

УДК 621.436

**Г.М. Кухаренок, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Двигатели внутреннего сгорания»****А.Н. Петрученко, канд. техн. наук, доцент****В.И. Березун, аспирант***Белорусский Национальный Технический Университет**проспект Независимости 65, г. Минск, Республика Беларусь, 220013**kux@tut.by***ВЫБОР ФОРМЫ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Исследовано влияние формы камеры сгорания на выброс вредных веществ. Сформирован подход к конструированию камеры сгорания для дизелей с низкой и высокой интенсивностью впрыска топлива.*

**Ключевые слова:** камера сгорания, выброс вредных веществ

**Постановка проблемы.** Несмотря на активное развитие технологии очистки отработавших газов, обладающих достаточно высоким потенциалом, область их применения ограничена величиной «сырого» выброса вредных веществ в отработавших газах. Поэтому наиболее перспективным направлением обеспечения экологических показателей является доводка рабочего процесса за счет повышения технического уровня конструкции двигателя.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Ужесточающиеся экологические нормы заставляют производителей двигателей модернизировать конструкцию в сторону снижения выбросов вредных веществ. Самым важным мероприятием, позволяющим достигать высокие требования законодательства, является согласование формы камеры сгорания (КС) и топливных факелов с учетом интенсивности движения воздушного заряда [1, 2, 3].

**Цель работы.** Сформулировать основные подходы по выбору размеров и формы камеры сгорания с точки зрения влияния на выбросы вредных веществ.

**Материалы и результаты исследования.** В рамках работ по доводке рабочего процесса дизельного двигателя с литровой мощностью 22 кВт/л со степенью сжатия 17, оснащенного механической топливоподающей аппаратурой (ТА) с 5-струйными распылителями и максимальным давлением впрыска 90 МПа и турбонаддувом с промежуточным охлаждением, были сконструированы и испытаны различные варианты КС (рисунок 1).

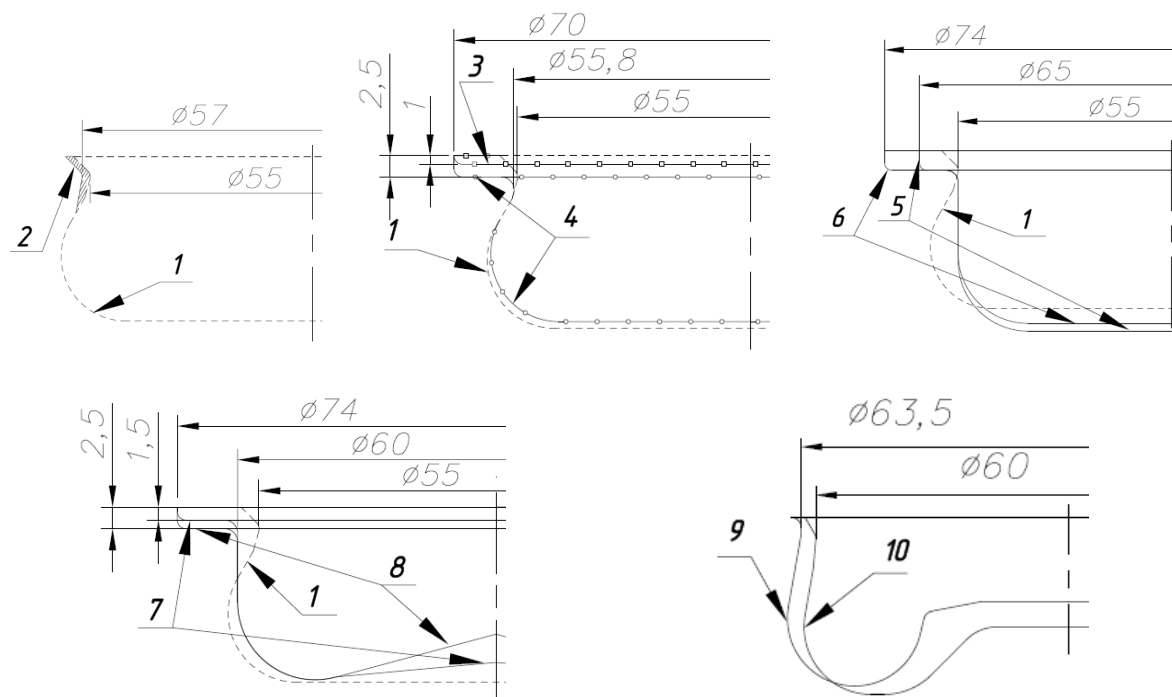


Рисунок 1 –Варианты форм КС двигателя с низкой интенсивностью впрыска

Испытания КС заключались в снятии внешних скоростных характеристик (ВСХ). Корректировка положения топливных струй относительно КС производилась изменением толщины шайбы между корпусом форсунки и поверхностью головки блока цилиндров в диапазоне  $\pm 1$  мм. Наилучший вариант с точки зрения дымности выбирался для дальнейшего сравнения. Результаты испытаний сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Результаты испытаний по ВСХ с различными вариантами КС

| n, мин <sup>-1</sup> | Варианты КС              |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                      | 1                        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|                      | g <sub>e</sub> , г/кВт·ч |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2400                 | 258,6                    | 256,1 | 256,5 | 256,4 | 265,3 | 259,9 | 259,3 | 257,6 | 255,7 | 255,3 |
| 2200                 | 241,5                    | 240,8 | 239,6 | 238,5 | 246,5 | 243,8 | 238,8 | 238,3 | 238,9 | 238,1 |
| 2000                 | 228,8                    | 228,7 | 227,0 | 226,9 | 233,9 | 228,9 | 227,0 | 226,4 | 226,1 | 226,0 |
| 1800                 | 220,9                    | 218,8 | 217,7 | 220,0 | 223,4 | 221,8 | 219,8 | 219,1 | 219,0 | 219,8 |
| 1600                 | 214,1                    | 212,0 | 212,8 | 214,6 | 217,1 | 215,4 | 213,9 | 212,1 | 213,1 | 213,3 |
| 1400                 | 210,4                    | 208,0 | 209,3 | 211,8 | 212,9 | 212,0 | 208,9 | 210,5 | 212,1 | 211,4 |
| 1200                 | 216,5                    | 212,2 | 213,7 | 220,2 | 216,9 | 217,7 | 215,2 | 218,9 | 219,8 | 219,2 |
| 1100                 | 224,6                    | 220,9 | 222,3 | 230,4 | 224,9 | 226,4 | 224,6 | 228,3 | 229,1 | 224,5 |
|                      | N, % HSU                 |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|                      | 1                        | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    |
|                      |                          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| 2400                 | 6,5                      | 4,5   | 4,4   | 4,0   | 9,2   | 7,3   | 5,0   | 5,5   | 2,9   | 3,3   |
| 2200                 | 5,8                      | 4,2   | 3,9   | 3,7   | 8,4   | 6,7   | 4,3   | 3,7   | 2,8   | 3,2   |
| 2000                 | 5,3                      | 4,0   | 3,6   | 3,6   | 8,0   | 6,4   | 4,1   | 3,6   | 2,8   | 3,3   |
| 1800                 | 4,5                      | 3,5   | 3,3   | 3,8   | 7,2   | 5,9   | 3,7   | 3,3   | 3,4   | 3,5   |
| 1600                 | 4,3                      | 3,2   | 3,6   | 5,1   | 8,3   | 7,2   | 4,3   | 4,3   | 5,4   | 4,5   |
| 1400                 | 8,8                      | 6,5   | 7,1   | 17,5  | 13,4  | 15,2  | 11,3  | 17,0  | 20,0  | 15,2  |
| 1200                 | 35,5                     | 24,6  | 33,0  | 53,0  | 35,4  | 43,7  | 45,0  | 59,0  | 51,0  | 44,1  |
| 1100                 | 60,4                     | 57,0  | 63,0  | 75,0  | 59,5  | 66,2  | 67,0  | 82,5  | 69,5  | 57,8  |

За базовый вариант была взята открытая КС с диаметром горловины ( $d_f$ ) 55 мм, имеющая радиусное поднутрение на периферийном контуре (вариант 1).

Увеличение  $d_f$  до 57 мм (вариант 2) позволило снизить дымность и удельный расход топлива ( $g_e$ ) по всей ВСХ. Сопоставимого результата удалось добиться выполнением кромки диаметром ( $d_k$ ) 70 мм и высотой ( $h_k$ ) 1 мм в верхней части КС при сохранении  $d_f=55$  мм (вариант 3).

Увеличение  $d_f$  до 55,8 мм и  $h_k$  до 2,5 мм (вариант 4) привело к росту дымности и расхода топлива по ВСХ в диапазоне частот вращения коленчатого вала двигателя ( $n$ ) ниже 1400 об/мин. Сопоставимые результаты были получены при испытании КС без поднутрения при увеличении  $d_f$  до 60 мм (варианты 7 и 8). Причем дымность при применении кромки с не большим  $h_k$  на низких частотах вращения меньше.

Сохранение  $d_f=55$  мм в КС, выполненных с кромкой  $h_k=2,5$  мм без поднутрения (варианты 5 и 6), привело к росту дымности выше значений базового варианта.

Таким образом, при использовании механической ТА с максимальным давлением впрыска на номинальном режиме до 90 МПа при увеличении  $d_f$  камеры сгорания в диапазоне частот вращения коленчатого вала выше 1400...1500 мин<sup>-1</sup> дымность снижается, что позволяет получить лучшие показатели по выбросам твердых частиц (РТ) в области нормирования экологических показателей. Однако на низких частотах вращения, где давление впрыска топлива составляет всего 30 МПа – наблюдается рост дымности, превышающий нормируемый предел при  $n=1100$  мин<sup>-1</sup>. Причем тенденция роста дымности превалирует больше у КС, выполненных без поднутрения, что говорит об увеличении значимости тороидального вихря при низком давлении впрыска топлива.

Не удалось достичь нормируемого предела дымности при  $n=1100$  мин<sup>-1</sup> и на КС с  $d_f=63,5$  мм, выполненной с поднутрением и вытеснителем в центре (вариант 9), хотя дымность в диапазоне частот вращения 1800...2400 мин<sup>-1</sup> относительно всех сравниваемых вариантов была самой низкой.

Проанализировав результаты испытаний, была сконструирована КС с  $d_f=60$  мм, поднутрением и вытеснителем (вариант 10), позволившая снизить дымность при  $n=1100$  мин<sup>-1</sup> с небольшим ростом дымности при  $n=1800...2400$  мин<sup>-1</sup> в сравнении с вариантом 9. Следы топливных факелов на последнем варианте КС показаны на рисунке 2.

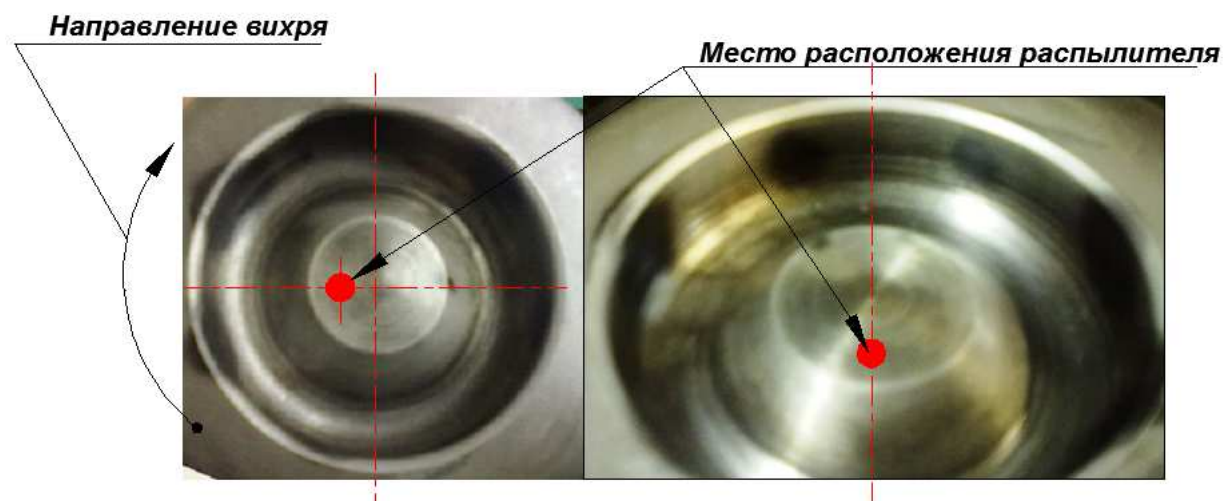


Рисунок 2 – Следы топливных факелов на КС вариант 10

Экологические требования, вводящие динамические циклы испытания, начиная с норм ЕВРО-4 и Stage 3В, стимулируют поиск технических решений по совершенствованию рабочего процесса во всем частотном и нагрузочном диапазоне. Компенсировать рост дымности при увеличении  $d_f$  КС на низких частотах вращения за счет изменения вихревого отношения впускных каналов головки цилиндров, уменьшения  $\mu_f$  распылителей и увеличения количества распыливающих отверстий в полной мере не удастся. Реализовать преимущество широкой камеры сгорания позволяет применение топливной системы Common Rail, которая способна поддерживать высокий уровень давления впрыска и на низких частотах вращения.

Ввиду низких значений дымности, обусловленных высоким давлением впрыска топлива, не позволяющим производить качественное сравнение КС, методика испытаний была изменена в сторону снятия 8-ми ступенчатых циклов NRSC. Результаты испытаний с скорректированным расположением носика распылителя в сторону снижения выброса твердых частиц путем изменения толщины шайбы между корпусом инжектора и поверхностью головки блока цилиндров в диапазоне  $\pm 1$  мм приведены в таблице 2, а варианты КС приведены на рисунке 3.

Таблица 2 – Выброс твердых частиц по циклу NRSC с различными вариантами КС

| Вариант КС  | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| РТ, г/кВт·ч | 0,038 | 0,030 | 0,037 | 0,042 | 0,045 | 0,038 | 0,026 | 0,031 | 0,021 |

В качестве базовой была сконструирована КС с поднутрением и вытеснителем, показавшая хорошие результаты на механической топливной аппаратуре (ТА). Однако в отличие от испытанной КС  $d_f$  был увеличен с 60 мм до 68,8 мм (вариант 1) ввиду увеличения максимального давления впрыска до 160 МПа и увеличения количества распыливающих отверстий до 7-ми.

Вариант 2 КС обеспечил меньший выброс твердых частиц. Отличительной чертой КС является кромка, диаметром  $d_k$  78 мм и высотой  $h_k$  2,5 мм, предназначенная для разделения топливного факела на два потока (верхнего и нижнего) с целью организации образования более однородной смеси путем снижения топливной составляющей смеси внизу КС и использования воздуха, находящегося в застойных зонах верхней части. В отличие от механической ТА, применение глубокой кромки в КС для ТА с высокой интенсивностью впрыска благоприятно сказывается на выбросе твердых частиц.

КС варианта 3, получившаяся путем доработки КС вариант 1 путем снятия поднутрения и кромки привели к получению выбросов твердых частиц КС сопоставимых с вариантом 1.

Увеличение  $d_f$  до 74 мм (вариант 4) определило тенденцию роста твердых частиц.

Изготовление угловой кромки (вариант 8) при восстановлении геометрии КС сопоставимой с вариантом 2 не позволили снизить выбросы твердых частиц меньше 0,031 г/кВт·ч.

Уменьшение  $d_k$  до 73 мм в КС с поднутрением (вариант 5) привело к росту твердых частиц до 0,048 г/кВт·ч.

Снижение выбросов твердых частиц за счет снятия поднутрения, расширения  $d_k$  и расточки кромки (варианты 6 и 7) подтвердили преимущество конусной конфигурации камеры сгорания. При применении КС вариант 9 снизились выбросы твердых частиц до 0,021 г/кВт·ч, что меньше нормы (0,025 г/кВт·ч). Применение этой КС не требует использования дополнительной системы очистки отработавших газов.

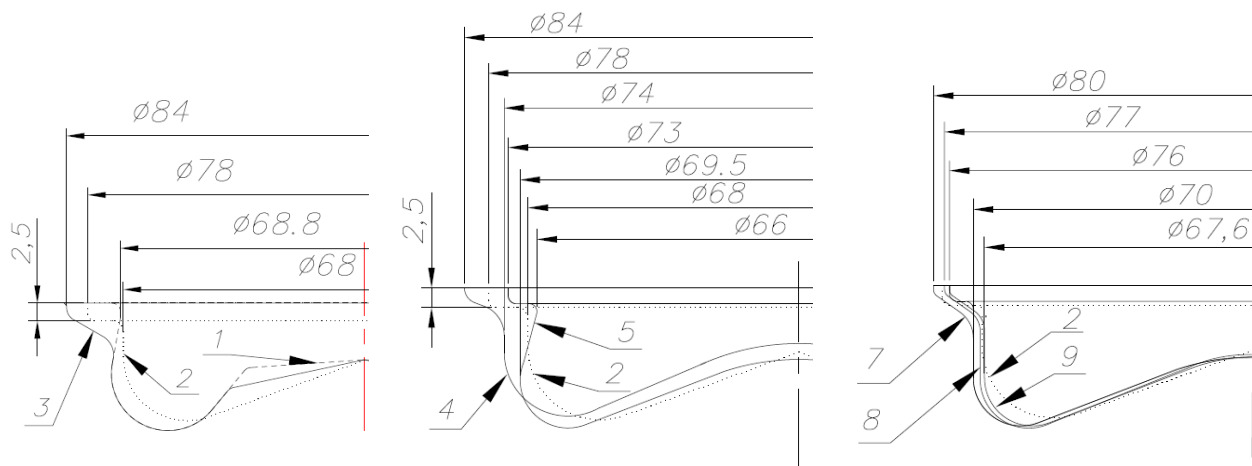


Рисунок 3 – Варианты форм КС двигателя с высокой интенсивностью впрыска

**Выводы.** В дизельных двигателях с несимметрично расположенной КС и наклонной форсункой, топливные факелы, имеющие меньшую длину (задние струи), находятся в более тяжелых условиях с точки зрения смешивания с воздухом. Большой угол разнесения задних струй в сравнении с передними полностью не устраняет локальное переобогащение, ведущее к увеличению выброса твердых частиц, о чем свидетельствует большая площадь пятна контакта топливного факела с КС. Улучшить смесеобразование в диапазоне средних и высоких частот вращения помогает увеличение диаметра КС, однако это приводит к потере интенсивности вихря на низких частотах вращения, вызывая увеличение дымности. Компромиссным решением в дизелях с не высокой интенсивностью впрыска является выполнение поднутрения в КС совместно с вытеснителем, что при сохранении неизменной степени сжатия дает возможность сохранить длину свободного распространения топливного факела. Увеличение диаметра КС должно согласовываться с расположением топливных факелов, которые не должны попадать на днище поршня в процессе впрыска топлива и способствовать равномерному распределению топлива внутри камеры. В дизелях с высокой интенсивностью впрыска роль кромки камеры сгорания превалирует над ролью поднутрения. Смесеобразование происходит главным образом за счет энергии впрыска топлива, что подталкивает к изменению формы КС в сторону выполнения кромки конусной формы с плавным переходом в основную камеру цилиндрической формы с вытеснителем в центре.

#### **Библиографический список использованной литературы**

1. Шароглазов Б. А. Двигатели внутреннего сгорания: теория, моделирование и расчёт процессов / Б.А. Шароглазов. – Челябинск: Изд. ЮУрГУ, 2005. – 403 с.
2. Кухаренко Г.М. Моделирование характеристик топливных струй и параметров камеры сгорания дизеля / Г.М. Кухаренко, Д.Г. Гершань // Вестник БНТУ. – Минск, 2011. – № 4 – С.35 – 39.
3. De Risi. Optimization of the combustion chamber of direct injection diesel engines / De Risi, A., Donato, T., Laforgia, D. – Lecce – Italy, 2003.

*Поступила в редакцию 28.01.2014 г.*

#### **Кухаренко Г.М., Петрученко О.М., Березун В.И. Вибір форми камери згоряння дизельних двигунів**

Досліджено вплив форми камери згоряння на викид шкідливих речовин. Сформовано підхід до конструювання камери згоряння для дизелів з низькою і високою інтенсивністю упорскування палива.

**Ключові слова:** камера згоряння, викид шкідливих речовин.

#### **Kuharonak G.M., Petrushenko A.N., Berazun V.I. The development of the combustion chamber diesel engines**

The influence of the combustion chamber on the emissions of the diesel engine is evaluated. Formed approach to the design of the combustion chamber for diesel engines with high and low intensity of injection pressure.

**Keywords:** combustion chamber, exhaust emissions.