

ТЕХНОЛОГИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА СГОРАНИЯ ТЯЖЕЛОГО ТОПЛИВА В ДИЗЕЛЯХ

*Г.С. Юр, д.т.н., профессор, зав.кафедрой судовых двигателей внутреннего сгорания
ФБОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»*

Предложена и исследована новая технология интенсификации процесса сгорания тяжелых топлив с использованием процесса кавитации.

Экспериментально подтверждена возможность разрушения частицы кокса, находящейся в капле мазута и газификация распыленного тяжелого топлива посредством кавитации. В составе полученной газовой смеси обнаружен этилен, который является промотором процесса горения.

Приведены результаты стендовых испытаний дизеля с новой камерой сгорания.

В соответствии с новой редакцией Технического кодекса по NO_x и правил Приложения VI МАРПОЛ 73/78 удельные средневзвешенные выбросы NO_x с отработавшими газами судовых дизелей за период с 2011 по 2016 г. должны быть сокращены на 80 % [1]. В то же время выбросы частиц судовыми дизелями пока законодательно не регламентируются. Обычно не допускается наличие видимого дыма [2].

Такую неопределенность в отношении нормирования выбросов частиц, по-видимому, можно объяснить отсутствием эффективных технологий, обеспечивающих качественное сгорание тяжелых топлив и ростом затрат судовладельцев при переходе на более качественные и соответственно более дорогие сорта дизельного топлива.

Известно, что работа дизелей на тяжелых сортах топлива сопровождается ухудшением их экологических, энергетических и ресурсных характеристик. Это обусловлено неполнотой сгорания топлива и несвоевременностью подвода теплоты к рабочему телу [3]. Влияние этих негативных факторов усиливается с повышением частоты вращения коленчатого вала. Поэтому тяжелое топливо используют, как правило, в мало- и среднеоборотных судовых дизелях, а в высокооборотных только дистиллятное дизельное [2].

Процессы образования и выгорания сажевых частиц при горении дистиллятных и тяжелых топлив имеют существенные различия.

При горении распыленного дистиллятного топлива происходят процессы испарения и газификации углеводородных фракций с образованием ацетилена, из которого в дальнейшем образуются первичные кристаллы углерода, а затем и частицы сажи. Количество частиц сажи, содержащихся в отработавших газах, является результатом двух разнонаправленных процессов. Это скорость образования и роста конгломератов сажи и скорость их выгорания [4, 5].

При горении капля тяжелого топлива преобладающим является процесс полимеризации содержащихся в нем высокомолекулярных углеводородных соединений. В результате образуется частица кокса (ценосфера), размер которой может составлять 25 % и более от первоначального размера капли [6]. Известно, что время горения коксовой частицы на порядок больше времени горения капли топлива того же размера, а температура горения превышает 2000 °С. Появление и выгорание коксовых частиц является одной из причин увеличения концентрации оксидов азота, дымности и температуры отработавших газов при работе дизеля на тяжелом топливе в сравнении с работой на дизельном топливе.

Целью разработки технологии эффективного сгорания тяжелого топлива является разрушение высокомолекулярных соединений и частиц кокса, находящихся внутри капли тяжелого топлива при помощи процесса кавитации. При возбуждении к камере сгорания пульсаций давления, в полупериоде разряжения, в капле топлива возможно образование и рост парогазовых пузырьков, которые впоследствии, в полупериоде повышения давления, схлопываются. Характерная особенность процесса кавитации — получение высоких локальных плотностей энергии при незначительных затратах на возникновение процесса. Гидродинамические, тепловые, электрические, кумулятивные и другие явления, сопровождающие кавитацию, обладают большой разрушительной энергией и смогут предотвратить образование частиц кокса. Кавитация может возникнуть из-за различных примесей и мелкодисперсных воздушных и парогазовых пузырьков размером

0,05–0,1 мм, которые содержатся в углеводородном топливе [7].

Численные исследования динамики роста газового пузырька в капле топлива, которая находится в осциллирующей газовой среде, показали, что пузырек может схлопнуться только в том случае, если амплитуда пульсаций давления газовой среды превысит пороговое значение кавитационной прочности жидкости. При уменьшении амплитуды пульсаций схлопывание пузырька не произойдет, и процесс кавитации не осуществится. Кавитационная прочность жидкости зависит от размеров капли топлива и газового пузырька, от физических и химических свойств топлива, от давления и температуры газовой среды.

На специальной экспериментальной установке были проверены результаты численного исследования и подтвержден ожидаемый эффект разрушения коксовой частицы (ценосферы) при возникновении процесса кавитации.

Из отсева сажи, собранной в выпускном коллекторе дизеля, работавшего на тяжелом топливе, были изготовлены частицы диаметром 1,2–1,3 мм. В качестве связующего вещества использовали мазут. Затем эти частицы подвешивали на тонкую вольфрамовую нить (8 мкм) и помещали в электрическую печь, где прокаливали в течение нескольких часов при температуре 800–900 °С. В результате спекания были получены сухие пористые шарики (аналог ценосферы), прочно закрепленные на проволоке.

Затем при помощи электромагнита эти частицы подавали в пламя газовой горелки. Пульсации давления газовой среды возбуждались электродинамическим излучателем. Процесс горения частицы фиксировали на цифровую видеокамеру.

В связи с тем что по определению процесс кавитации возможен только в жидкости, были исследованы процессы горения частиц в трех различных вариантах: сухая, влажная частица и частица, находящаяся в капле мазута.

Опыты показали, что при помещении сухой и влажной частицы в осциллирующее пламя различной амплитуды и частоты разрушение частиц не происходило. Одновременно с этим отмечено, что с ростом амплитуды пульсаций наблюдалось сокращение времени горения коксовых частиц. Это явление объясняется интенсификацией обдува неподвижной частицы осциллирующей газовой средой.

Если частица помещалась в жидкость (в каплю мазута), то при включении источника пульсаций на полную мощность происходило ее разрушение. При снижении амплитуды пульсаций ниже расчетных значений порога кавитационной

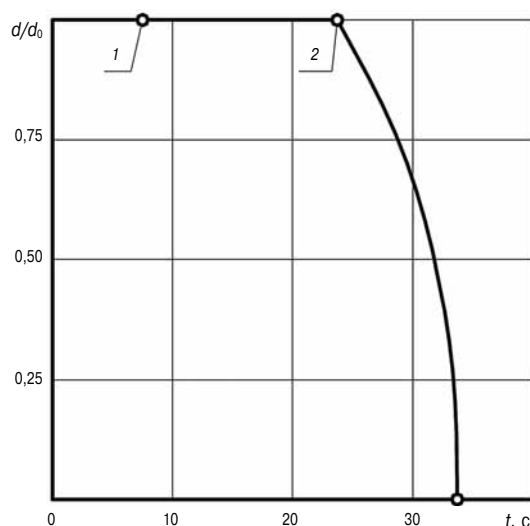


Рис. 1. Динамика процесса горения сухой частицы, помещенной в осциллирующее пламя:

d, d_0 — текущий и начальный диаметры частицы; t — время; 1 — окончание процесса нагрева сухой частицы до температуры пламени горелки; 2 — начало процесса разрушения сухой твердой частицы

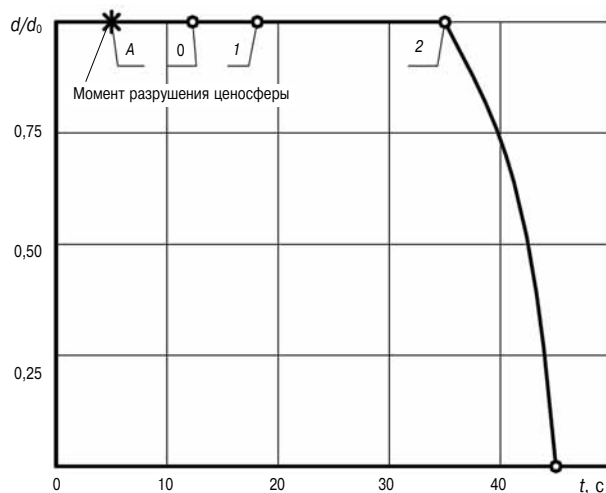


Рис. 2. Динамика процесса горения смоченной мазутом частицы и частицы, помещенной в каплю топлива:

d, d_0 — текущий и начальный диаметры частицы; t — время; 0 — окончание процесса горения паров топлива; 1 — окончание процесса нагрева сухой частицы до температуры пламени горелки; 2 — начало процесса разрушения сухой твердой частицы; * — момент разрушения твердой частицы (ценосферы), находящейся в капле мазута

прочности разрушение частицы не наблюдалось, и процесс горения проходил аналогично процессу диффузионного горения влажной частицы.

На рис. 1 и 2 приведены графики изменения размера частицы с различной степенью насыщения мазутом при интенсивности пульсаций давления превышающих порог кавитационной прочности топлива.

Таким образом, была экспериментально подтверждена возможность осуществления про-

цесса кавитации в капле тяжелого топлива и процесса разрушения частицы (ценосферы) за счет возникновения процесса кавитации.

Экспериментальные исследования, проведенные в Институте катализа СО РАН, показали, что при впрыскивании мазута в нагретую осциллирующую среду при помощи дизельной форсунки, под действием кавитации происходят процессы крекинга и газификации тяжелого топлива. С помощью хроматографического анализа полученной газовой смеси определили наличие в ней газа этилена (24 %масс.), который относится к классу непредельных углеводородов [8]. Известно, что этилен является промотором, инициирующим процесс горения, и используется в качестве добавки к топливу в прямоточных воздушно-реактивных двигателях [9].

Патентом РФ № 2044901 пульсации давления газовой среды в камере сгорания дизеля предлагается возбуждать при помощи ударной волны. Для этого необходимо за период задержки воспламенения топлива впрыскивать до 60–70 % от полного объема цикловой подачи [10]. К очевидным и неустраняемым недостаткам этого способа возбуждения пульсаций относятся высокие значения максимального давления сгорания, скорости нарастания давления по углу поворота коленчатого вала, а также увеличение концентрации оксидов азота в отработавших газах.

В предлагаемой новой технологии процесс возбуждения пульсации давления происходит при помощи специального источника [11]. Вклю-

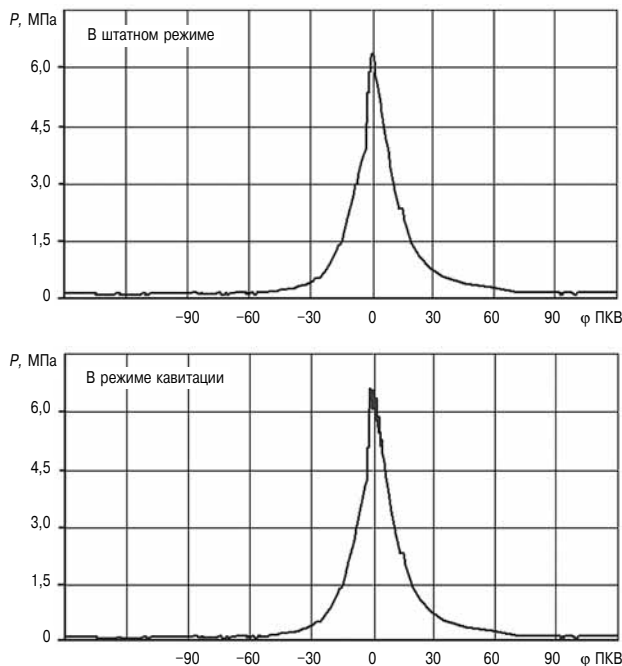


Рис. 3. Индикаторные диаграммы отсека дизеля Ч15/18 с опытной камерой сгорания

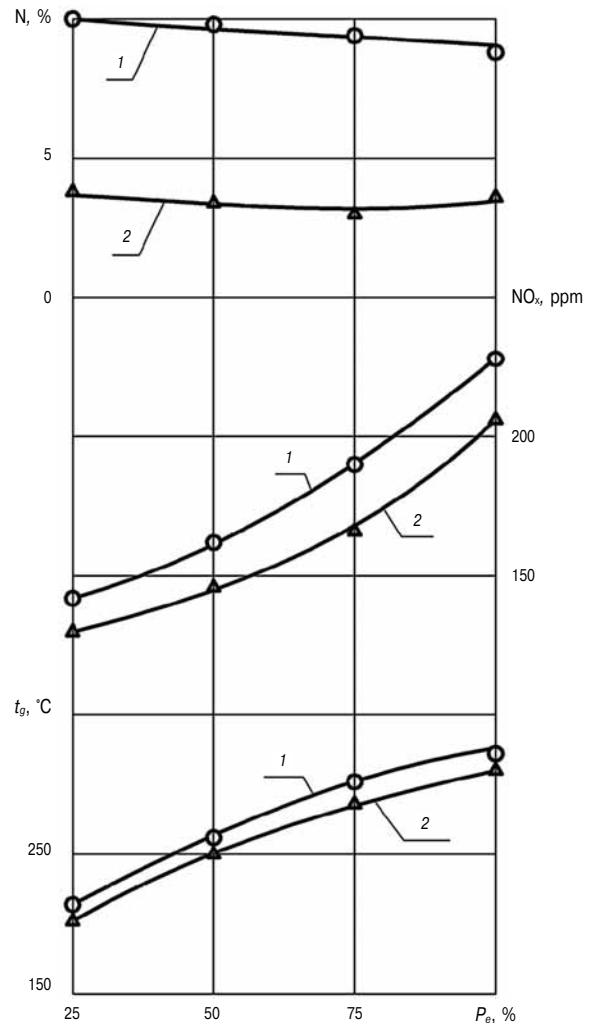


Рис. 4. Нагрузочные характеристики дизеля Ч15/18 при частоте вращения коленчатого вала 1200 об/мин: N — дымность отработавших газов по шкале Hartridge, %; NO_x — концентрация оксидов азота, ppm; t_g — температура отработавших газов, °C; 1 — штатный режим; 2 — режим внутрикапельной кавитации

чение источника осуществляется в заданный момент времени на линии расширения и поэтому увеличение максимального давления сгорания и скорости нарастания давления по углу поворота коленчатого вала (в сравнении со штатным режимом) не наблюдается [12].

На рис. 3 и 4 приведены результаты стендовых испытаний дизеля с камерой сгорания третьего поколения, изготовленной на основе штатной камеры сгорания типа Гессельман. Сравнительные испытания проводились на котельном мазуте плотностью 960 кг/м³ с коксовым числом 12,1.

Результаты испытаний показали, что дымность отработавших газов дизеля уменьшилась почти в два раза при одновременном сокращении концентрации оксидов азота на 15–20 % и снижении температуры отработавших газов на 5–7 градусов (см. рис. 4). Максимальное давление сгорания и скорость нарастания давления по углу поворота

коленчатого вала (см. рис. 3) не увеличились. Удельный эффективный расход топлива при этом не изменился. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что энергия, затраченная на осуществление процесса внутрикапельной кавитации, компенсировалась сокращением потерь от несвоевременности и неполноты сгорания тяжелого топлива без кавитации.

Выводы

В ходе проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

➤ методами численного моделирования подтверждена возможность осуществления процесса кавитации внутри капель распыленного топлива в условиях камеры сгорания дизеля. Для этого необходимо преодолеть порог кавитационной прочности тяжелого топлива;

➤ на опытной установке осуществлен процесс разрушения частицы кокса, находящейся в капле мазута, за счет возбуждения кавитации;

➤ на экспериментальной установке при впрыске дизельного топлива в осциллирующую нагретую газовую среду осуществлен процесс газификации распыленного дизельной форсункой тяжелого топлива за счет кавитации. Хроматографический анализ полученной газовой смеси показал наличие в ней этилена (24 %масс.), который является промотором, инициирующим процесс горения;

➤ спроектированы, изготовлены и испытаны различные конструкции камер сгорания дизелей, в которых при впрыске топлива возбуждается процесс кавитации. Стендовые испытания подтвердили эффективность новых камер сгорания для улучшения экологических характеристик дизелей, работающих на тяжелом топливе;

➤ использование предлагаемой технологии интенсификации процесса горения тяжелых топлив дает возможность их использовать в быстроходных дизелях.

Литература

1. Новиков Л.А. Ограничение выбросов NO_x на уровне IMO Tier-3 для судовых дизелей отложено до 2021 года / Л.А. Новиков // Двигателестроение. — 2013. — № 2 (252). — С. 26–32.

2. Мельник Г.В. Тенденции развития двигателестроения за рубежом. По материалам конгресса СИМАК 2010 / Г.В. Мельник // Двигателестроение. — 2012. — № 2 (248). — С. 39–53.

3. Матиевский Д.Д. Участие сажи в рабочем цикле дизеля и индикаторный КПД / Д.Д. Матиевский, В.И. Дудкин, С.А. Батулин // Двигателестроение. — 1983. — № 3. — С. 54–56.

4. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. — М.: Машиностроение, 1981. — 160 с.

5. Андриященко С.П. Экспериментальное подтверждение гипотезы о механизме образования частиц сажи в камере сгорания дизеля через ацетилен / С.П. Андриященко, В.В. Попков, С.В. Титов, Г.С. Юр // Научн. пробл. трансп. Сиб. и Дал. Вост. — 2010. — № 2. — С. 267–269.

6. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен / Д.Б. Сполдинг. — М.: Машиностроение, 1985. — 236 с.

7. Гуреев А.А. Квалификационные методы испытаний нефтяных топлив / А.А. Гуреев, Е.П. Серегин, В.С. Азеев. — М.: Химия, 1984. — 198 с.

8. Получение низших олефинов низкотемпературным пиролизом углеводородного сырья / С.В. Каптерев, Г.С.

Юр, Л.П. Пословина, В.Г. Степанов, К.Г. Ионэ // Химия нефти и газа: Материалы IV международной конференции. В 2-х т. — Томск: СГТУ, 2000. — С. 294–297.

9. Третьяков П.К. Организация пульсирующего режима горения в высокоскоростных ПВРД / П.К. Третьяков // Физика горения и взрыва. — 2012. — Т. 48, № 6. — С. 21–27.

10. Патент 2044901 Российская Федерация. МПК F02B51/06. Способ интенсификации сгорания топлива в двигателе с воспламенением от сжатия при непосредственном смесеобразовании. Бургсдорф Э.И., Назаров О.А., Решетов В.И. Патентообладатель: Производственное объединение «Барнаульский завод транспортного машиностроения». (RU) 5039517/06. Заявл.20.04.1992; опубл. 27.09.1995.

11. Юр Г.С. Волновые процессы в судовых дизельных энергетических установках / Г.С. Юр // — Новосибирск, 1999. — 109 с.

12. Юр Г.С. Процесс акустической паровой внутрикапельной кавитации и результаты его использования в судовых дизельных энергетических установках / Г.С. Юр // Актуальные проблемы создания и эксплуатации тепловых двигателей в условиях Дальневосточного региона России: материалы Международной научно-технической конференции «Двигатели 2013» // Хабаровск, 16–20 сентября 2013 г. / Под ред. В.А. Лашко. — Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. — С. 162–166.