

УДК 621.434.432

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.152063

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛНОВОГО ЭФФЕКТА В ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЕ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДОБАВОК ВОДОРОДА К ДИЗЕЛЬНОМУ ТОПЛИВУ

Шалапко Д. О.

1. Введение

Ограниченность запасов ископаемых органических энергоресурсов обуславливает необходимость более широкого применения альтернативного топлива и топливных добавок в транспортных установках. На ближайшие десятилетия для малых и средних транспортных и стационарных энергоустановок одним из основных типов двигателей остаются турбопоршневые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с воспламенением от сжатия. Задача повышения эффективности работы таких двигателей может быть решена, в частности, за счет использования перспективных топливных добавок [1, 2].

В качестве добавок к дизельному топливу можно использовать [3]:

- газомоторные топлива (сжиженный или сжатый природный газ);
- сжиженные нефтяные газы (пропан, бутан);
- спирты и бензоспиртовые смеси (метиловый, этиловый, изобутиловый и другие спирты и их смеси с автобензином в различных пропорциях);
- эфиры (метилтретбутиловый эфир, метилтретамилловый эфир, этилтретбутиловый эфир, диизопропиловый эфир, а также диметиловый эфир);
- синтетические жидкие топлива, получаемые из природного газа и угля;
- биотоплива (биоэтанол, биодизель), получаемые из возобновляемых видов сырья;
- водород и топливные добавки на основе водорода.

В работе представлено экспериментальное исследование влияния применения добавок газообразного водорода в линию высокого топливной аппаратуры ДВС на характеристики «волнового эффекта» и характеристики впрыска ДВС.

Поэтому актуальным является исследование возможности применения добавок водорода в топливную магистраль высокого давления через специальный невозвратный клапан за счет «волнового эффекта» в топливной аппаратуре [4, 5].

2. Объект исследования и его технологический аудит

Объект исследования – гидродинамические волновые эффекты в топливной аппаратуре высокого давления дизельных двигателей. За счет применения «волнового эффекта» при помощи специального невозвратного клапана возможно осуществлять малые добавки (0,1...0,5 % по массе) водорода к основному топливу. Конструктивная схема невозвратного добавочного клапана представлена на рис. 1.

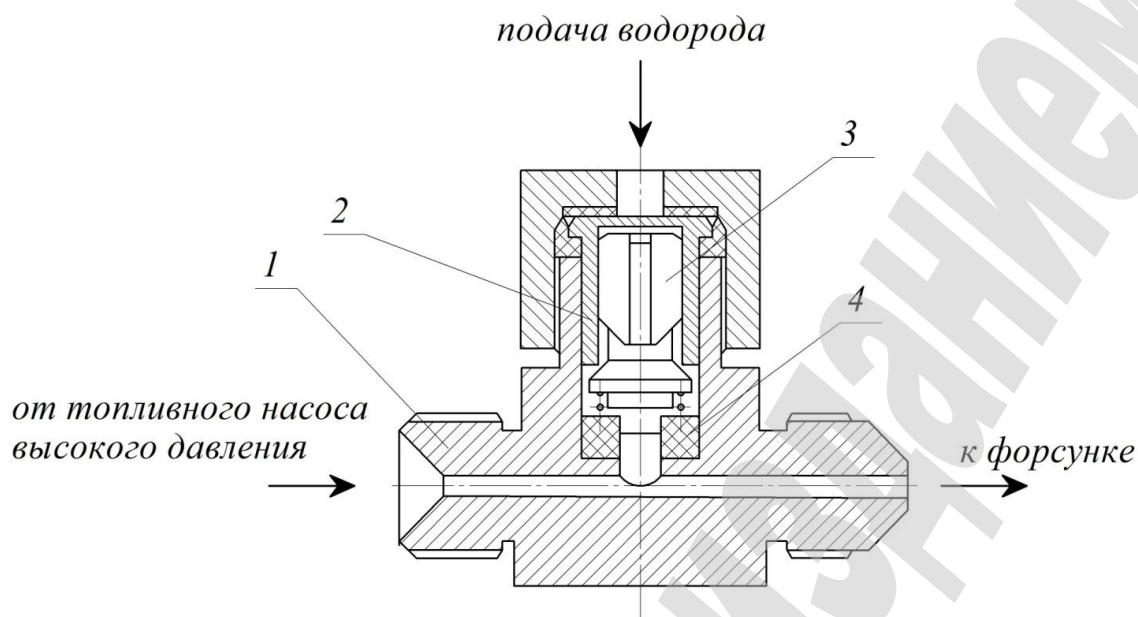


Рис. 1. Устройство для подачи водорода в линию высокого давления: 1 – корпус тройника; 2 – корпус размещения клапана; 3 – невозвратный клапан с направляющим хвостовиком; 4 – ограничитель хода клапана

Среди предложенных вариантов присадок к основному топливу особый интерес представляет именно водород, так как согласно работам [6, 7], даже минимальные добавки водорода (0,1–0,5 % по массе) имеют положительное влияние на экологические и экономические показатели дизеля.

Конструктивно рациональным представляется подача водорода в топливную магистраль высокого давления между топливным насосом высокого давления (ТНВД) и форсункой. Особенность заключается в том, чтобы добавлять водород в дизельное топливо в магистраль высокого давления на волне низкого давления с помощью специального устройства. При этом на волне давления дизельное топливо насыщается водородом и поступает в форсунку и дальше впрыскивается в цилиндр двигателя. После впрыска и снижения давления в цилиндре водород освобождается из дизельного топлива, способствует дальнейшему измельчению капель и быстро диффундирует в объем надпоршневого пространства. Количество водорода, который добавляется к цикловой подаче дизельного топлива, регулируется давлением подачи водорода на входе в смешительное устройство (рис. 1) [2]. Однако при использовании газовых добавок следует не превышать пределы растворимости газа в топливе во избежание возникновения газовых пробок в топливной магистрали высокого давления.

Данный способ является весьма простым в применении и не требует существенного изменения конструкции двигателя. Однако в специальной научной и технической литературе предложенный способ добавления водорода мало изучен, что предопределяет перспективность его экспериментального исследования.

3. Цель и задачи исследования

Цель исследования – получение зависимостей насыщения дизельного топлива водородной добавкой для формирования математической модели.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Разработать физическую модель волновых колебаний в топливной аппаратуре дизеля.
2. Создать экспериментальный стенд для исследования волнового эффекта при малых добавках водорода в топливную магистраль высокого давления.
3. Получить качественные результаты по его влиянию на параметры ДВС.

4. Исследование существующих решений проблемы

Способ добавления водорода, который описан в работе [7] показывает высокую экологическую эффективность применения малых добавок водорода при помощи двухтопливной форсунки. Однако, в этой работе не до конца раскрыт «волновой эффект» топливной аппаратуры и влияние водорода на гидравлические характеристики в топливопроводе.

Среди основных направлений повышения эффективности ДВС за счет применения водорода в качестве добавки к основному топливу, выявленных в ресурсах мировой периодики, могут быть выделены [8, 9]. Но в них рассматривается исключительно подача водорода во впускной коллектор. Работы [3, 10] посвящены рассмотрению влияния добавления водорода на экологические параметры дизеля, с анализом рационального соотношения водорода к топливу. Но остается вопрос соотношения стоимости затрат на водород при его добавлении до 20 %.

Альтернативный вариант решения проблемы, изложенный в [11], не предусматривает добавления водорода в топливо, однако использует непосредственную подачу водорода в цилиндр дизеля. В тоже время работы [11, 12] используют от 8 до 45 % водорода по соотношению к дизельному топливу. Применение водорода в качестве добавки к основному топливу играет роль только в повышении энергоемкости топлива по мнению авторов работы [13]. Это не подтверждается ни экспериментальным путем, ни моделированием. Присадка водорода в количестве 3 % по массе приводит к повышению эффективности энергетической установки с ДВС на 1,5 %, как показано в [14]. Однако в данном случае водород выступает и как катализатор горения и как топливо, так как при такой добавке энергетический потенциал достигает 10 % от основного топлива. Применение водорода в НСЦИ в количестве добавки до 17 % показало, что меньшая пропорция добавки эффективнее и приводит к более «мягкой» работе двигателя [15]. Хотя это утверждение касается исключительно данного типа двигателей и не имеет широкого распространения в мировом двигателестроении.

5. Методы исследования

Физическая модель распыла и возможности применения добавок водорода на линии разряжения требуют дальнейшего теоретического и экспериментального исследований для определений рациональных параметров подачи добавки и регулирования процесса впрыска топлива. Одним из методов исследования является физическое моделирование, которое позволяет получить достаточно точные результаты.

В современных быстроходных дизелях процесс подачи топлива происходит всего за 1...4 мс при высокой скорости плунжера насоса [4]. Сжатие и нагнетание

топлива имеют импульсный нестационарный характер. Само же топливо представляет собой упругую среду, в которой давление распространяется со скоростью звука (1200–1600 м/с), причем любое, даже незначительное, изменение объема в заполненной гидравлической системе вызывает резкое изменение давления.

Импульсы давления, распространяющиеся от источника возмущения, встречая препятствия на концах системы, частично отражаются и образуют обратные и суммарные волны, сильно искажающие характеристики впрыскивания. В конце подачи топлива волны давления, отражаясь от закрытого нагнетательного клапана, могут вызвать повторные подскоки иглы уже после завершения основного периода впрыскивания. Получающиеся в результате этого, так называемые, подвпрыски, нежелательны, так как давление впрыскивания при этом невелико, а распыливание топлива грубое и неоднородное. Подача с подвпрыском приводит к повышению дымности отходящих газов (ОГ), увеличению нагарообразования, возрастанию удельного расхода топлива и создает предпосылки для закоксовывания отверстий распылителя.

После окончания подачи топлива движение и отражение волн в полости высокого давления (штуцер насоса – нагнетательный трубопровод – форсунка) постепенно затухают вследствие необратимых потерь энергии на трение, и в ней устанавливается остаточное давление. Обычно, чем длиннее топливопровод и выше частота импульсов впрыскивания, тем сильнее влияние волновых явлений в системе на характеристики подачи топлива. Данный фактор не имеет такого влияния на участок «насос-форсунки», где нагнетательный трубопровод отсутствует, и волновое воздействие пренебрежимо мало.

6. Результаты исследования

С целью детального изучения этих процессов была разработана экспериментальная установка ДВС-1-МДВ на базе топливной системы дизеля Д65 (4С11/13) (СССР). Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2, её внешний вид представлен на рис. 3, 4.

Экспериментальная установка состоит из трех подсистем:

- подсистема для физического моделирования процессов впрыска топлива с добавлением газообразного водорода (на базе топливной системы двигателя Д65);
- подсистема снятия и автоматизированной обработки данных измерений;
- подсистема автоматического регулирования параметров установки.

Из баллона 1 объемом 5 л (рис. 2) водород через редуктор 2 поступает в клапан добавления присадки 4, который устанавливается перед штуцером штатной форсунки 12, смонтированной на штанге и установленной распылителем в мерный стакан 11.

Топливный насос высокого давления 7 приводится в действие через муфту от трехфазного электродвигателя переменного тока 5, работающего через частотный преобразователь для регулирования частоты вращения вала. На соединительной муфте ТНВД и электродвигателя установлен цифровой тахометр. Расход топлива через ТНВД измерялся по мерному стакану 11. Для регистрации давления водорода установлен тензoeлектрический датчик 3 давления «ОВЕН ПД100-ДИ6,0» (Россия).

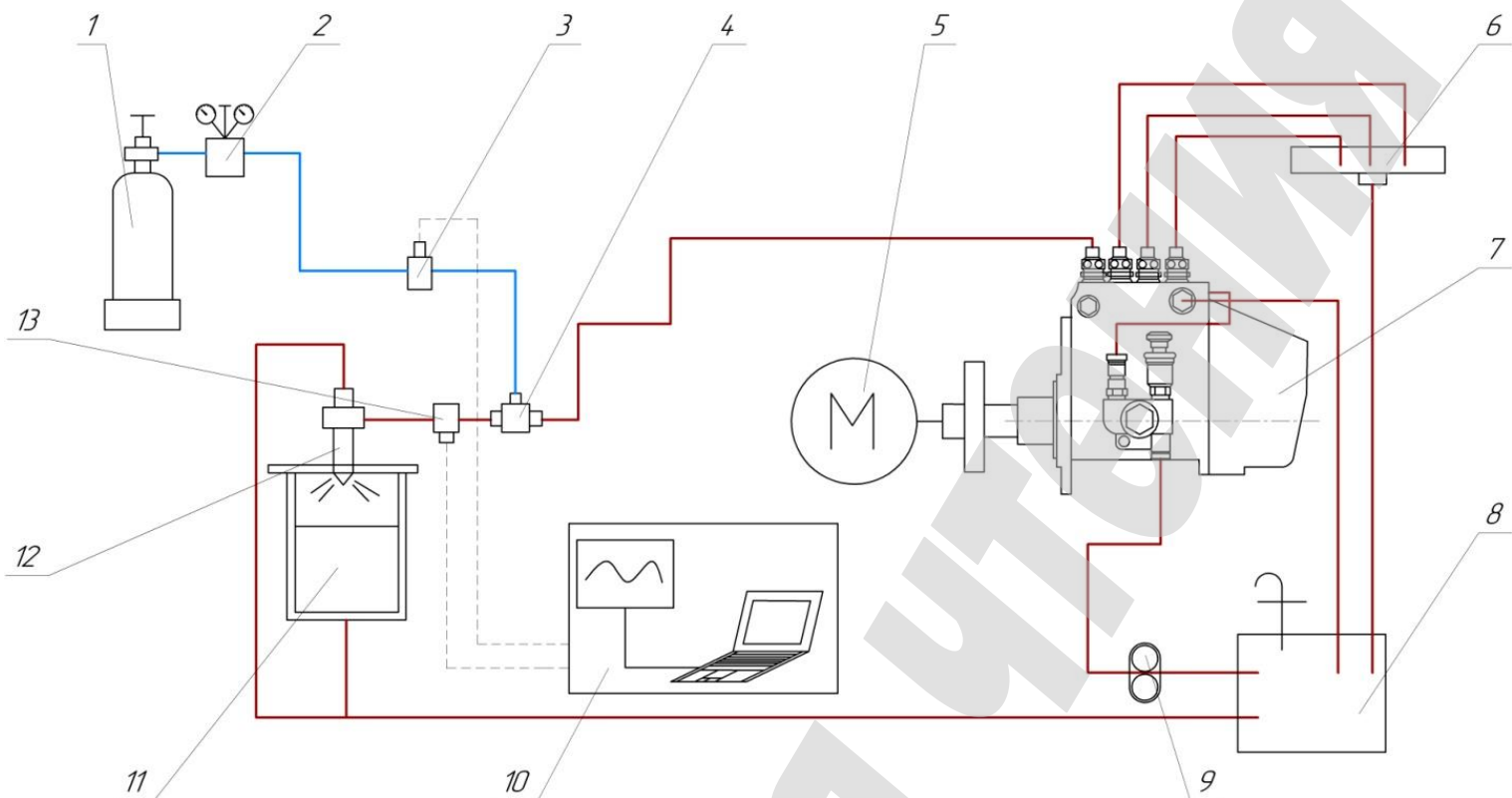


Рис. 2. Схема экспериментальной установки ДВС-1-МДВ:

1 – баллон со сжатым водородом; 2 – редуктор водородный промышленный;
 3 – датчик давления; 4 – клапан добавления водорода в топливную магистраль
 высокого давления; 5 – электродвигатель; 6 – емкость сброса топлива;
 7 – топливный насос высокого давления; 8 – расходная цистерна; 9 – насос топ-
 ливный подкачивающий; 10 – компьютерная система сбора и обработки данных
 измерений; 11 – емкость для впрыска; 12 – форсунка; 13 – датчик давления

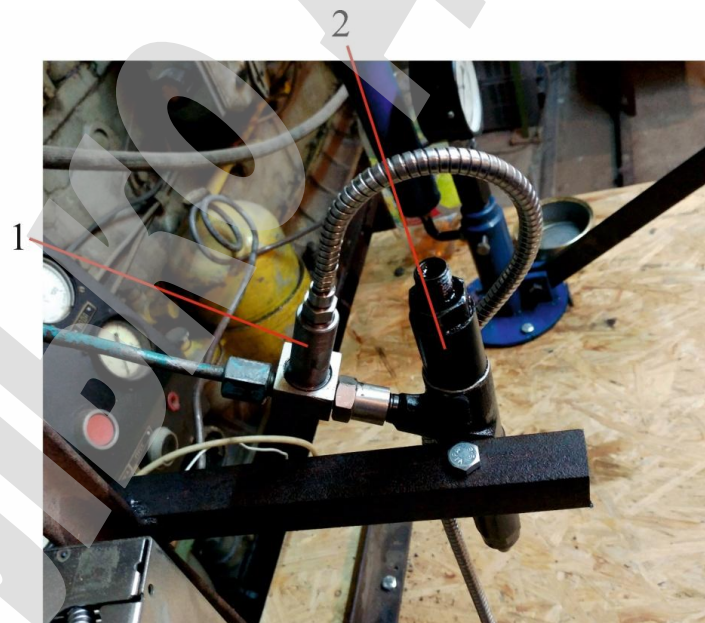


Рис. 3. Установка датчика «Optrand AutoPSI-S2000» (США) в линию высокого
 давления: 1 – датчик давления; 2 – форсунка

Величина давления в топливной магистрали превращается в токовый сигнал динамичным волоконно-оптическим датчиком 13 давления для высокотемпературных измерений давления «Optrand AutoPSI-S2000» (США) с верхним пределом измерений 200 МПа и выходным сигналом 0,5...5,0 В. Это позволяет определить момент начала впрыска топлива, качественно оценить величину давления топлива и исследовать процессы в трубопроводе высокого давления.

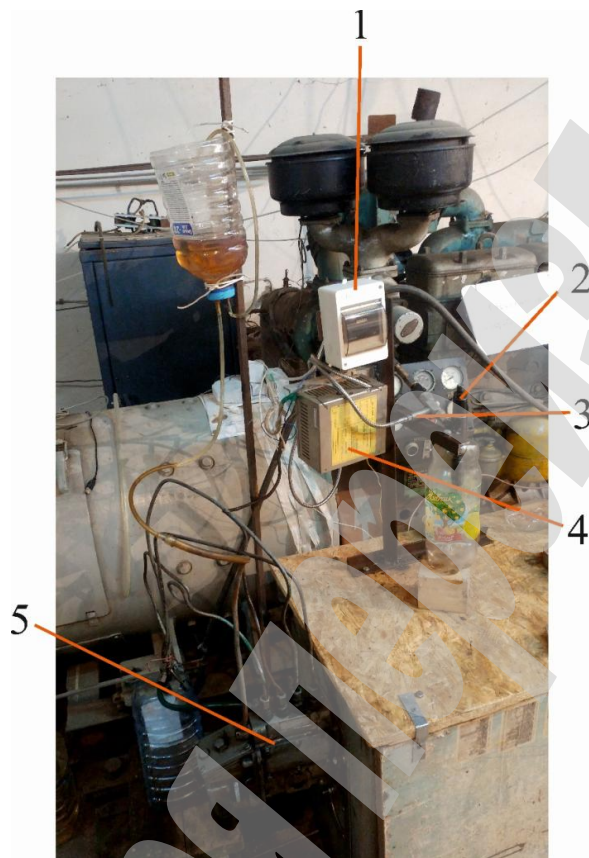


Рис. 4. Экспериментальная установка на базе топливной аппаратуры двигателя 4С11/13:
1 – блок питания датчиков давления «ОВЕН»; 2 – форсунка;
3 – датчик давления; 4 – блок-фильтр сигнала; 5 – топливный насос высокого давления

Сигналы первичных датчиков от стенда ДВС-1-МДВ поступают в электронном виде к USB-осциллографу и в компьютеризированную систему 10 измерения и регистрации данных «IRIS» (Россия).

Современные первичные преобразователи измеряемых физических величин в электрические сигналы в совокупности с компьютеризированным аппаратным обеспечением проведения экспериментальных исследований и программным обеспечением обработки экспериментальных данных на базе САД-систем обеспечивают достаточную достоверность получаемой экспериментальной информации.

Характеристики основной измерительной аппаратуры экспериментального стенда ДВС-1-МДВ приведена в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики измерительной аппаратуры экспериментального стенда ДВС-1-МДВ

Наименование измерительного прибора, аппаратуры	Марка	Предел измерения	Погрешность измерения
Тахометр	«Вымпел»	600...8000 мин. ⁻¹	±1 %
Динамический датчик давления	«Optrand AutoPSI-S2000»	0...200 МПа	±0,5 %
Датчик давления	«ОВЕН ПД100-ДИ6,0»	1,2...6,0 МПа	±0,5 %
Частотомер	Ч4-34А	10 Гц...120 МГц	±1 ед. сч

На рис. 5 представлены диаграммы впрыска топлива с добавкой водорода (рис. 5, а) и без добавки (рис. 5, б), полученные экспериментальным путем.

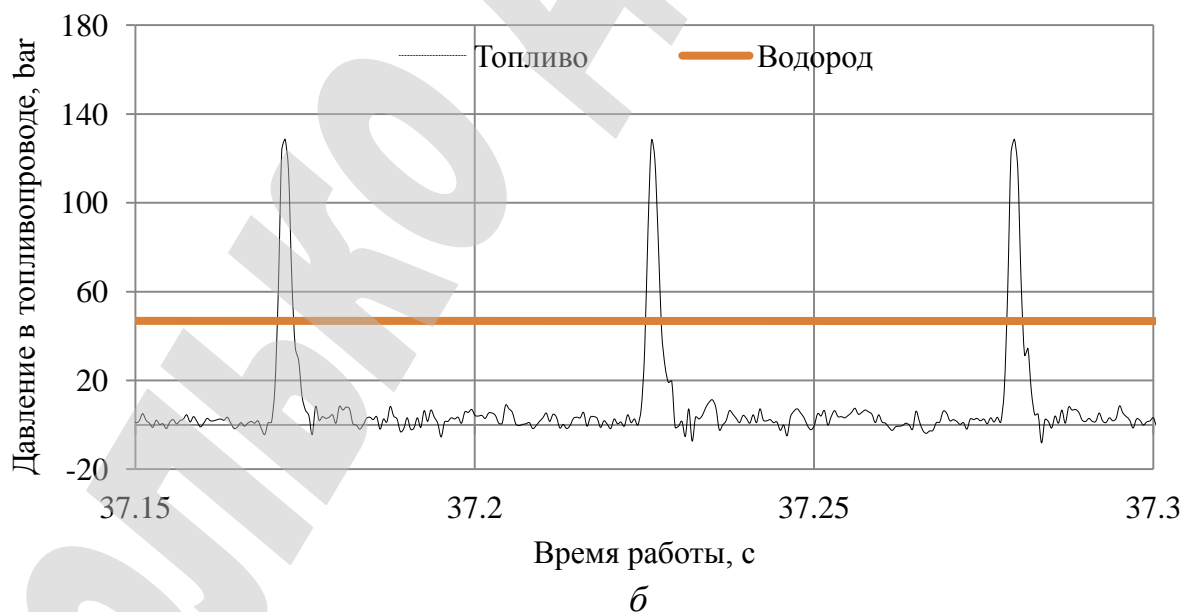
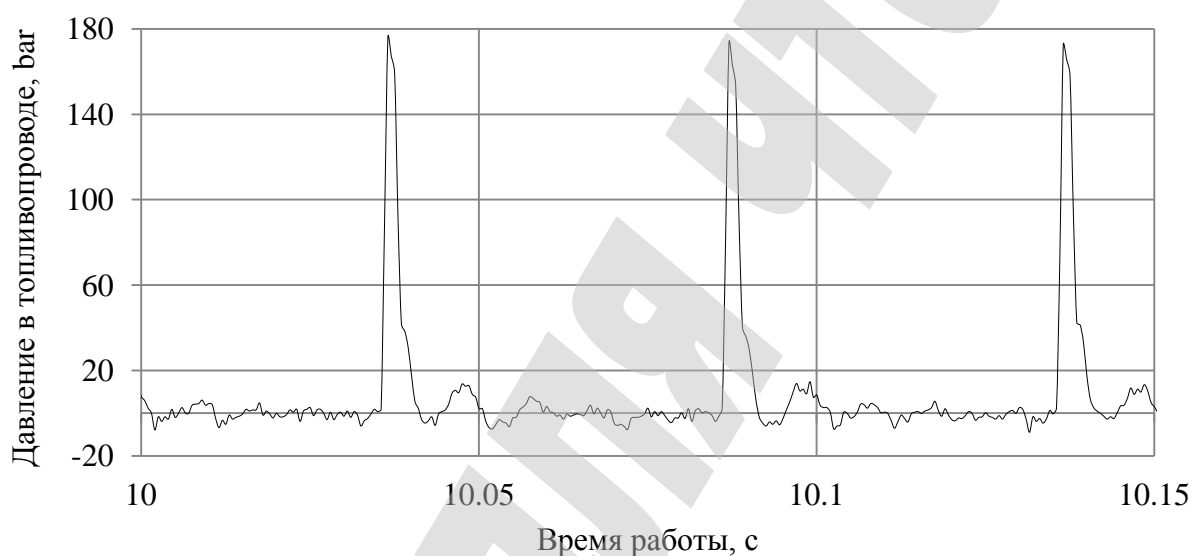


Рис. 5. Диаграмма впрыска топлива (выделен ряд впрысков):
а – без добавки водорода; *б* – с добавкой

Анализ приведенных данных показывает, что при добавке газообразного водорода к топливу «сглаживается» эффект волновых колебаний в линии высокого давления, однако при этом заметно существенное снижение максимального давления впрыска топлива (рис. 6) после начала подачи добавки. Присутствие добавки водорода в размере $\nu=0,1\%$, при серийном затыге пружины иглы форсунки $P_{зн}=17,6$ МПа, как видно по рис. 6, вызывает уменьшение максимального давления впрыска $P_{впр}$ на 2...3 МПа. Уменьшение максимального давления впрыска можно объяснить за счет изменения физико-химических свойств топлива.

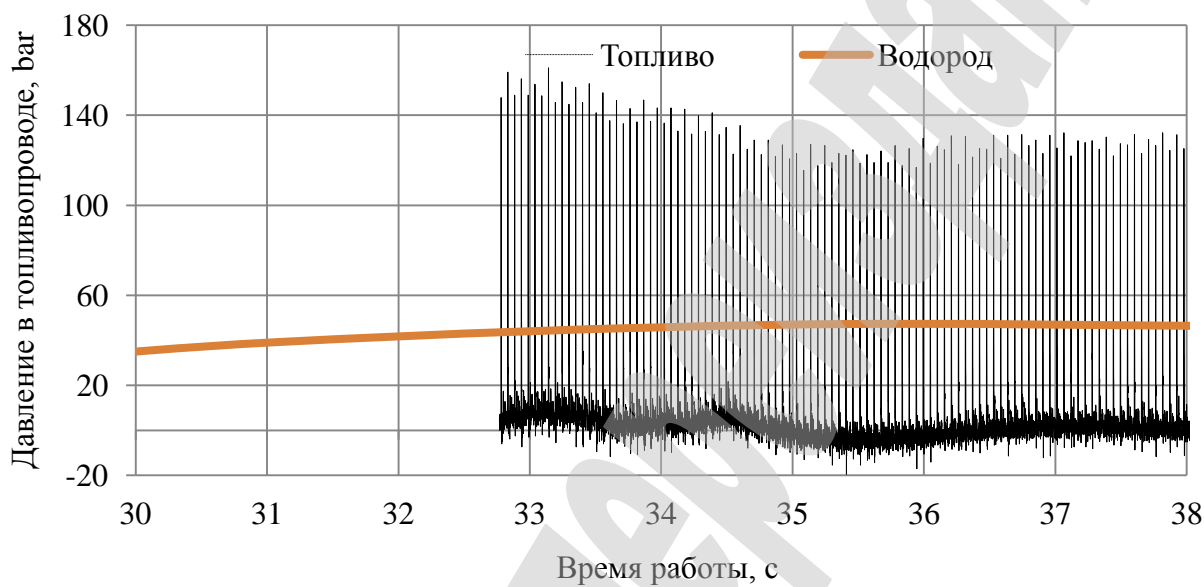


Рис. 6. Экспериментальная диаграмма впрыска топлива при добавке водорода

В результате обработки полученных экспериментальных данных установлены зависимости подачи малой добавки водорода (по массе) от давления подачи и от частоты вращения коленчатого вала (рис. 7). При этом давление водорода изменялось в пределах 2...10 МПа, а частота вращения в диапазоне 60–100 % от номинальной ($n_{ном}=1150$ мин.⁻¹).

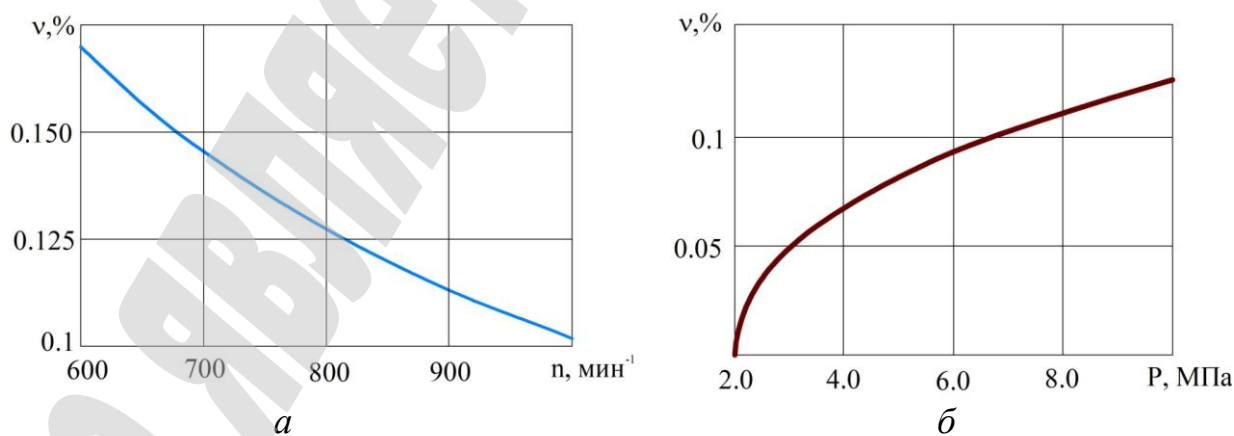


Рис. 7. Зависимость цикловой подачи добавки водорода от:

- а* — частоты вращения коленчатого вала (при давлении водорода 7 МПа);
- б* — давления подачи водорода (при частоте вращения коленчатого вала 1000 мин.⁻¹)

Анализируя полученные результаты, можно сделать вывод, что целесообразным давлением подачи добавки водорода во всем диапазоне допустимой частоты вращения коленчатого вала дизеля является 5–8 МПа. Такие границы обусловлены в первую очередь оптимальной концентрацией водорода и пределами его растворимости [7], а также вопросами его безопасного хранения и эксплуатации водорода.

В заключение, следует отметить, что на данный момент остается пока еще не полностью изученной качественная зависимость влияния добавки водорода на параметры экологичности и топливной экономичности ДВС. Это предопределяет задачу последующих экспериментальных исследований на реальном двигателе влияния доли добавки водорода на эффективный расход топлива, характеристики внутрицилиндровых процессов (с получением индикаторной диаграммы ДВС) и концентрации загрязняющих веществ с ОГ.

7. SWOT-анализ результатов исследований

Strengths. Использование малых добавок водорода в топливопровод высокого давления приводит к увеличению мощности двигателя на 3...7 % в зависимости от количества добавки и нагрузки двигателя. При этом составляющая сгорания водорода в тепловом балансе составляет 1...3 %, затраты на водород в данном случае не превышают 2 % от стоимости топлива.

Применение малых добавок водорода в количестве 0,1 % от цикловой дозы топлива приводит к уменьшению удельного расхода топлива на 2,3...3,7 % в зависимости от режима работы двигателя.

В сравнении с существующими способами добавки водорода в дизельные ДВС данный способ способствует сохранению коэффициента избытка воздуха, имеет минимальные расходы водорода (0,1 % по сравнению с 5...10 % в случае с подачей во впускной тракт). Регулирование порции водорода осуществляется наладками топливной аппаратуры и не требует дополнительного оборудования.

Weaknesses. Определенные сложности вызывает организация процесса топливоподачи в ДВС в случае использования малых добавок водорода. Так, в случае избыточного давления водорода присутствует угроза возникновения газовых пробок на линии высокого давления. Это чревато нарушением стабильной работы двигателя, пропусками вспышек, ухудшением экологических характеристик и надежности двигателя.

Opportunities. Дальнейшее развитие данного способа требует разработки математической модели растворимости водорода при таком способе его добавки. Применение данного способа добавки водорода смоделировано для судна типа танкер «SVL LIBERTY» (спущенного на воду верфью SMG «Херсонская верфь», Украина) дедвейтом 6970 тонн. Так при среднем переходе в 1800 миль экономия на топливе составит до 850 у. е. за рейс, с учетом затрат на водород.

Threats. Среди затрат для внедрения данной технологии необходимо рассматривать оборудование суднометаллогидридными аккумуляторами водорода, электролизером и системой питания водородом. Второй сложностью является оборудование судна дополнительными мерами безопасности для использования взрывоопасных газов. Среди аналогов данного способа необходимо выделить

применение двухтопливных форсунок [7], однако в данном случае значительно усложняется конструкция топливной системы и снижается её надежность.

8. Выводы

1. Разработана физическая модель волновых колебаний в топливной аппаратуре дизеля, которая обосновывает целесообразность и возможность использования малых добавок водорода в топливо на линии падения давления. Особенностью данной модели является возможность учесть временные интервалы раздела фаз впрыска, разделенные на отрезки, соответствующие возникающим колебаниям в трубопроводе. При дальнейшем моделировании процесса абсорбции водорода участки раздела фаз впрыска учитываются для уточнения модели растворения.

2. Создан экспериментальный стенд, включающий компьютерную систему сбора, регистрации и обработки данных измерений. Это позволяет проводить исследования процессов в топливной магистрали ДВС высокого давления с добавлением водорода.

3. Получены зависимости массовой доли подачи водорода к основному топливу от давления подачи добавки и частоты вращения коленчатого вала двигателя. Установлено, что помимо давления подачи водорода, нагрузочный и скоростной режим работы дизеля оказывают одинаковое качественное влияние на процесс насыщения дизельного топлива водородом. При этом целесообразным является давление подачи водорода в пределах 5–8 МПа.

Определено, что добавка водорода в размере $v=0,1\%$, при серийном затяге пружины иглы форсунки $P_{зн}=17,6$ МПа, вызывает уменьшение максимального давления впрыска $P_{впр}$ на 2...3 МПа за счет изменения физико-химических свойств топлива.

Литература

1. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Поліпшення робочих характеристик дизельних двигунів за допомогою додавання водню // Водний транспорт. 2016. № 2 (25). С. 24–28.
2. Szwaja S., Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. Vol. 34, Issue 10. P. 4413–4421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>
3. Шкаликова В. П., Патрахальцев Н. Н. Применение нетрадиционных топлив в дизелях: монография. Москва: РУДН, 1993. 2-е изд., доп. 64 с.
4. Утилизация теплоты вторичных энергоресурсов судовых малооборотных двигателей, работающих на альтернативном топливе / Ткач М. Р. и т. д. // Двигатели внутреннего сгорания. 2017. № 2. С. 8–13.
5. Тимошевський Б. Г., Ткач М. Р., Шалапко Д. О. Основні положення математичної моделі додавання водню на лінії високого тиску паливної апаратури // Вісник Херсонського національного технічного університету. 2017. № 1, Т. 3 (62). С. 233–237.
6. Патрахальцев Н. Н. Аппаратура для газодизельного процесса // Автомобильная промышленность. 2002. № 4. С. 22–23.

7. Матиевский Д. Д., Вагнер В. А. Осуществление присадки водорода к топливу и ее влияние на показатели работы дизеля // Двигателестроение. 1985. № 2. С. 53–56.
8. Wu H.-W., Wu Z.-Y. Investigation on combustion characteristics and emissions of diesel/hydrogen mixtures by using energy-share method in a diesel engine // Applied Thermal Engineering. 2012. Vol. 42. P. 154–162. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.004>
9. A numerical study on a hydrogen assisted diesel engine / An H. et. al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2013. Vol. 38, Issue 6. P. 2919–2928. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.12.062>
10. Effects of H₂ addition on combustion and exhaust emissions in a diesel engine / Yang Z. et. al. // Fuel. 2015. Vol. 139. P. 190–197. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.08.057>
11. An experimental study on combustion, performance and emission analysis of a single cylinder, 4-stroke DI-diesel engine using hydrogen in dual fuel mode of operation / Deb M. et. al. // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. Vol. 40, Issue 27. P. 8586–8598. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.125>
12. Mobasher R., Seddiq M., Peng Z. Separate and combined effects of hydrogen and nitrogen additions on diesel engine combustion // International Journal of Hydrogen Energy. 2018. Vol. 43, Issue 3. P. 1875–1893. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.070>
13. Певнев Н. Г., Понамарчук В. В. Влияние водородосодержащей добавки к основному моторному топливу на индикаторные параметры и эффективные показатели автомобильного двигателя // Вестник СибАДИ. 2017. Вып. 4-5 (56-57). С. 42–47.
14. Павлов Д. А., Пионтковская С. А., Смоленский В. В. Особенности применения водорода в ДВС при различных способах формирования топливовоздушных смесей // Известия Самарского научного центра РАН. 2016. № 18, Т. 4. С. 924–930.
15. Szwaja S., Grab-Rogalinski K. Hydrogen combustion in a compression ignition diesel engine // International Journal of Hydrogen Energy. 2009. Vol. 34, Issue 10. P. 4413–4421. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.03.020>