

DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-137-158
УДК 62-144.3+62-621.2



СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ОДНОРОДНОСТИ ГАЗОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ТРАНСПОРТНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А.Л. Пенкин, С.А. Метлякова

Повышение однородности газозвоздушной смеси в газовых транспортных двигателях позволяет обеспечить более полное сгорание топлива, снизить его удельный эффективный расход и токсичность отработавших газов. Известны способы повышения однородности, однако нет обобщения их принципов и применимости для различных двигателей. В статье проведен анализ существующих способов, выявлены их недостатки. Разработан способ повышения однородности газозвоздушной смеси в газовых транспортных двигателях через управление положением струи газового топлива в потоке поступающего воздуха. Описана зависимость для управления положением струи газа в потоке воздуха. Проанализированы результаты экспериментов, выполненные средствами компьютерного моделирования, при центральной и распределённой подаче газа с различным давлением газа и воздуха. При проведении экспериментов определялся коэффициент однородности газозвоздушной смеси. Отдельно оценивается глубина проникновения струи газового топлива в поток поступающего воздуха. На основании результатов моделирования была обоснована действенность способа.

Цель – разработка способа повышения однородности газозвоздушной смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания.

Метод или методология проведения работы. В работе применялось моделирование движения струи метана в потоке воздуха методом конечных элементов.

Результаты. Сформулирован и обоснован способ повышения однородности газовой смеси при использовании впускного давления газа как основного изменяемого параметра.

Область применения результатов. Полученные результаты целесообразно применять для повышения экономичности и экологичности газовых транспортных двигателей.

Ключевые слова: газовый двигатель; метан; однородная газоздушная смесь; коэффициент однородности; турбулизатор

Для цитирования. Пенкин А.Л., Метлякова С.А. Способ повышения однородности газовой смеси в транспортных двигателях внутреннего сгорания // *International Journal of Advanced Studies*. 2023. Т. 13, № 1. С. 137-158. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-137-158

METHOD FOR INCREASING THE UNIFORMITY OF THE GAS-AIR MIXTURE IN INTERNAL COMBUSTION TRANSPORT ENGINES

A.L. Penkin, S.A. Metlyakova

Increasing the uniformity of the gas-air mixture in gas transport engines makes it possible to ensure more complete combustion of fuel, reduce its specific fuel consumption and exhaust gas toxicity. There are known ways to increase uniformity, but there is no generalization of their principles and applicability for various engines. The article analyzes the existing methods and identifies their shortcomings. A method has been developed to increase the uniformity of the gas-air mixture in gas transport engines by controlling the position of the gas fuel jet in the incoming air stream. The dependence for controlling the position of the gas jet in the air flow is described. The results of experiments performed by means of computer modeling with central and distributed gas supply with different gas and air pressures are analyzed. During the experiments, the coefficient of uniformity of the gas-air mixture was

determined. Separately, the depth of penetration of the gas fuel jet into the incoming air stream is estimated. Based on the simulation results, the effectiveness of the method was justified.

Purpose. Development of a method for increasing the uniformity of the gas-air mixture in internal combustion transport engines.

Methodology. Modeling of the movement of a methane jet in an air stream by the finite element method was used in the work.

Results. A method for increasing the uniformity of the gas-air mixture using the inlet pressure of the gas as the main variable parameter is formulated and justified.

Practical implications. The obtained results should be used to improve the efficiency and environmental friendliness of gas transport engines.

Keywords: gas engine; methane; homogeneous gas-air mixture; uniformity index; turbulator

For citation. Penkin A.L., Metlyakova S.A. Method for Increasing the Uniformity of the Gas-Air Mixture in Internal Combustion Transport Engines // International Journal of Advanced Studies, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 137-158. DOI: 10.12731/2227-930X-2023-13-1-137-158

Введение

Важным фактором, влияющим на эффективные и экологические показатели двигателей внутреннего сгорания, в том числе и газовых, является однородность топливовоздушной смеси. Высокая однородность обеспечивает более качественное сгорание, так как при этом в камере сгорания отсутствуют зоны с избыточно обогащённой и обеднённой смесью, следствием чего является снижение удельного эффективного расхода топлива, повышение эффективного к.п.д. и снижение количества вредных веществ в отработавших газах.

Таким образом, создание способа обеспечения однородности топливовоздушной смеси для газовых двигателей является важной задачей.

Материалы и методы исследования

На однородность образовавшейся во впускном трубопроводе смеси топлива и воздуха оказывают влияние многие факторы. Различными исследователями рассматривалось влияние геометрии впускного коллектора [18], места [23] и угла [17] подачи топлива, применение турбулизаторов, насадков и смесителей [19-22, 24]. Эти методы могут быть эффективными лишь при определенных условиях и не применимы для широкого диапазона случаев с различной геометрией впускного тракта, конструкцией, компоновкой двигателя и условиями работы.

В определенных случаях возможно достижение максимальной однородности, но только при оптимальных значениях прочих параметров. Например, изменение геометрии впускного коллектора или места подачи топлива может повлиять на попадание струи топлива в завихрения, создаваемые выступающими частями трубопровода, и изменить степень однородности смеси, однако должны быть учтены режимы работы двигателя и скорость движения газового топлива и воздуха. Следовательно, к каждому случаю необходим отдельный подход, учитывающий все факторы.

Известны попытки создать общий способ для решения задачи создания однородной смеси [9, 22].

В [22] описано устройство для подачи газа в двигатель внутреннего сгорания, имеющее канал для впуска газа с завихрителями, ось канала совпадает с осью потока.

В [9] описан способ, суть которого состоит в подаче газового топлива в двигатель внутреннего сгорания через форсунки во впускной трубопровод, при этом газовые форсунки используют в качестве активного элемента для эжекции газа. Подача топлива происходит только во время открытого впускного клапана таким образом, чтобы обеспечивалась максимальная скорость истечения газа, что достигается впрыском газа при перепаде давления для наилучшей эжекции газа потоком воздуха.

Недостатком перечисленных способов является их неадаптированность к изменению конструкции впускного коллектора и режимов работы двигателя. Следовательно, можно сделать вывод о необходимости разработки нового способа повышения однородности газозвдушной смеси.

Для создания способа, учитывающего все основные факторы, влияющие на однородность и не имеющего недостатков, присущих перечисленным способам, были проанализированы зависимости, описывающие движение струи в сносящем потоке, для определения влияния на однородность газозвдушной смеси условий подачи газового топлива в поток воздуха. Из известных зависимостей [1-5, 7, 10, 12, 15, 16] была выбрана следующая [12]:

$$\ln \left| 1 + \frac{C_1 X}{2h_0} \right| = \frac{C_x C_1 \rho_w W^2 Y^2}{4\rho_v V_0^2 S_{n0} \sin \alpha_0} + \ln \left| 1 + C_1 \operatorname{ctg} \alpha_0 \sqrt{2\pi} \Phi \left(\sqrt{\frac{C_x C_1 \rho_w W^2}{4\rho_v V_0^2 S_{n0} \sin \alpha_0}} Y \right) \right|, \quad (1)$$

где X , Y – координаты; C_1 – коэффициент углового расширения струи; C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления струи сносящему потоку; ρ_w , ρ_v – плотности газа в струе и сносящем потоке; V_0 – скорость газа на выходе из сопла газовой форсунки; W – скорость сносящего потока воздуха; S_{n0} – нормальное сечение струи; h_0 – условная ширина начального сечения; α_0 – угол наклона оси струи газа к направлению потока воздуха; Φ – функция Лапласа:

$$\Phi(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^s e^{-\frac{t^2}{2}} dt, \quad (2)$$

где

$$t = \frac{s - \mu}{\sigma} \quad (3)$$

где μ – математическое ожидание распределения; σ – среднеквадратическое отклонение.

Для подачи топлива под прямым углом к потоку (1) преобразуется в:

$$\frac{y}{d_0} = 16,2 \sqrt{\frac{\rho_{v0} V_0^2}{C_x \rho_w W^2} \lg \left(1 + 0.049 \frac{x}{d_0} \right)}, \quad (4)$$

где d_0 – начальный диаметр сечения струи газа.

Причинами выбора является возможность учета многих факторов: плотности воздуха и газа, угла наклона струи газа, а также учет давления сред посредством уравнения для изотермического процесса [13]:

$$\rho_v = \frac{P_{v0}P_v}{P_0} \quad (5)$$

где P_0 – атмосферное давление; ρ_{v0} – плотность газа при атмосферном давлении.

С помощью зависимости (1) можно как описать форму оси струи при известном давлении газа P_v на входе, так и управлять положением струи газа в потоке воздуха, изменяя P_v требуемым для геометрического положения струи образом. Это осуществляется с помощью уравнения (5) при прямом угле подачи газа:

$$P_v = \frac{P_0}{\rho_{v0}} \cdot \left(\frac{Y}{d_0} \right)^2 \cdot \frac{C_x \rho_w W^2}{262,441g \left(1 + 0,049 \frac{X}{d_0} \right) V_0^2} \quad (6)$$

Управление положением струи позволит подавать газ таким образом, чтобы он попадал в определенные места впускного тракта, например, в завихрения, создаваемые выступающими частями впускного коллектора, либо во впускной канал. Для этого в формулу (6) подставляются оптимальные значения координат x и y в безразмерном виде. Таким образом, можно будет добиться наибольшей возможной однородности при изменяющихся условиях. При этом регулирование давления может осуществляться с помощью газового редуктора с электронным управлением выходным рабочим давлением.

Регулируемым параметром управления положением струи газа в потоке воздуха будет являться давление подачи газа P_v . Изменяющиеся параметры газа и воздуха, различная геометрия впускного тракта в формуле (6) учитываются в алгоритме расчёта оптимального давления газа. Блок управления редуктором получает мгновенные значения переменных в (6), обрабатывая сигналы штатных датчиков двигателя и рассчитывает величину сигнала на управляющее устройство газового редуктора для получения

расчётного оптимального значения давления газа на форсунке. Пример изменения положения струи метана в поперечном потоке воздуха представлен на рисунке 1.

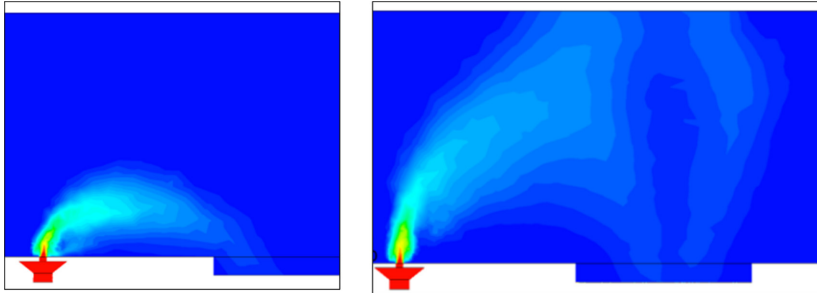


Рис. 1. Изменение положения струи метана в потоке воздуха (по графикам распределения концентрации метана) в продольном сечении трубопровода при давлениях: воздух – 1,5 атм, метан – 3,5 атм (слева) и 8 атм (справа)

Однородность газозвушной смеси может быть оценена количественными показателями. В различных работах для данной цели исследователями были использованы среднеквадратическое отношение доли i -го компонента [11], коэффициент вариации [8] и число Пекле для сравнения различных моделей смесителей [1]. В данной работе использовался коэффициент однородности UI (*Uniformity Index*), показывающий степень однородности потока после перемешивания [17, 19, 20, 6]. UI можно выразить следующим образом:

$$UI = 1 - \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^n |w_i - w_{mean}| A_i}{A w_{mean}}, \quad (7)$$

где w_i – локальная массовая доля; w_{mean} – средняя массовая доля; A_i – локальная площадь; A – поперечная площадь, где вычисляется UI и вычисляется средняя массовая доля.

UI может изменяться от 0 до 1. Когда $UI = 1$, смесь полностью однородна, а когда UI приближается к нулю, компоненты смеси полностью не смешаны.

С учетом изложенного можно резюмировать: способ повышения однородности газозвушной смеси в транспортных дви-

гателях внутреннего сгорания реализуется достижением оптимального положения струи газа в потоке воздуха (при известных координатах) для получения максимально достижимого коэффициента однородности в известной геометрии впускного коллектора и осуществляется посредством регулирования давления подачи газа.

Результаты исследования и их обсуждение

Реализация способа была осуществлена в программе *Ansys-Fluent*. Были созданы модели, соответствующие случаям распределенной подачи и центральной. За основу моделей взят дизельный двигатель *Cummins ISF2.8*, на котором реализовывался газодизельный цикл. Геометрия модели соответствует размерам впускного трубопровода и впускного коллектора двигателя. Были созданы модели центральной и распределённой подачи. Модели центрального впрыска газа во впускной трубопровод, представляли собой трубу круглого сечения диаметром 80 мм с четырьмя штуцерами для подвода метана диаметром 4 мм каждый и расположенным в трубе статическим турбулизатором, предназначенным для повышения однородности газозвоздушной смеси. Использовались две модели статических турбулизаторов: с пластинчатыми элементами, расположенными под наклоном вокруг оси трубы (рис. 2, а), и с пластинчатыми элементами, сложенными в форме сетки (рис. 2, в). Модель распределенной подачи включала впускной коллектор с впускными каналами, цилиндром и штуцером для подвода метана, расположенным между впускными каналами (рис. 8). На рисунке 2 красными стрелками обозначены места подвода метана, а черными – воздуха.

Производилось моделирование смешивания метана и воздуха в данных геометриях при различных давлениях подачи газов. Качество смеси оценивалось коэффициентом однородности (UI), контроль которого производился на сечениях.

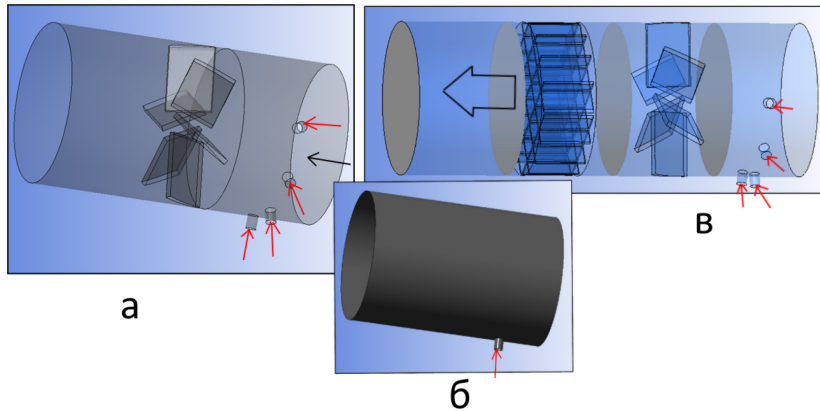


Рис. 2. Модели центральной подачи, используемые в расчетах:
 а – с пластинчатыми элементами, расположенными под наклоном вокруг
 оси трубы; б – без турбулизаторов; в – пластинчатыми элементами,
 сложенными в форме сетки

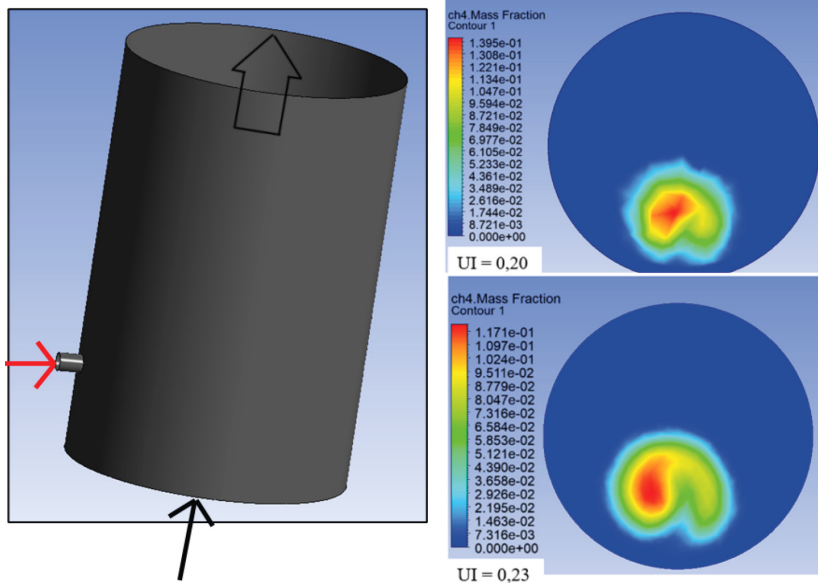


Рис. 3. Изменение концентрации метана в верхнем сечении трубопровода
 при давлениях: воздух – 1 атм, метан – 2,5 атм (справа сверху); воздух – 2 атм,
 метан – 3,5 атм (справа снизу)

Результаты моделирования наиболее простого случая центральной подачи без турбулизаторов при давлениях воздуха и метана 1 и 2,5 атм и 2 и 3,5 атм соответственно представлены на рисунке 3. По графикам на рисунке видно, что струя метана не распространяется в поперечном сечении трубопровода дальше половины сечения. Отсюда и низкое значение UI – 0,2 при меньших давлениях и 0,23 при больших.

По рисункам 4-7 видно, что турбулизатор в целом действительно справлялся с задачей повышения однородности смеси (наибольший UI 0,6 против 0,43 на рисунках 4 и 5, UI 0,66 против 0,45 на рисунках 6 и 7). Заметно, что наличие второго турбулизатора (рисунки 6 и 7) визуально делает смесь на последнем сечении 4 не такой «закрученной», однако при этом все равно остаются довольно большие площади с максимальной концентрацией метана.

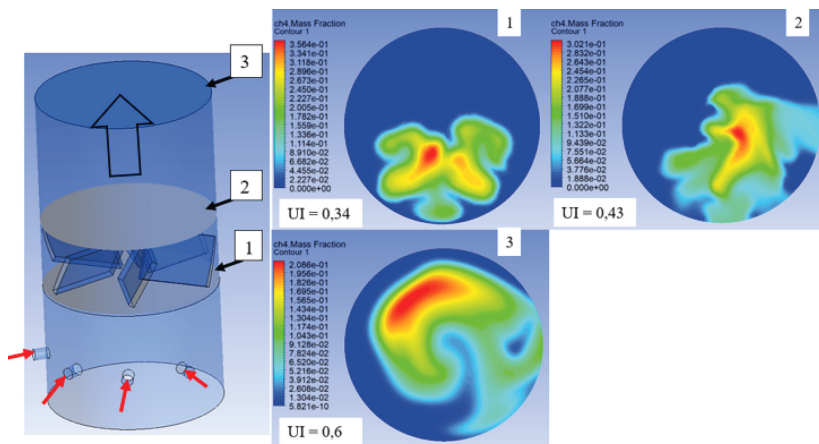


Рис. 4. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3 при давлениях: воздух – 1 атм, метан – 2,5 атм

При моделировании течения газов при распределенной подаче (рис. 8) наблюдалось повышение UI в сечении 1 с ростом давлений подачи (рис. 9, а, б).

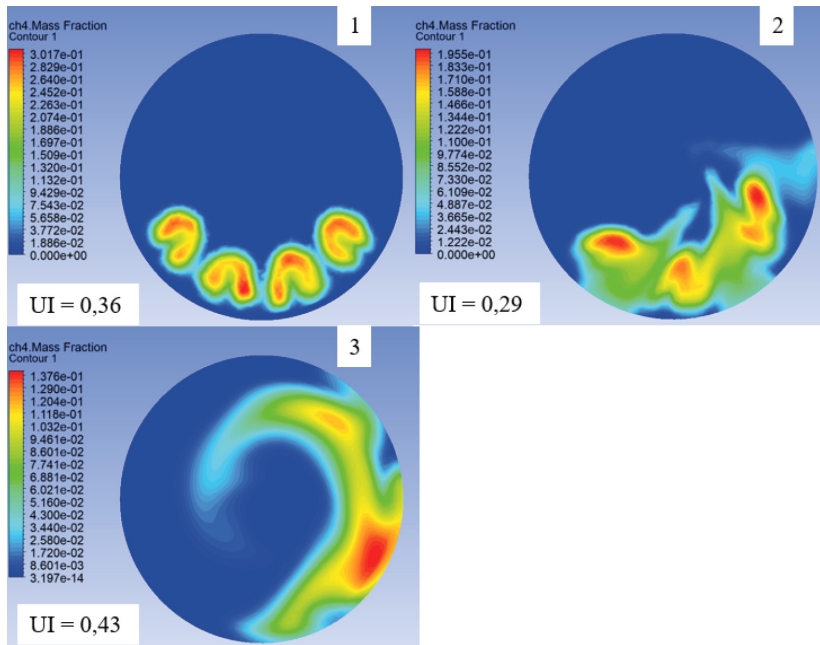


Рис. 5. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3 при давлениях: воздух – 2 атм, метан – 3,5 атм

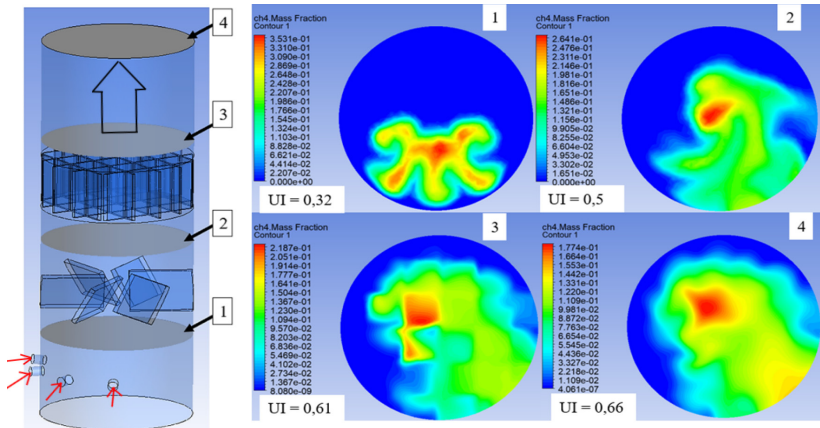


Рис. 6. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3, 4 при давлениях: воздух – 1 атм, метан – 2,5 атм

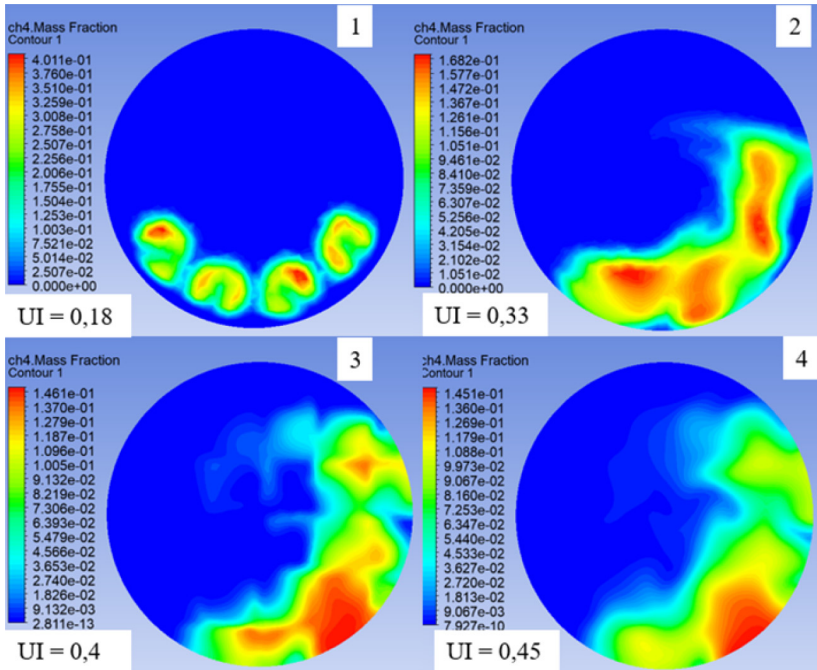


Рис. 7. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2, 3, 4 при давлениях: воздух – 2 атм, метан – 3,5 атм

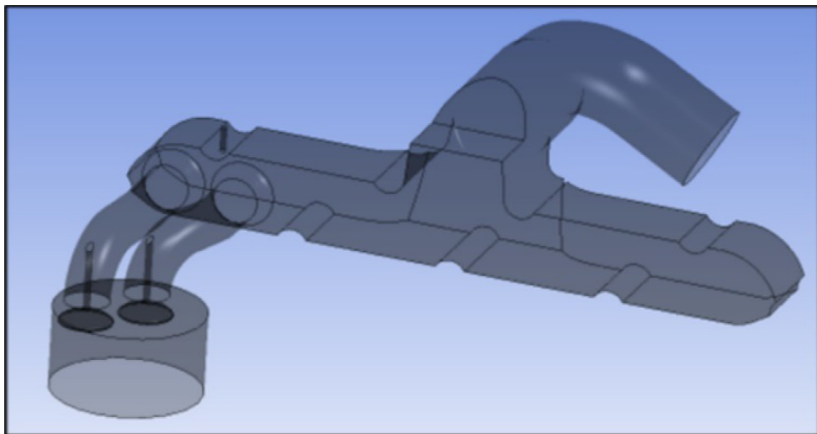


Рис. 8. Модели распределенной подачи в двигателе Cummins ISF2.8

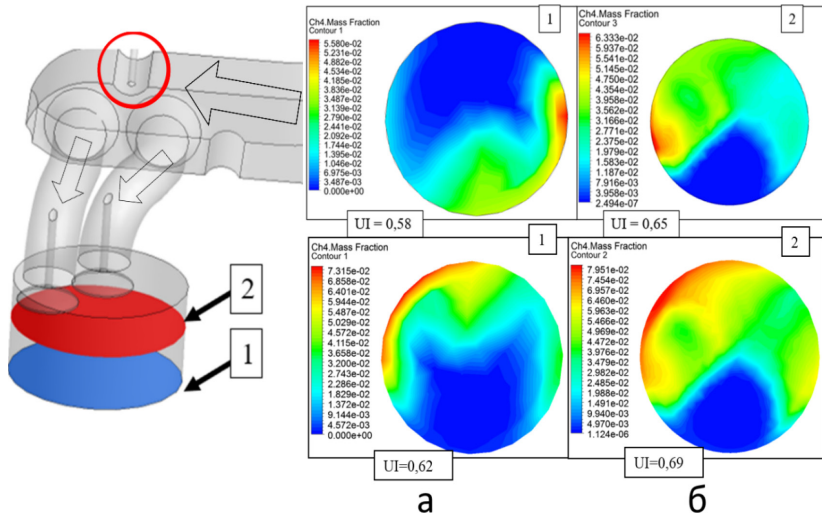


Рис. 9. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2 при угле наклона штуцера 90°: а – давления: воздух – 1,2 атм, метан – 3,5 атм; б – давления: воздух – 1,2 атм, метан – 6 атм

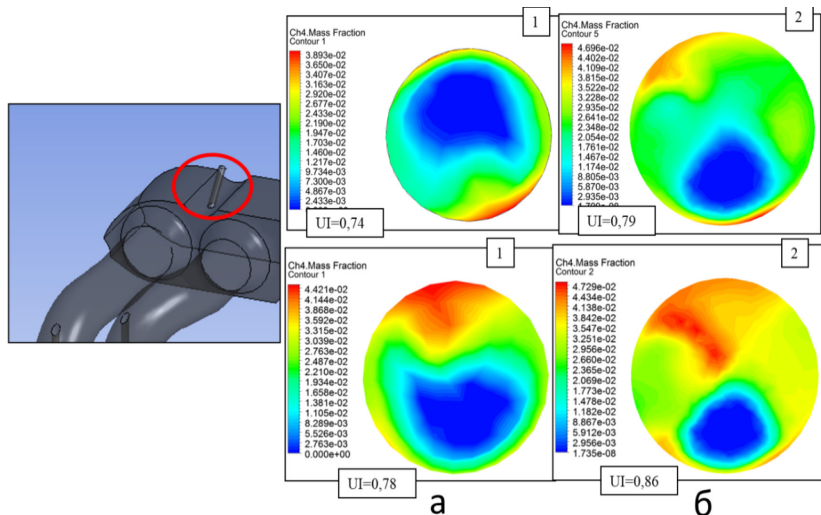


Рис. 10. Изменение концентрации метана в сечениях 1, 2 при угле наклона штуцера 45°: а – давления: воздух – 1,2 атм, метан – 3,5 атм; б – давления: воздух – 1,2 атм, метан – 6 атм

При направленности штуцера при распределенной подаче на впускные каналы, что достигалось его наклоном на 45° , наблюдалась та же тенденция к росту UI в том же сечении с ростом давлений, однако по сравнению с предыдущим случаем качество итоговой смеси повысилось (рис. 10, а, б).

Таким образом, при центральной подаче при наличии турбулизатора на однородность смеси оказывало влияние давление подачи метана (с ростом давления UI уменьшался), а при распределенной подаче – угол наклона штуцера (UI увеличивался при изменении наклона на 45°) и давления подачи газов (UI увеличивался при увеличении давлений).

Таким образом, можно проследить влияние изменения положения струи газа в потоке воздуха на однородность смеси при изменении давления подачи газа и при использовании турбулизаторов в рамках способа. Видно, что при центральной подаче с применением турбулизатора наибольшая однородность обеспечивается при меньших давлениях, при этом наличие турбулизатора в целом обеспечивает большую однородность смеси, чем в случае его отсутствия. Также турбулизатор обеспечивает более равномерное распределение струи газа по поперечному сечению трубопровода. Наличие второго турбулизатора убирает «закрутку» смеси вокруг центральной оси, однако не избавляет ее от визуально больших зон высокой концентрации газа. При меньших давлениях струя проникает в поток глубже по сравнению с большими давлениями. При распределенной подаче ситуация обратная. Большие давления обеспечивают большую однородность смеси. Изменение угла наклона штуцера подачи газа в сторону впускных каналов также обеспечило улучшение однородности.

Заключение

1. Выполнены исследования по определению влияния положения струи газового топлива в потоке поступающего

- воздуха на создание однородной газовой смеси при центральной и распределённой подаче газа;
2. Сделана оценка влияния двух вариантов конструкций турбулизаторов при центральной подаче газа во впускной трубопровод двигателя на коэффициент однородности топливовоздушной смеси;
 3. Разработан способ повышения однородности топливовоздушной смеси в газовых транспортных двигателях внутреннего сгорания достижением оптимального положения струи газа в потоке поступающего воздуха с получением максимально достижимого коэффициента однородности в известной геометрии впускного коллектора. Способ осуществляется посредством электронного регулирования давления подачи газа;
 4. Определены параметры управления однородностью в рамках способа. В алгоритме (формула б) задаются требуемые значения координат x и y , учитываются значения массового расхода, температуры и давления воздуха по сигналам штатных датчиков. Единственный регулируемый параметр – давление газа, оптимальное значение которого для изменяющихся условий осуществляется электронным блоком управлением газового редуктора.

Список литературы

1. Батулин В.В. Воздушные завесы / В.В. Батулин, И.А. Шепелев // «Отопление и вентиляция». 1936. № 5.
2. Безменов В.Я. Нестационарные течения в ударной трубе переменного сечения / В. Я. Безменов. Москва : Бюро науч. информации ЦАГИ, 1959. 37 с.
3. Варганов И.С. О кривизне оси струи в сносящем потоке / И.С. Варганов ; Киевское высш. инж. авиац. воен. училище ВВС. – Киев : [б. и.], 1964. 10 с.
4. Волынский М.С. О форме струи жидкости в газовом потоке / М.С. Волынский. М. : Оборонгиз, 1958. 16 с.

5. Гиршович Т.А. Турбулентные струи в поперечном потоке / Т.А. Гиршович. М. : Машиностроение, 1993. 251 с.
6. Данилов Ю. М. Оценка эффективности перемешивания жидких компонентов в малогабаритных трубчатых турбулентных аппаратах / Ю.М. Данилов, А.Г. Мухаметзянова, Р.Я. Дебердеев [и др.] // Теоретические основы химической технологии. 2011. том 45. № 1. С. 81-84.
7. Иванов Ю.В. Уравнение траекторий струй острого дутья / Иванов Ю.В. // Котло-турбостроение. 1952. №8.
8. Мухаметзянова А.Г. Методы вычислительной гидродинамики при оценке эффективности статических смесителей насадочного типа / А.Г. Мухаметзянова, К.А. Алексеев // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ. 2019. Т. 10. С. 9–11.
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 / Шишков Владимир Александрович ; Заявитель Шишков Владимир Александрович.
10. Теория турбулентных струй / Г.Н. Абрамович, Т.А. Гиршович, С.Ю. Крашенинников [и др.] ; под ред. Г. Н. Абрамовича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Наука, 1984. 716 с.
11. Фарахов, Т.М. Оценка эффективности статических смесителей насадочного типа / Т.М. Фарахов, А.Г. Лаптев // Вестник казанского государственного энергетического университета. 2011. № 4. С. 20-24.
12. Форма струи в сносящем потоке / Я.М. Визель, И.Л. Мостинский. – М. : [б. и.], 1964. 74 с.
13. Ховах М.С. Автомобильные двигатели : Теория, расчет и конструкция двигателей внутреннего сгорания : [Учебник для авто-моб.-дор. техникумов] / М.С. Ховах, Г.С. Маслов. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Машиностроение, 1971. 456 с.

14. Чаусов Ф.Ф. Отечественные статические смесители для непрерывного смешивания жидкостей / Ф.Ф. Чаусов // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 3. С. 11-14.
15. Шандоров Г.С. Истечение из канала в неподвижную и движущуюся среду/ Г.С. Шандоров // ЖТФ. 1957. Т. 27. № 1. С. 92-108.
16. Шепелев И.А. Основы расчета воздушных завес, приточных струй и пористых фильтров / И. А. Шепелев.М. : Стройиздат, 1950.
17. Al-Sulttani A.O. A Computational Fluid Dynamics Study to Optimize the Orientation of the Syngas Injector for Reducing Environmental Pollution and Performance Improvement of a Bi Engine. International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering, 2020, Vol. 20, № 05, pp. 164-174.
18. Jemni M.A., Kantchev G., Abid M.S. Intake manifold design effect on air fuel mixing and flow for an LPG heavy duty engine. International journal of energy and environment, 2012, vol. 3, issue 1, pp. 61-72.
19. Mahmood H., Adam N., Sahari B., Masuri S.U. 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.
20. Muhssen H.S., Masuri S.U., Sahari B., Hairuddin A.A. Computational Fluid Dynamics Investigation of Air-Gas Pre-Mixing Controller Mixer Designed for CNG-Diesel Dual-Fuel Engines. CFD letters, 2019, vol. 11, issue 6, pp. 47-62.
21. Noor M.M., Kadirgama K., Devarajan R., Rejab R., Nik Mohamed, N., Yusaf T.F. 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.
22. 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 / Kris-

- ten Marcus, Schmid Reinhard, Redlich Alexander, Magel Hans-Christoph; Applicant Bosch GMBH Robert. – 18 p.
23. Supee A., Mohsin R., Majid Z., Raiz M. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 2014, 70:1, pp.107-115. DOI: 10.11113/jt.v70.2292.
24. Yusaf T.F., Baker, P., Hamawand I., Noor M.M. Effect of compressed natural gas mixing on the engine performance and emissions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, 2014, volume 8, pp. 1416-1429.

References

1. Baturin V.V. *Vozdushnye zavesy* [Air curtains] / V.V. Baturin, I.A. Shepelev // «Otoplenie i ventilyatsiya». 1936. № 5.
2. Bezmenov V.Ya. *Nestatsionarnye techeniya v udarnoy trubeye remenogo secheniya* [Unsteady flows in a shock tube of variable cross section] / V.Ya. Bezmenov. Moskva : Byuro nauch. informatsii TsAGI, 1959. 37 p.
3. Varganov I.S. *O krivizne osi strui v snosyashchem potoke* [On the curvature of the jet axis in a drifting flow] / I.S. Varganov ; Kievskoevyssh. inzh. aviats. voen. uchilishche VVS. – Kiev : [b. i.], 1964. 10 p.
4. Volynskiy M.S. *O forme strui zhidkosti v gazovom potoke* [On the shape of a liquid jet in a gas flow] / M.S. Volynskiy. M. : Oborongiz, 1958. 16 p.
5. Girshovich T.A. *Turbulentnye strui v poperechnom potoke* [Turbulent jets in cross flow] / T.A. Girshovich. M. : Mashinostroenie, 1993. 251 p.
6. Danilov Yu.M. *Otsenka effektivnosti peremeshvaniya zhidkikh komponentov v malogabaritnykh trubchatykh turbulentnykh apparatakh* [Evaluation of the efficiency of mixing liquid components in small-sized tubular turbulent apparatus] / Yu.M. Danilov, A.G. Mukhametzyanova, R.Ya. Deberdev [i dr.] // *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*. 2011. tom 45. № 1. pp. 81-84.

7. Ivanov Yu.V. *Uравnenie traektoriy struy ostrogo dut'y a* [Equation of trajectories of sharp blast jets] / Ivanov Yu.V. // *Kotlo-turbostroenie*. 1952. №8.
8. Mukhametzyanova A.G. *Metod vyvchislitel'noy gidrodinamiki pri otsenke effektivnosti staticheskikh smesiteley nasadochnogo tipa* [Methods of Computational Fluid Dynamics in Estimating the Efficiency of Packed-Type Static Mixers] / A.G. Mukhametzyanova, K.A. Alekseev // *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh*. MMTT. 2019. T. 10. pp. 9–11.
9. Patent № 2731558 Rossiyskaya Federatsiya, MPK 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). *Sposob podachi gazovogo topliva v dvigatel' vnutrennego sgoraniya* [Method for supplying gas fuel to an internal combustion engine] : № 2019137447 : publication date 04.09.2020 / Shishkov Vladimir Aleksandrovich.
10. *Teoriya turbulentnykh struy* [Theory of turbulent jets] / G.N. Abramovich, T.A. Girshovich, S.Yu. Krasheninnikov [i dr.] ; pod red. G.N. Abramovicha. 2-e izd., pererab. i dop. M. : Nauka, 1984. 716 p.
11. Farakhov T.M. *Otsenka effektivnosti staticheskikh smesiteley nasadochnogo tipa* [Evaluation of the effectiveness of packed-type static mixers] / T.M. Farakhov, A.G. Laptev // *Vestnik kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2011. № 4. pp. 20-24.
12. *Forma strui v snosyashchem potoke* [The shape of the jet in the drifting flow] / Ya.M. Vizel', I.L. Mostinskiy. – M. : [b. i.], 1964. 74 p.
13. Khovakh M.S. *Avtomobil'nye dvigateli: Teoriya, raschet i konstrukt-siya dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Automobile engines: Theory, calculation and design of internal combustion engines] : [Uchebnik dlya avtomob.-dor. tekhnikumov] / M.S. Khovakh, G.S. Maslov. 2-e izd., pererab. i dop. Moskva : Mashinostroenie, 1971. 456 p.
14. Chausov F.F. *Otechestvennye staticheskie smesiteli dlya nepreryvno-go smeshivaniya zhidkostey* [Domestic static mixers for continuous mixing of liquids] / F.F. Chausov // *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*. 2009. № 3. pp. 11-14.

15. Shandorov G.S. *Istechenie iz kanala v nepodvizhnuyu i dvizhuyushchuyusya sredu* [Outflow from a channel into a stationary and moving medium] / G.S. Shandorov // ZhTF. 1957. T. 27. № 1. pp. 92-108.
16. Shepelev I.A. *Osnovy rascheta vozdushnykh zaves, pritochnykh struy i poristykh fil'trov* [Fundamentals of Air Curtains, Air Jets and Porous Filters] / I.A. Shepelev. M. : Stroyizdat, 1950.
17. Al-Sulttani A.O. A Computational Fluid Dynamics Study to Optimize the Orientation of the Syngas Injector for Reducing Environmental Pollution and Performance Improvement of a Bi Engine. *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering*, 2020, Vol. 20, № 05, pp.164-174.
18. Jemni M.A., Kantchev G., Abid M.S. Intake manifold design effect on air fuel mixing and flow for an LPG heavy duty engine. *International journal of energy and environment*, 2012, vol. 3, issue 1, pp.61-72.
19. Mahmood H., Adam N., Sahari B., Masuri S.U. 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.
20. Muhssen H.S., Masuri S.U., Sahari B., Hairuddin A.A. Computational Fluid Dynamics Investigation of Air-Gas Pre-Mixing Controller Mixer Designed for CNG-Diesel Dual-Fuel Engines. *CFD letters*, 2019, vol. 11, issue 6, pp. 47-62.
21. Noor M.M., Kadirgama K., Devarajan R., Rejab R., Nik Mohamed, N., Yusaf T.F. 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.
22. 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 / Kristen Marcus, Schmid Reinhard, Redlich Alexander, Magel Hans-Christoph; Applicant Bosch GMBH Robert. – 18 p.

23. Supee A., Mohsin R., Majid Z., Raiz M. Effects of Compressed Natural Gas (CNG) Injector Position on Intake Manifold towards Diesel-CNG Dual Fuel (DDF) Engine Performance. *Jurnal Teknologi (Sciences & Engineering)*, 2014, 70:1, pp.107-115. DOI: 10.11113/jt.v70.2292.
24. Yusaf T.F., Baker, P., Hamawand I., Noor M.M. Effect of compressed natural gas mixing on the engine performance and emissions. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering (IJAME)*, 2014, volume 8, pp. 1416-1429.

ДАННЫЕ ОБ АВТОРАХ

Пенкин Алексей Леонидович, доцент кафедры «Технической эксплуатации транспортных средств, кандидат технических наук
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 2-я Красноармейская, 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация
apenkin1@gmail.com

Метлякова Софья Александровна, аспирант 1-го курса кафедры «Технической эксплуатации транспортных средств»
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет
ул. 2-я Красноармейская, 4, г. Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация
halbertfly@yandex.ru

DATA ABOUT THE AUTHORS

Aleksei L. Penkin, Associate Professor of the Department «Transport Maintenance», PhD in Engineering Sciences
Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering
4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

apenkin1@gmail.com

SPIN-code: 6624-1440

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1612-7906>

ResearcherID: ABA-7855-2021

Sofya A. Metlyakova, 1st-year postgraduate student of the Department of Transport Maintenance

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

4, 2nd Krasnoarmeiskaya Str., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation

halbertfly@yandex.ru

SPIN-code: 5465-7254

Поступила 01.03.2023

После рецензирования 25.03.2023

Принята 28.03.2023

Received 01.03.2023

Revised 25.03.2023

Accepted 28.03.2023