УДК 62-144.3+629.02

© А. Л. Пенкин, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)
© С. А. Метлякова, магистрант
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)
E-mail: apenkin1@gmail.com, halbertfly@yandex.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-1-164-168

© A. L. Penkin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)
© S. A. Metlyakova, undergraduate
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)
E-mail: apenkin1@gmail.com, halbertfly@yandex.ru

СТРУЙНЫЙ НАСАДОК НА ГАЗОВУЮ ФОРСУНКУ ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

SPRAY NOZZLE ON THE GAS INJECTOR OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE

Предлагается конструкция насадка на газовую форсунку для газовых и газодизельных двигателей при распределенной и фазированной подаче газа для повышения однородности газозооушной смеси, поступающей в цилиндры двигателя в процессе впуска. Дана методика расчета пропускной способности насадка через перепад давления, которая адекватно оценивает влияние конструкции насадка на условия подачи газа, что позволит в реальном двигателе корректировать настройки системы питания газовым топливом.

Ключевые слова: газовый двигатель, газодизельный двигатель, природный газ, газозооушная смесь, струйный насадок, расчет насадка.

The design of the nozzle on the gas injector for gas and gas-diesel engines with distributed and phased gas supply is proposed to increase the uniformity of the gas-air mixture entering the engine cylinders during the intake process. A method for calculating the flow capacity of the nozzle through the pressure drop is given, which adequately assesses the effect of the nozzle design on the gas supply conditions, which will allow adjusting the settings of the gas fuel supply system in a real engine.

Keywords: gas engine, gas-diesel engine, natural gas, gas-air mixture, spray nozzle, nozzle calculation.

Создание и широкое внедрение транспортных газовых и газодизельных двигателей внутреннего сгорания (ДВС), использующих природный газ в качестве основного топлива, является важной социальной и экономической задачей. Социальный вклад — улучшение экологической обстановки как традиционным путем через уменьшение выброса нормируемых вредных веществ с отработавшими газами, так и через снижение парникового воздействия от автомобильного транспорта. Метан, основной компонент природного газа, имеет лучшее соотношение C/H среди углеводородных топлив, вследствие чего образуются минимальные выбросы CO₂ при сгорании топлива [1]. Экономический вклад — при огромных запасах природного газа в России, от-

работанности технологий подготовки его для использования в качестве моторного топлива, высокой эффективности при сжигании в двигателе, низкой розничной стоимости широкое внедрение природного газа повышает конкурентоспособность предприятий автомобильного транспорта по сравнению с использованием традиционных жидких топлив и в целом ускоряет экономику страны.

Для создания эффективных газовых и газодизельных ДВС необходимо решить ряд технологических задач, одна из которых — обеспечение однородности газозооушной смеси в процессе впуска. У метана плотность почти в два раза меньше, чем у воздуха, поэтому при их смешивании имеется тенденция к расслаиванию га-

зовоздушной смеси, что значительно ухудшает процесс сжигания топлива — в камере сгорания образуются зоны с очень бедной и очень богатой смесью, что приводит к ухудшению эффективных и топливно-экономических показателей, повышает количество выбросов несгоревших углеводородов и таким образом нивелирует все преимущества природного газа как моторного топлива [2].

Для решения задачи повышения однородности газовой смеси исследователями предлагаются различные конструкции. Например, струйный смеситель газовых потоков (рис. 1), содержащий закругленные лопатки на входе в камеру смешения, а также имеющий перфорированные перегородки для уменьшения длины камеры смешивания [3]. Данная конструкция может эффективно применяться при центральной подаче газа, но при подаче распределенной, когда газ впрыскивается перед впускным каналом

каждого цилиндра, такой способ технологически неприемлем.

Также для центральной подачи может использоваться статический смеситель (рис. 2), состоящий из выполненных в виде усеченных конусов турбулизаторов с установленными на них ребрами [4], но для распределенной подачи он тоже не подходит, кроме того, его недостатком является создание сопротивления во впускном коллекторе, что снижает коэффициент наполнения ДВС.

Более эффективным смесителем для распределенной подачи газа может быть распылитель (рис. 3), имеющий корпус полусферической формы и жалюзийную заслонку с радиально-целевыми соплами [5]. Форма устройства способствует равномерности распыления, однако существенными недостатками являются щели, объединяющие газ в широкие струи, и регулирующие жалюзи, технологически не приемлемые для топливной системы ДВС.

Рис. 1. Струйный смеситель газовых потоков: 1, 2 — патрубки подвода смешиваемых газов; 3 — камера смешения; 4 — лопатки; 5 — продольные пластины; 6 — поперечные пластины

Рис. 2. Статический смеситель с турбулизаторами, выполненными в виде усеченных конусов: 1 — корпус; 2 — турбулизаторы; 3 — усеченные конусы; 4, 5 — ребра

Рис. 3. Распылитель с полусферическим корпусом:
1 — труба подачи; 2 — конусный расширитель;
3 — полусферический корпус; 4, 6 — радиально-щелевые сопла; 7 — соединительная гайка

Для повышения однородности газозвушной смеси авторами предлагается конструкция струйного насадка на выходной штуцер газовой форсунки, размещающийся во впускном коллекторе ДВС (рис. 4).

При распределенной и фазированной подаче газа впрыск в поток воздуха в процессе впуска большого количества струй газового топлива с малым диаметром каждой струи позволит обеспечить равномерное распределение частиц газа во всем объеме подаваемого воздуха. Предлагаемое соотношение $D_1 = 0,25D_2$ получено эмпирическим путем. На опытном образце, установленном на двигателе Cummins ISF 2.8 с газодизельной системой питания при $D_1 = 4$ мм, на плоской головке струйного насадка с $D_2 = 16$ мм было выполнено 66 сопел с $d_{отв} = 1$ мм, что обеспечило значительное повышение однородности газозвушной смеси. Два варианта исполнения головки насадка предлагаются для различных конструкций впускных коллекторов — полусферическая головка позволит создать большее количество струй за счет большей площади головки, однако при малых размерах в коллекторах небольших двигателей размещение возле впускного канала насадка со сферической головкой может быть технологически затруднено, и она будет создавать существенное сопротивление на впуске, снижая коэффициент наполнения ДВС.

Насадок с плоской головкой лишен этих недостатков.

Для проверки работоспособности предлагаемой конструкции авторами предлагается методика расчета пропускной способности насадка через перепад давления до и после насадка. Так можно оценить влияние конструкции насадка на условия подачи газа для настройки системы питания газовым топливом в реальном двигателе.

Для нахождения скорости потока газа перед насадком применим уравнение неразрывности для потока газа [6–9]:

$$Q = w_1 S_1 = w_2 S_2 = \text{const}, \quad (1)$$

где Q — объемный расход газа, м³/с; w_1 и w_2 — соответственно скорости потока газа в начале канала с диаметром D_1 и в нижней части конуса насадка с диаметром D_2 , м/с; S_1 и S_2 — площади живого сечения для сечений с диаметрами соответственно D_1 и D_2 , м.

Рис. 4. Струйный насадок на газовую форсунку:
 D_1 — внутренний диаметр штуцера газовой форсунки ДВС; D_2 — диаметр плоской головки струйного насадка;
 $d_{отв}$ — диаметр сопла головки струйного насадка;
 R_2 — радиус полусферической головки струйного насадка

Насадок с равномерно расположенными по ней мелкими отверстиями диаметром $d_{отв}$ с равными расстояниями между ними будем рассматривать как регулярную насадку с известной долей свободного объема ε [10]¹:

$$\varepsilon = V_{св}/V, \quad (2)$$

где $V_{св}$ — суммарный объем пустот, м³; V — общий объем насадка.

Тогда средняя скорость газа при движении через насадку, м/с [10]:

$$w = w_2/\varepsilon. \quad (3)$$

Число Рейнольдса [8, 10, 11]:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d_{отв}}{\eta}, \quad (4)$$

где w — кинематическая вязкость газа, м²/с.

Найти перепад давления можно с помощью зависимости¹:

$$\frac{\Delta P}{H} = 150 \frac{\eta \cdot w(1-\varepsilon)^2}{d^2 \varepsilon^3} + 1,75 \frac{\rho \cdot w^2(1-\varepsilon)}{d \varepsilon^3}, \quad (5)$$

где ΔP — перепад давления, Па; η — динамическая вязкость газа, кг/(м·с); ρ — плотность газа, кг/м³.

В работе выполнен расчет насадка для газовой топливной системы, устанавливаемой на дизельный двигатель Cummins ISF 2.8 при его конвертации на газодизельный цикл. В системе подачи газа использовались форсунки Napa H2001A с объемным расходом 0,0022 м³/с и рабочим давлением 4 МПа.

Скорость w_2 будет равна

$$w_2 = \frac{4 \cdot Q}{\pi \cdot D_2^2} = \frac{4 \cdot 0,0022}{3,14 \cdot 0,016^2} = 10,95 \text{ м/с}. \quad (6)$$

Доля свободного объема

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 0,001^2 \cdot 66 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,016^2 \cdot 0,001 \cdot 4} = 0,26. \quad (7)$$

Средняя скорость газа при движении через насадку:

$$w = \frac{w_2}{\varepsilon} = \frac{10,95}{0,26} = 42,46 \text{ м/с}. \quad (8)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\rho \cdot w \cdot d_{отв}}{\eta} = \frac{0,717 \cdot 42,46 \cdot 0,001}{10,92 \cdot 10^{-8}} = 2788,08. \quad (9)$$

Перепад давления:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150 \cdot 1092 \cdot 10^{-8} \cdot 42,46(1-0,26)^2}{0,001^2 \cdot 0,26^3} +$$

$$+ \frac{1,75 \cdot 0,717 \cdot 42,46^2(1-0,26)}{0,001 \cdot 0,26^3} =$$

$$= 100224778,3 \text{ Па/м}^3; \quad (10)$$

$$\Delta P = 100224778,3 \times 0,001 = 100224,78 \text{ Па}, \quad (11)$$

где H — толщина насадка, м.

Расчет показал, что для описанных реальных условий перепад давления до и после разработанного струйного насадка составляет примерно 1 бар, что вполне допустимо по условиям подачи газа во впускной коллектор двигателя Cummins ISF 2.8. При этом будет решена задача повышения однородности газозвушной смеси. Предлагаемая авторами методика расчета пропускной способности насадка через перепад давления адекватно оценивает влияние конструкции насадка на условия подачи газа, что позволит в реальном двигателе корректировать настройки системы питания газовым топливом.

Библиографический список

1. Гайнуллин Ф. Г., Гриценко А. И., Васильев Ю. Н. Природный газ как моторное топливо на транспорте. М.: Недра, 1986. 255 с.
2. Генкин К. И. Газовые двигатели. М.: Машиностроение, 1977. 196 с.
3. Патент 378743 СССР, G01M 9/04, G01M 9/00. Струйный смеситель газовых потоков / Н. П. Дронов, А. Л. Искра, В. П. Лукьянова, О. И. Якимович; заявл. 19.07.1971; опубл. 18.04.1973.
4. Патент 952308 СССР, B01F 5/00, B01F 5/06. Статический смеситель / В. С. Хролин, В. И. Валентик; заявл. 06.01.1981; опубл. 23.08.1982.
5. Патент 528950 СССР, B05B 1/30. Распылитель / О. И. Прокопов, Ю. М. Абызильдин; заявл. 16.06.1972; опубл. 25.09.1976.
6. Абрамович Г. И. Прикладная газовая динамика. В 2 ч. Ч. 1. 5-е изд., перераб и доп. М.: Наука, 1991. 600 с.
7. Френкель Н. З. Гидравлика. М.: Госэнергоиздат, 1956. 452 с.
8. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Гидродинамика. Теоретическая физика. Т. VI. 3-е изд., перераб. М.: Наука, 1986. 736 с.
9. Дейч М. Е., Зарянкин А. Е. Гидрогазодинамика. М.: Энергоатомиздат, 1984. 384 с.
10. Каган А. М., Лаптев А. Г., Пушинов А. С., Фарухов М. И. Контактные насадки промышленных тепло-массообменных аппаратов / под ред. А. Г. Лаптева. Казань: Отечество, 2013. 454 с.
11. Голубев И. Ф. Вязкость газов и газовых смесей. М.: ГИФМЛ, 1959. 375 с.

¹ Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1. Пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко и др. М.: Энергоатомиздат, 1987. 560 с.

References

1. Gaynullin F. G., Gritsenko A. I., Vasilev Yu. N. *Prirodniy gaz kak motornoe toplivo na transporte* [Natural gas as a motor fuel in transport]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 255 p.
2. Genkin K. I. *Gazovye dvigateli* [Gas-power engine]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977, 196 p.
3. Dronov N. P., Iskra A. L., Luk'yanova V. P., Yakimovich O. I. *Struyniy smesitel' gazovykh potokov* [Jet mixer of gas flows]. Patent USSR, no. 378743, 1971.
4. Khrolin V. S., Valentik V. I. *Staticheskiy smesitel'* [Static mixer]. Patent USSR, no. 952308, 1981.
5. Prokopov O. I., Abyzgil'din Yu. M. *Raspylitel'* [Diffuser]. Patent USSR, no. 528950, 1972.
6. Abramovich G. I. *Prikladnaya gazovaya dinamika* [Applied gas dynamics]. In 2 pts. Pt. 1. 5-th ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1991, 600 p.
7. Frenkel' N. Z. *Gidravlika* [Hydraulics]. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956, 452 p.
8. Landau L. D., Lifshits E. M. *Gidrodinamika. Teoreticheskaya fizika* [Hydro-gas dynamics. Theoretical Physics]. Vol. VI. 3-rd ed., revised. Moscow, Nauka Publ., 1986, 736 p.
9. Deych M. E., Zaryankin A. E. *Gidrogazodinamika* [Hydro-gas dynamics]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 384 p.
10. Kagan A. M., Laptev A. G., Pushnov A. S., Farakhov M. I. *Kontaknye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennyykh apparatov* [Contact nozzles of industrial heat and mass transfer units]. Ed. by Laptev A. G. Kazan, Otechestvo Publ., 2013, 454 p.
11. Golubev I. F. *Vyazkost' gazov i gazovykh smesey* [Viscosity of gases and gas mixtures]. Moscow, GIFML Publ., 1959, 375 p.