

УДК 621.43.057.33

К. Н. ГАРИПОВ, М. Д. ГАРИПОВ, Р. Ю. САКУЛИН

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ ОБВОДНЕННОСТИ СПИРТОВОГО ТОПЛИВА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВС С УНИФИЦИРОВАННЫМ РАБОЧИМ ПРОЦЕССОМ

Приведены результаты экспериментального исследования работы двигателя с унифицированным рабочим процессом на водных растворах этанола с высоким содержанием воды в спиртовом растворе. Показана возможность радикального снижения выбросов оксидов азота при увеличении количества воды в спиртовом топливе без увеличения выбросов продуктов неполного сгорания и ухудшения эффективных показателей двигателя. *Поршневой ДВС; рабочий процесс; обводненный этанол; токсичность; оксиды азота*

1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В работах [1, 3] описан унифицированный рабочий процесс, который позволяет объединить лучшие качества двух существующих типов двигателей: топливную экономичность дизеля и удельную мощность бензинового ДВС. Потенциал снижения и закономерности эмиссии вредных веществ в условиях унифицированного рабочего процесса изучены на данный момент недостаточно.

Снижение выбросов токсичных компонентов отработавших газов (ОГ) обеспечивается двумя принципиально различными способами:

1) организацией рабочего процесса с подавлением образования токсичных компонентов непосредственно в рабочей камере двигателя;

2) применением средств дополнительной обработки ОГ (нейтрализаторов и фильтров).

Чем выше концентрация токсичных компонентов в ОГ, тем выше нагрузка на нейтрализаторы и фильтры и тем быстрее они теряют свою эффективность. Их совершенствование влечет значительное усложнение конструкции и удорожание энергетической установки. К тому же для удовлетворения перспективных норм токсичности уже не достаточно той эффективности нейтрализации токсичных компонентов, которую могут обеспечить современные системы дополнительной обработки ОГ. Поэтому при разработке перспективных систем снижения токсичности двигателей внутреннего сгорания особое внимание уделяется подавлению образования токсичных компонентов непосред-

ственно в рабочей камере двигателя. Особую сложность в этом вопросе представляет снижение в ОГ концентрации оксидов азота [4, 7]. Анализ перспективных методов снижения токсичности продуктов сгорания посредством воздействия на рабочий процесс энергетической установки позволяет выделить двух «лидеров»:

1) организация рабочего процесса со сжиганием бедных предварительно перемешанных смесей с коэффициентом избытка воздуха в зоне горения $\alpha \approx 2$;

2) организация рабочего процесса со сжиганием обводненных топливовоздушных смесей.

Снижение выбросов оксидов азота при сжигании бедных предварительно перемешанных смесей ($\alpha \approx 2$) происходит за счет снижения температуры горения до 1400–1500 °С [6, 7]. В настоящее время этот принцип успешно реализуется в ГТУ [6]. Кроме того, на основе этой концепции ведутся исследования по совершенствованию дизельных двигателей с гомогенным зарядом (HCCI – Homogeneous Charge Compression Ignition), которые демонстрируют значительное снижение эмиссии оксидов азота [8, 9]. Но работа на полной нагрузке с такими коэффициентами избытка воздуха ведет к существенному снижению удельной мощности двигателя. К тому же в поршневых ДВС, где рабочий процесс, в отличие от газотурбинных, носит циклический характер, наряду с проблемами сгорания бедных смесей, возникают проблемы, связанные с их воспламенением. Для расширения концентрационных пределов воспламенения и сгорания (до $\alpha \approx 2$)

необходимы очень высокие степени сжатия (> 20), что опять же влечет повышение температуры в зоне горения, значительное увеличение массы двигателя и, следовательно, дополнительное снижение его удельной мощности.

Этих недостатков лишен процесс со сгоранием обводненных околостехиометрических топливовоздушных смесей. Более того, в работе [2] было показано, что организация процесса сжигания околостехиометрической обводненной смеси предпочтительнее с кинетической точки зрения по сравнению с организацией сжигания бедных предварительно перемешанных смесей, поскольку при равнозначных концентрациях оксида азота температура, а следовательно, и скорость реакции окисления топлива в случае добавок воды оказывается большей. Это обстоятельство способствует большей устойчивости и полноте горения.

Однако при сжигании обводненных смесей, состав которых близок к стехиометрическому ($\alpha \approx 1,1$), возможно существенно неравномерное распределение воды в объеме топливовоздушной смеси, из-за чего образуются зоны с повышенной и пониженной температурами горения. Это может привести одновременно к повышенным выбросам и оксидов азота, и продуктов неполного сгорания топлива.

Избежать этого явления возможно, используя в качестве топлива обводненный этанол, являющийся истинным раствором, что исключает вышеуказанную неравномерность. Кроме того, этанол рассматривается в качестве наиболее вероятного альтернативного топлива [5, 10], а значительное содержание воды в растворе этанола упрощает технологию и значительно снижает энергоемкость его производства [9]. Но в традиционных ДВС обводнение этанола в количествах, достаточных для значительного подавления эмиссии оксидов азота, ведет к ухудшению процессов воспламенения и сгорания.

В работе [1] показано, что подход к смесиобразованию и воспламенению, заложенный в унифицированном рабочем процессе, позволяет воспламенять водные растворы этанола с большим содержанием воды единичным искровым разрядом, формируемым стандартной автомобильной системой зажигания.

Целью работы являлось исследование возможности снижения эмиссии оксидов азота в унифицированном рабочем процессе при увеличении содержания воды в водном растворе этанола без существенного снижения мощностных и экономических показателей двигателя.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКСИЧНОСТИ ВЫБРОСОВ В УНИФИЦИРОВАННОМ РАБОЧЕМ ПРОЦЕССЕ

Унифицированный рабочий процесс реализован на базе четырехтактного дизельного двигателя Д-65Н. Геометрическая степень сжатия в серийном варианте равна 17,3. На двигателе имеется возможность регулирования углов опережения зажигания и впрыска.

На рис. 1 представлена схема конструктивной реализации предлагаемого рабочего процесса. Топливо с небольшим количеством воздуха поступает в полость компрессорфорсунки, где происходит предварительная стадия смесиобразования – подогрев, дробление, перемешивание и частичное испарение топлива. Поршень компрессорфорсунки приводится в движение от коленчатого вала двигателя. На такте сжатия за счет движения поршня компрессорфорсунки происходит впрыск топливовоздушного факела в рабочую камеру двигателя, в которой окончательно формируется топливовоздушная смесь. Зажигание смеси осуществляется искровым разрядом от свечи зажигания на периферии топливовоздушного факела. Система зажигания имеет традиционную конструкцию и параметры разряда, характерные для современных бензиновых двигателей. Компрессорфорсунка оснащена необходимыми устройствами для дозирования топлива и воздуха в зависимости от режима работы двигателя.

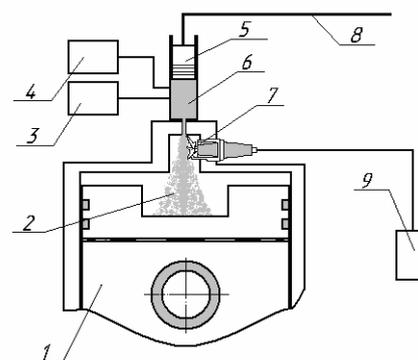


Рис. 1. Схема конструкции для реализации унифицированного рабочего процесса: 1 – поршень; 2 – факел обогащенной топливовоздушной смеси; 3, 4 – устройства дозирования топлива и воздуха для компрессорфорсунки; 5 – поршень компрессорфорсунки; 6 – компрессорфорсунка; 7 – свеча зажигания; 8 – привод компрессорфорсунки от вала двигателя (условно); 9 – катушка системы зажигания

3. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

В экспериментах использовались водные растворы этанола различной концентрации (95, 70, 50, 45, 40% объемных). При работе на каждом виде топлива снимались индикаторные диаграммы двигателя и определялся состав отработавших газов. Измерения проводились на частоте вращения вала двигателя, близкой к частоте вращения при максимальном моменте (1100–1200 об/мин). Такие же измерения произведены при работе двигателя на базовом дизельном топливе со штатной системой топливоподачи.

Качество рабочего процесса, эффективные показатели и эмиссия токсичных компонентов определяются качеством доводки двигателя. Доводка рабочего процесса двигателя – долгий и трудоемкий процесс, необходимо учесть большое количество факторов. Это углы опережения впрыска и зажигания, продолжительность впрыска, состав смеси в полости КФ, форма и размеры камеры сгорания, ее соответствие форме и размерам топливовоздушного факела и т. д. Во избежание длительного доводочного процесса впрыскивание топлива производилось на линии впуска. При таком раннем впрыскивании топливовоздушная смесь должна получиться достаточно однородной, что позволяет в процессе экспериментов сосредоточиться на изучении влияния концентрации воды в смеси на выбросы вредных веществ с отработавшими газами; влияние остальных вышеперечисленных факторов в данном случае будет несущественным. При раннем впрыске топливо подается в среду, давление которой близко к атмосферному, из-за чего дальность струи получается достаточно высокой. Большая часть топлива при положении поршня вблизи нижней мертвой точки может попасть на стенки гильзы цилиндра, поршня и в защемленные объемы. Вследствие этого выбросы продуктов неполного сгорания топлива могут получиться достаточно высокими. Однако в рамках данного исследования абсолютное значение выбросов продуктов неполного сгорания не имело решающего значения, поскольку, согласно цели исследования, изучались изменения показателей двигателя в зависимости от содержания воды в топливе.

Экспериментальное исследование работы двигателя с унифицированным рабочим процессом на спиртоводных смесях проводилось на режиме работы двигателя с незначительным обеднением ($\alpha \approx 1,3$) с целью приблизить усло-

вия работы экспериментального двигателя к условиям работы базового двигателя на полной нагрузке ($\alpha \approx 1,4$) для сопоставимости результатов. При большем коэффициенте избытка воздуха в условиях сгорания однородной спиртовоздушной смеси возникали пропуски воспламенения. Угол опережения зажигания подбирался при работающем двигателе. Критерием выбора служила максимальная работа цикла.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2–7 представлены кривые изменения давления в рабочей камере в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Обработка индикаторных диаграмм (рис. 8) показала, что увеличение концентрации воды в спиртоводном растворе не снижает среднее индикаторное давление двигателя.

На рис. 9 и 10 приведены значения среднего удельного эффективного расхода топлива и теплоты в зависимости от содержания этанола в спиртоводном растворе. Для спиртоводных растворов расход пересчитан на дозу этанола. Видно, что удельный расход теплоты практически не зависит (разница не более 10%) от содержания воды в спиртоводном растворе. Несколько завышенный расход спиртоводных растворов по сравнению с дизельным топливом объясняется меньшей теплотворной способностью этанола. Однако пересчет на энергетический эквивалент (рис. 10) показал, что удельный эффективный расход теплоты спиртоводных смесей в унифицированном рабочем процессе ниже, чем в базовом дизельном варианте.

На рис. 11 приведена экспериментальная зависимость выбросов оксидов азота от содержания воды в спиртоводном растворе. При больших содержаниях воды наблюдается значительное снижение выбросов оксидов азота, соизмеримое с выбросами последних в стационарных ГТУ [6] и дизельных двигателях с гомотенным зарядом, где организуется сжигание бедных предварительно перемешанных смесей [8, 9]. Однако в отличие от последних снижение оксидов азота в описываемом способе не вызывает снижения удельной мощности двигателя (рис. 8). На рис. 12 представлена зависимость изменения содержания оксида и диоксида углерода в продуктах сгорания от содержания воды в спиртоводном растворе. С увеличением содержания воды в спиртоводном растворе полнота сгорания не ухудшается – выбросы CO не увеличиваются.

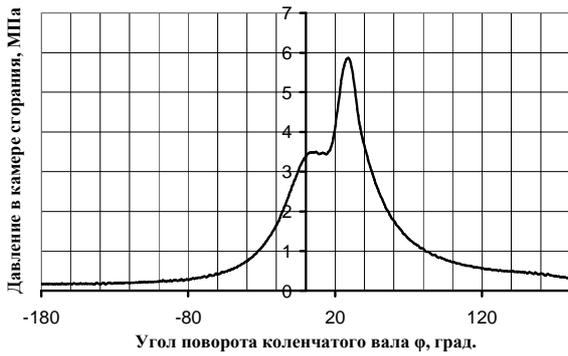


Рис. 2. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – водный раствор этанола (40%), угол опережения зажигания 10 град. п.к.в

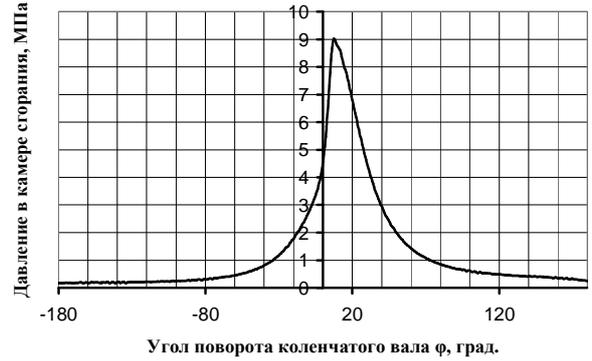


Рис. 5. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – водный раствор этанола (70%), угол опережения зажигания 20 град. п.к.в



Рис. 3. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – водный раствор этанола (45%), угол опережения зажигания 10 град. п.к.в

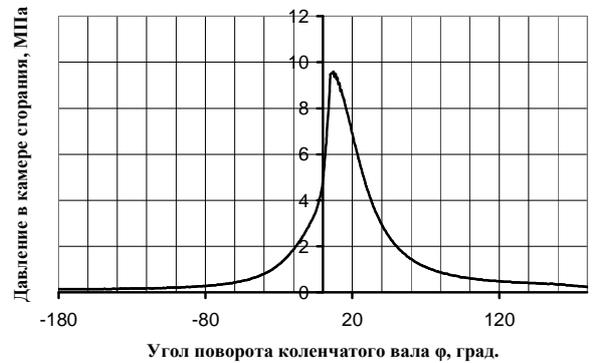


Рис. 6. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – водный раствор этанола (95%), угол опережения зажигания 20 град. п.к.в

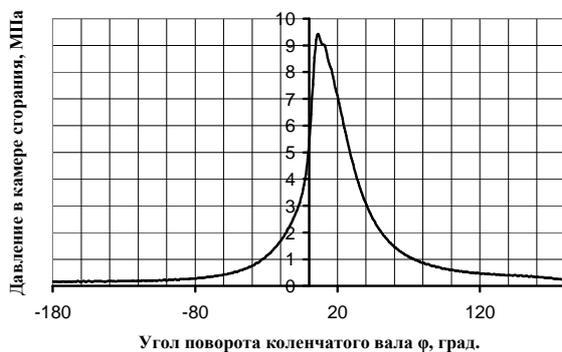


Рис. 4. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – водный раствор этанола (50%), угол опережения зажигания 20 град. п.к.в

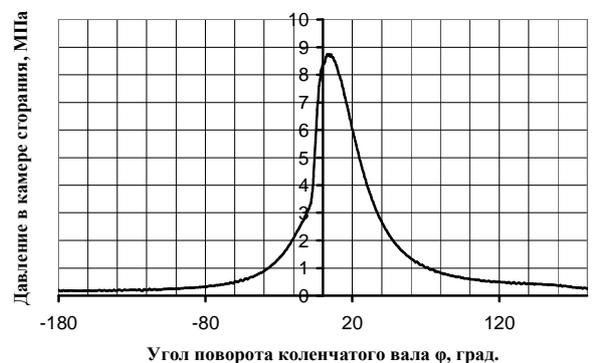


Рис. 7. Зависимость изменения давления P (МПа) от угла поворота вала ϕ . Топливо – дизельное, штатная система топливоподачи

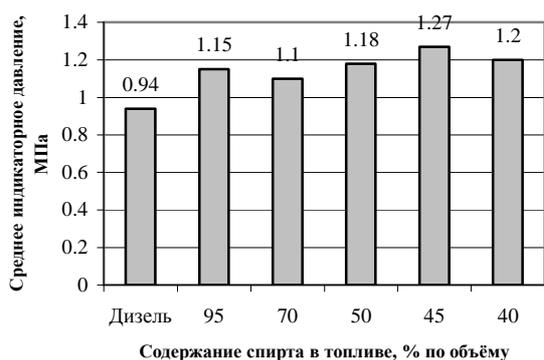


Рис. 8. Зависимость изменения среднего индикаторного давления от содержания этанола в спиртоводном растворе

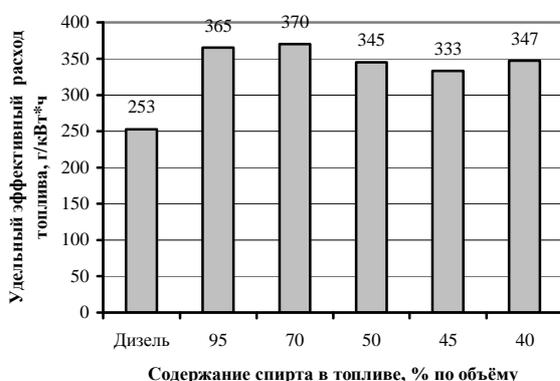


Рис. 9. Зависимость изменения удельного эффективного расхода топлива от вида топлива. Для спиртоводных растворов расход пересчитан на дозу этанола

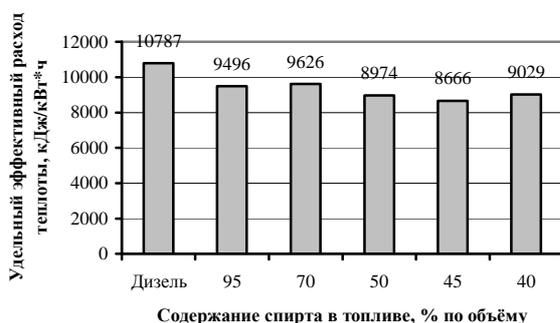


Рис. 10. Зависимость изменения удельного эффективного расхода теплоты от вида топлива. Для спиртоводных растворов расход пересчитан на дозу этанола

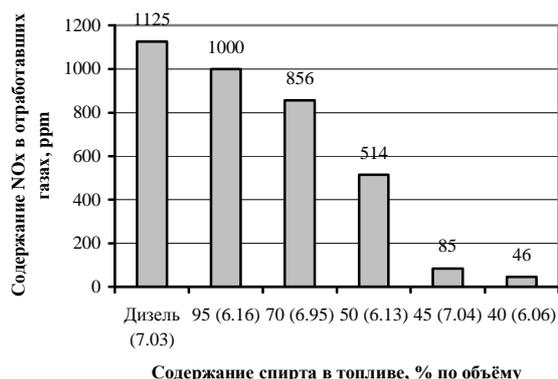


Рис. 11. Зависимость изменения выбросов оксидов азота от вида топлива. В скобках – содержание кислорода в продуктах сгорания, % по объёму

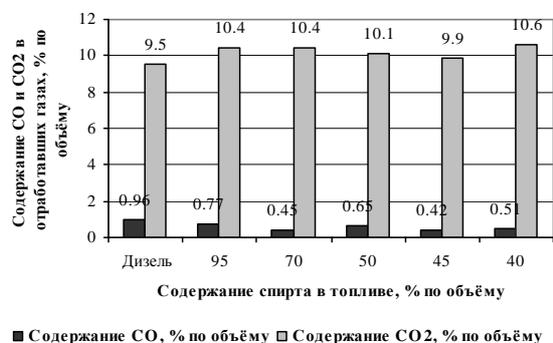


Рис. 12. Зависимость изменения содержания CO и CO₂ в продуктах сгорания от вида топлива

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, экспериментально подтверждена возможность работы двигателя с унифицированным рабочим процессом на водных растворах этанола с высоким содержанием воды в спиртоводном растворе. Показано, что в унифицированном рабочем процессе возможно достижение радикального снижения выбросов оксидов азота при увеличении количества воды в спиртоводной смеси без увеличения выбросов продуктов неполного сгорания и ухудшения эффективных показателей двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Искровое воспламенение в условиях глубокого расслоения топливовоздушного заряда в рабочей камере ДВС / М. Д. Гарипов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 6 (24). С. 114–120.
2. Влияние воды на кинетику окисления метановоздушных смесей в условиях поршневого ДВС / М. Д. Гарипов [и др.] // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2(29). С. 74–84.

3. **Еникеев Р. Д., Гарипов М. Д.** Рабочий процесс перспективного поршневого ДВС // Вестник УГАТУ. 2006. Т. 7, № 3 (16). С. 12–22.

4. **Кульчицкий А. Р.** Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пос. М.: Академический проспект, 2004. 400 с.

5. Положение дел в области продовольствия и сельского хозяйства. Биотопливо: перспективы, риски и возможности // Продовольственная и сельскохозяйственная организация объединенных наций, Рим, 2008. 159 с.

6. Проблема и пути создания малотоксичных камер сгорания для перспективных стационарных ГТУ / А. Г. Тумановский [и др.] // Теплоэнергетика, 2006. № 4. С. 22–25.

7. **Baumgarten C.** Mixture Formation in Internal Combustion Engines // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 294 p.

8. Homogeneous charge combustion of aqueous ethanol / S. Beyerlein [et al] // Research and special programs administration U.S. department of transportation, final report. 2001. 25 p.

9. Direct Use of Wet Ethanol in a Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine: Experimental and Numerical Results / J. H. Mack [et al] // Fall Meeting of the Western States Section of the Combustion Institute Sandia National Laboratories, Livermore, CA, 2007. 15 p.

10. Sugarcane-based bioethanol: energy for sustainable development // coordination BNDES and CGEE – Rio de Janeiro, 2008. 304 p.

ОБ АВТОРАХ



Гарипов Кирилл Назифович, лаб. каф. двиг. внутр. сгорания. Дипл. бакалавр техн. и технол. по энергомашиностроению (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. перспективных рабочих процессов ДВС, биотоплив.



Гарипов Марат Данилович, доц. той же каф. Дипл. магистр техники и технологий (УГАТУ, 1999). Канд. техн. наук по тепловым двигателям (УГАТУ, 2004). Иссл. в обл. перспективных рабочих процессов ДВС, биотоплив.



Сакулин Роман Юрьевич, асп. той же каф. Дипл. магистр по поршневым и комбинированным двигателям внутреннего сгорания (УГАТУ, 2006). Готовит дисс. в обл. снижения токсичности ДВС.