разность этих величин определяет количество топливовоздушной смеси, попавшей в выпускной трубопровод.

Масса природного газа, попадающего во выпускную систему во время перекрытия клапанов, может быть определена из формул (1–3). Раскроем составляющие упомянутых формул.

$f_{\text{кл}}$  — площадь проходного сечения клапана определяется по формуле (4) [6]:

$$f_{\text{кл}} = \pi h_{\text{кл}} (d_{\text{г}} \cos \alpha_{\text{ф}} + h_{\text{кл}} \cos^2 \alpha_{\text{ф}} \sin \alpha_{\text{ф}}), \quad (4)$$

где  $h_{\text{кл}}$  — высота подъема клапана, м;

$d_{\text{г}}$  — диаметр горловины клапана, м;

$\alpha_{\text{ф}}$  — угол конической фаски клапана, °.

$w$  — средняя скорость течения потока топливовоздушной смеси (первая условная средняя скорость потока) определяется по формуле (5) [5]:

$$w = \frac{c_{\text{п}} F_{\text{п}}}{i f_{\text{кл}}}, \quad (5)$$

где  $c_{\text{п}}$  — средняя скорость движения поршня, м/с;

$F_{\text{п}}$  — площадь поршня, м<sup>2</sup>.

$t$  — длительность перекрытия клапанов, определяемая по формуле (6):

$$t = \frac{\varphi_{\text{вп}} - \varphi_{\text{вып}}}{6n}, \quad (6)$$

где  $t$  — длительность периода перекрытия клапанов, с;

$\varphi_{\text{вп}}$  — угол опережения открытия впускных клапанов, °;

$\varphi_{\text{вып}}$  — угол запаздывания закрытия выпускных клапанов, °;

$n$  — частота вращения коленчатого вала, об/мин.

Из уравнения Менделеева — Клапейрона для изотермического процесса определяется плотность природного газа  $\rho_{\text{пр}}$  на впуске (7) [7]:

$$\rho_{\text{пр}} = \frac{\rho_0 p_{\text{пр}}}{p_0}, \quad (7)$$

где  $p_{\text{пр}}$  — давление природного газа на впуске;

$\rho_0$  — плотность природного газа при атмосферном давлении, кг/м<sup>3</sup>;

$p_0$  — атмосферное давление, Па.

Ход поршня  $S_{\text{п}}$ , совершаемый за время перекрытия клапанов, определяется как (8) [7]:

$$S_{\text{п}} = R \left[ 1 + \frac{1}{\lambda} - \left( \cos \varphi_{\text{вып}} + \frac{1}{\lambda} \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \varphi_{\text{вып}}} \right) \right], \quad (8)$$

где  $R$  радиус кривошипа, м;

а  $\lambda$  равна (9):

$$\lambda = \frac{R}{L}, \quad (9)$$

где  $L$  — длина шатуна, м.

Таким образом, может быть определена масса природного газа, попадающего во выпускную систему во время перекрытия клапанов.

После подстановки выражений (2–9) в формулу (1) получается следующая зависимость (10):

$$m_{\text{пр}} = \rho_{\text{пр}} \left\{ 0,095 \left[ (f_{\text{кл}} w t i) - \left( \frac{V_a}{\varepsilon} + \frac{\pi d^2}{4} \right) \gamma_{\text{ост}} \right] \right\}. \quad (10)$$

## Выводы

Оценка количества метана, потерянного при перекрытии клапанов, подтверждает несовершенство центральной подачи. При известной простоте осуществления она не позволяет использовать топливо полностью, к тому же неизвестна

порция топлива, попавшего в цилиндр на такте впуска — оно может быть избыточным или недостаточным при данной нагрузке. Таким образом, процесс впуска и образование токсичных веществ в отработавших газах не является контролируемым при центральной подаче. Распределенная подача частично решает проблему. Однако и она требует тщательного подхода к настройке подачи топлива, в частности точки его подачи и количества (должно быть учтено расстояние до впускных клапанов и направление струи) [8–10].

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

### Библиографический список

1. Пенкин А. Л. Способ повышения однородности газозооной смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания / А. Л. Пенкин, С. А. Метлякова // International Journal of Advanced Studies. — 2023. — Vol. 13. — Iss. 1. — Pp. 137–158. — DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158.
2. Patent № 2017089042 World Intellectual Property Organization, IPC F02B31/00, F02M21/02, F02M21/04, F02M35/10. “Inlet channel device”: priority data 27.11.2015; publication date 01.06.2017 / M. Kristen, R. Schmid, A. Redlich et al.; Applicant Bosch GMBH Robert. — 18 p.
3. Mahmood H. Design of Compressed Natural Gas-Air Mixer for Dual Fuel Engine Using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling / H. Mahmood, N. Adam, B. Sahari et al. // Journal of Computational and Theoretical Nanoscience. — 2017. — Vol. 14. — Pp. 1–18. — DOI: 10.1166/jctn.2017.6605.
4. Noor M. M. Development of A High Pressure Compressed Natural Gas Mixer for A 1.5 Litre CNG-Diesel Dual Engine / M. M. Noor, K. Kadirgama, R. Devarajan et al. // Paper presented at the National Conference on Design and Concurrent Engineering. — 2008. — 28–29 Oct., Melaka. — Pp. 435–438.
5. Генкин К. И. Газовые двигатели / К. И. Генкин. — М.: Машиностроение, 1977. — 193 с.
6. Луканин В. Н. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 2. Динамика и конструирование: учеб. / В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров и др.; под ред. В. Н. Луканина. — М.: Высш. шк., 1995. — 319 с.
7. Ховах М. С. Автомобильные двигатели: теория, расчет и конструкция двигателей внутреннего сгорания: учебник для автомоб.-дор. техникумов / М. С. Ховах, Г. С. Маслов. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1971. — 456 с.
8. Пат. 2008460 Российская Федерация, МПК F02B 31/00 (1990.01). Впускной трубопровод двигателя внутреннего сгорания / А. М. Абрашкин, Е. А. Матвеева; заяв. Поволжский Институт информатики, радиотехники и связи; заявл. 26.07.1990.
9. Патент 2731558 Российская Федерация, МПК F02B 43/02 (2006.01), F02B 43/04 (2006.01), F02B 43/06 (2006.01), F02B 43/12 (2006.01), F02D 19/02 (2006.01), F02M 21/02 (2006.01). Способ подачи газового топлива в двигатель внутреннего сгорания: № 2019137447; заявл. 20.01.2019; опубл. 04.09.2020 / В. А. Шишков.
10. Supee A. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance / A. Supee, R. Mohsin, Z. Majid et al. // Journal Technology (Sciences & Engineering). — 2014. — Pp. 107–115. — DOI: 10.11113/jt.v70.2292.

Дата поступления: 15.10.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

### Контактная информация:

ПЕНКИН Алексей Леонидович — канд. техн. наук; [apenkin1@gmail.com](mailto:apenkin1@gmail.com)  
 ВОРОБЬЕВ Александр Алфеевич — д-р техн. наук, доц.; [79219751198@yandex.ru](mailto:79219751198@yandex.ru)  
 СОБОЛЕВ Александр Альбертович — канд. техн. наук; [a89213194387@yandex.ru](mailto:a89213194387@yandex.ru)  
 МЕТЛЯКОВА Софья Александровна — аспирант; [halbertfly@yandex.ru](mailto:halbertfly@yandex.ru)  
 ВЕДЕРНИКОВА Дарья Рудольфовна — магистрант; [v3dernikowad@yandex.ru](mailto:v3dernikowad@yandex.ru)

## A Study of the Intake Process in Gas Engines with External Mixing of Fuel

A. L. Penkin<sup>1</sup>, A. A. Vorob'yov<sup>2</sup>, A. A. Sobolev<sup>2</sup>, S. A. Metlyakova<sup>2</sup>, D. R. Vedernikova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

<sup>2</sup>Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

**For citation:** Penkin A. L., Vororb'yov A. A., Sobolev A. A., Metlyakova S. A., Vedernikova D. R. Study of the Intake Process in Gas Engines with External Mixing of Fuel // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 4, pp. 902–908. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-4-902-908

### Summary

**Purpose:** To identify existing problems, namely the low homogeneity of the air-fuel mixture and fuel losses when valves are closed, and the advantages of central fuel injection, namely its relative ease of adjustment and location of gas injectors, and its main differences from distributed injection. To show existing ways to solve these problems. To demonstrate the lack of environmental and economic efficiency in central fuel injection. To calculate the amount of fuel entering the engine exhaust system when the valves are closed. To show ways to increase the efficiency of fuel utilization during engine operation. **Methods:** Calculation of the mass of natural gas entering the engine exhaust system during the valve overlap period, considering the duration of the period, the cross-sectional area of the valve gap, the total amount of fuel supplied during the intake stroke, the density of the fuel, the flow rate when entering the cylinder and the stoichiometric ratio. **Results:** The need to consider the amount of fuel consumed when operating a gas engine is shown. The existing problems of using central fuel supply are indicated. A method for calculating gas fuel losses when valves are closed is formulated and justified. It has been established which parameters influence the mass of fuel that does not enter the cylinder during the intake process. It is concluded that it is necessary to use other injection methods, or to significantly improve the intake process of central injection. **Practical significance:** The influence of the method of supplying fuel to a gas internal combustion engine on the environmental friendliness of the engine and fuel efficiency is shown. A method has been formulated for calculating gas fuel losses during the period of valve overlap, considering the design parameters of the intake system and the duration of opening of the intake valves.

**Keywords:** Gas engine, gas-diesel engine, natural gas, homogeneity of gas-air mixture, gas-air mixture, fuel accumulation.

### References

1. Penkin A. L., Metlyakova S. A. *Sposob povysheniya odnorodnosti gazovozdushnoy smesi v transportnykh dvigate-lyakh vnutrennego sgoraniya* [A method for increasing the homogeneity of the gas-air mixture in transport internal combustion engines]. *International Journal of Advanced Studies*, 2023, vol. 13, Iss. 1, pp. 137–158. DOI: 10.12731/2227-930X2023-13-1-137-158. (In Russian)

2. Patent № 2017089042 World Intellectual Property Organization, IPC F02B31/00, F02M21/02, F02M21/04,

F02M35/10. “Inlet channel device”: priority data 27.11.2015: publication date 01.06.2017 / M. Kristen, R. Schmid, A. Redlich et al.; Applicant Bosch GMBH Robert, 18 p.

3. Mahmood H., Adam N., Sahari B. et al. Design of Compressed Natural Gas-Air Mixer for Dual Fuel Engine Using Three-Dimensional Computational Fluid Dynamics Modeling. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 2017, vol. 14, pp. 1–18. DOI: 10.1166/jctn.2017.6605.

4. Noor M. M., Kadirgama K., Devarajan R. et al. Development of A High Pressure Compressed Natural Gas Mixer for A 1.5 Litre CNG-Diesel Dual Engine. Paper presented at the National Conference on Design and Concurrent Engineering, 2008, 28–29 Oct., Melaka, pp. 435–438.
5. Genkin K. I. *Gazovye dvigateli* [Gas engines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977, 193 p. (In Russian)
6. Lukanin V. N., Alekseev I. V., Shatrov M. G. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya. V 3 kn. Kn. 2. Dinamika i konstruirovaniye: ucheb.; pod red. V. N. Lukanina* [Internal combustion engines. In 3 books. Book 2. Dynamics and design: textbook; edited by V. N. Lukanina]. Moscow: Vyssh. shk. Publ, 1995, 319 p. (In Russian)
7. Khovakh M. S., Maslov G. S. *Avtomobil'nye dvigateli: teoriya, raschet i konstruktsiya dvigateley vnutrennego sgoraniya: uchebnyk dlya avtomob.-dor. tekhnikumov; 2-e izd., pererab. i dop.* [Automobile engines: theory, calculation and design of internal combustion engines: a textbook for automobiles and roads. technical schools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1971, 456 p. (In Russian)
8. Abrashkin A. M., Matveeva E. A. *Vpusknoy truboprovod dvigatelya vnutrennego sgoraniya* [Intake pipeline of an internal combustion engine]. Patent RF, no. 2008460, 1990. (In Russian)
9. Shishkov V. A. *Sposob podachi gazovogo topliva v dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Method of supplying gas fuel to an internal combustion engine] Patent RF, no. 2731558, 2020. (In Russian)
10. Supee A., Mohsin R., Majid Z. et al. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance. *Journal Technology (Sciences & Engineering)*, 2014, pp. 107–115. DOI: 10.11113/jt.v70.2292.

Received: October 15, 2023

Accepted: November 21, 2023

**Author's information:**

Aleksey L. PENKIN — PhD in Engineering;  
apenkin1@gmail.com

Aleksandr A. VOROB'YOV — Dr. Sci. in Engineering,  
Associate Professor; 79219751198@yandex.ru

Aleksandr A. SOBOLEV — PhD in Engineering;  
Associate Professor; a89213194387@yandex.ru

Sofya A. METLYAKOVA — Postgraduate Student;  
halbertyfly@yandex.ru

Darya R. VEDERNIKOVA — Master's Degree Student;  
v3dernikowad@yandex.ru