

УДК 621.43.068

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ САЖИ В СУДОВЫХ ДИЗЕЛЯХ

В.И. Одинцов, Э.В. Сапожников, Д.Ю. Глазков

ФГБОУ ВПО «Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота»,
Россия, 236029, г. Калининград, ул. Молодежная, 6,
E-mail: seu@bga.gazinter.net

Важнейшей проблемой современности, от решения которой зависит будущее нашей планеты, является экологическая. Решение её ищут в снижении уровня токсичности отработавших газов (ОГ) дизелей, в том числе и судовых.

Одним из компонентов, выделяющихся в атмосферу с отработавшими газами дизелей, является сажа, расчет эмиссии которой - часть решения проблемы, направленной на повышение экологической безопасности судовых дизелей.

В настоящее время отсутствуют универсальные модели, в явном виде учитывающие влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на процесс образования сажи, поэтому в лаборатории дизелей кафедрой судовых энергетических установок (СЭУ) ФГБОУ ВПО «БГАРФ» были проведены экспериментальные исследования на дизелях 6ЧН18/22 (с объемно-пленочным смесеобразованием) и D2866 LXE фирмы «MAN», установленных на учебно-парусном судне (УПС) «Крузенштерн».

судовой дизель, токсичные вещества, образование сажи

ВВЕДЕНИЕ

Тепловые процессы в судовых дизелях, основанные на сгорании углеводородных топлив, в настоящее время нашли широкое применение в стационарных и транспортных энергетических установках, поэтому международным сообществом придается большое значение вопросу ограничения загрязнения атмосферы.

При сгорании топлива, наряду с безвредными, образуются экологически вредные компоненты: окись углерода, окислы азота, углеводородные соединения, сажа.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ

Исследования процесса распыливания топлива форсунками судовых дизелей, например [1], показывают, что содержание воздуха в струе топлива незначительно. Максимальное воздушно-топливное отношение в ней составляет 18-25 % от теоретически необходимого. На участках струи, располагающихся ближе к сопловым отверстиям форсунки, количество воздуха еще меньше. В результате взаимодействия топлива с воздухом возникает температурная неоднородность в струе: наибольшая температура отмечена на поверхности струи, наименьшая – на ее оси [2].

Следовательно, самые благоприятные условия для возникновения первичных очагов воспламенения топлива складываются в поверхностном слое

топливной струи, от которой отделяются и затормаживаются наиболее мелкие капли [3]. Эксперименты, проведенные в Центральном научно-исследовательском дизельном институте [4], показали, что топливо воспламеняется в нескольких точках на поверхности каждой струи, в начальной, приближенной к сопловому отверстию части. От первичных очагов пламя распространяется по наружной поверхности топливных струй и в течение короткого интервала времени (около $0,6 \cdot 10^{-3}$ с) охватывает всю их поверхность, «включая головную часть». Такие же результаты по месту и моменту возникновения первичных очагов пламени были получены в [5].

Следовательно, поверхность струи является границей, через которую пары топлива подводятся к воздуху, происходит их перемешивание и сгорание. Внутри топливных струй (с большим недостатком кислорода) создаются условия для образования сажи.

В качестве показателей, характеризующих совершенство процессов распыливания и смесеобразования, в работе [6] предложены

$$K_{pi} = F_{\phi i} / g_{ci} ; \quad (1)$$

$$K_{p\Sigma} = F_{\phi\Sigma} / g_{ц} , \quad (2)$$

где $F_{\phi i}$ - среднее значение площади струй топлива на i -м расчетном интервале, m^2 ; g_{ci} - среднее количество топлива, содержащееся в струях топлива на i -м расчетном интервале, кг; $F_{\phi\Sigma}$ - площадь поверхности струй топлива в конце процесса впрыскивания, m^2 ; $g_{ц}$ - цикловая подача топлива, кг.

Для ДВС с пленочным и объемно-пленочным смесеобразованием относительная суммарная поверхность топлива, находящегося на поверхности камеры сгорания и в топливных струях, с учетом неравномерности топливоподачи:

$$K_{npi} = \sum_{J=1}^n \sum_{i=1}^N (F_{n\phi Ji} / g_{ncJi} + \Delta F_{kcJi} / g_{kcJi}) ; \quad (3)$$

$$K_{np\Sigma} = \sum_{J=1}^n (F_{n\phi J} / g_{ncJ} + \Delta F_{kcJ} / g_{kcJ}) , \quad (4)$$

где $F_{n\phi Ji}$ и $F_{n\phi J}$ - площадь поверхности топливной струи из J -го соплового отверстия соответственно в i -й момент процесса топливоподачи и в конце его, m^2 ; g_{ncJi} и g_{ncJ} - количество топлива в струе из J -го соплового отверстия в i -й момент процесса топливоподачи и в его конце, кг; F_{kcJi} и F_{kcJ} - площадь поверхности камеры сгорания, покрытая пленкой в i -й момент процесса топливоподачи и в конце его, в зоне J -го соплового отверстия, m^2 ; g_{kcJi} и g_{kcJ} -

количество топлива, находящегося в топливной пленке, в i -й момент процесса топливоподачи и в конце его, в зоне J -го соплового отверстия, кг.

В качестве одного из показателей процесса смесеобразования предложен:

$$K_{см} = 1 / \tau_{впр}, \quad (5)$$

где $\tau_{впр}$ - время, в течение которого осуществляется процесс топливоподачи.

Чем выше значения K_p и $K_{см}$, тем лучше протекают процессы смесеобразования и сгорания и, следовательно, меньше образуется сажи.

Образование сажи представляет собой объемный процесс термического разложения (пиролиза) углеводородов в газовой фазе в условиях сильного недостатка (отсутствия) кислорода. Схема реакции пиролиза углеводородов может быть выражена следующим образом:



Она не описывает действительного механизма, приводящего к образованию твердого углерода, включающего гидрогенизацию, дегидрогенизацию, крекинг, полимеризацию, конденсацию. Скорость образования сажи определяется скоростью химических процессов.

Экспериментальными исследованиями [7-9] установлены концентрации окислителя, при которых начинается выделение сажи из пламени, соответствующее коэффициентам избытка воздуха при сгорании 0,33-0,7 [10]. С увеличением температуры начало образования сажи сдвигается в сторону более богатых топливовоздушных смесей, с возрастанием давления — в сторону более бедных смесей [11]. Образование сажи зависит и от физико-химических свойств топлива. Чем выше молекулярный вес предельных и непредельных углеводородов с прямыми цепями, тем выше скорость образования сажевых частиц.

Одновременно с образованием сажевых частиц происходит также их выгорание в реакциях с радикалами ОН и кислородом. Скорость выгорания сажи существенно зависит от размеров частиц (поверхности). Определено, что имевшаяся в пламени сажа может выгореть только в том случае, если размеры частиц не будут превышать 100 \AA .

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

В настоящее время отсутствуют универсальные модели, в явном виде (без необходимости экспериментального определения коэффициентов применительно к конкретному дизелю) учитывающие влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на процесс образования сажи. Поэтому в лаборатории дизелей кафедрой СЭУ ФГБОУ ВПО «БГАРФ» были проведены исследования на двигателе 6ЧН18/22 (с объемно-пленочным смесеобразованием) и на дизеле D2866 LXE фирмы «MAN», установленных на УПС «Крузенштерн». Результаты экспериментов на дизеле 6ЧН18/22 представлены на рис. 1, где ось ординат соответствует натуральному логарифму от величины затемнения светового потока.

Как видно из представленных данных, характеристика изменения показателя дымности отработавших газов может быть аппроксимирована уравнением:

$$\ln C = -5 \cdot 10^{-6} P_e^3 + 0,0009 P_e^2 - 0,0245 P_e + 2,5814, \quad (7)$$

где C – показатель ослабления светового потока в процентах;
 P_e – эффективная мощность, развиваемая дизелем, кВт.

Аппроксимация проводилась в программе MS Excel по методу наименьших квадратов с достоверностью $R^2 = 0,957$.

При обработке опытных данных относительно эффективной мощности не учитываются влияние механического КПД и, следовательно, закономерности изменения количества топлива, участвующего в сгорании. Поэтому на рис. 2 представлены итоги обработки относительно индикаторной мощности.

Результаты экспериментов на двигателе D2866 LXE фирмы «MAN» были обработаны применительно к эффективной и индикаторной мощностям, аппроксимированы зависимостями (8) - (10) с достоверностью $R^2=0.998$, $R^2=0.968$ и $R^2=0.981$ соответственно.

$$\ln C = -2 \cdot 10^{-5} P_e^3 + 0,0038 P_e^2 - 0,172 P_e + 1,5401. \quad (8)$$

$$C = -0,00023 P_e^2 + 0,0441 P_e - 1,3937. \quad (9)$$

$$C = 0,0066 P_i^2 - 0,5934 P_i + 11,746. \quad (10)$$

Отрицательные значения $\ln C$ объясняются тем, что на некоторых режимах нагружения, например на режиме 22 кВт, показатель ослабления светового потока C составил 0,5%.

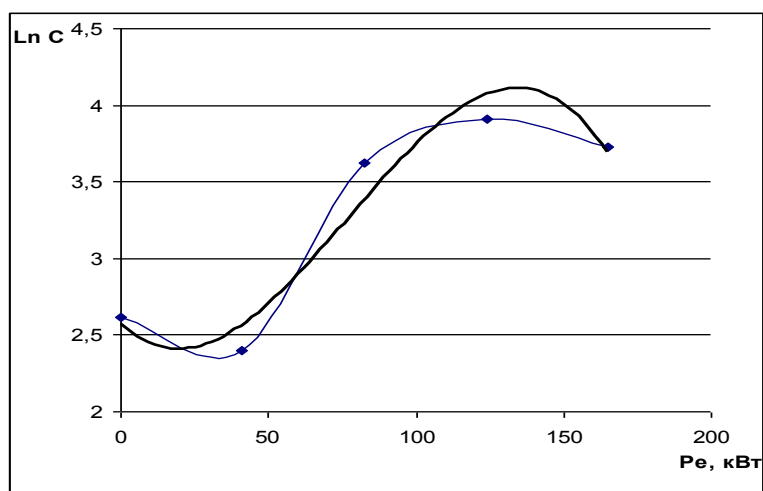


Рис. 1. Изменение показателя ослабления светового потока отработавших газов двигателя 6ЧН18/22 при работе по регуляторной характеристике:

— эксперимент

Fig. 1. Change of the index weakening of the torrent light of exhaust gases of the diesel engines on the mode loading characteristic:

— experiment

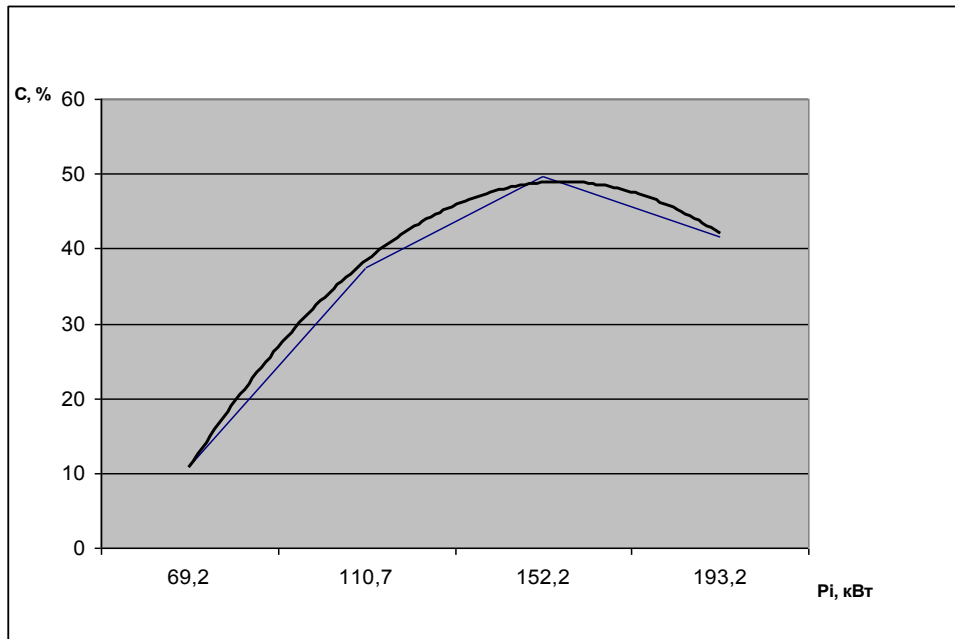


Рис. 2. Изменение характеристики ослабления светового потока ОГ двигателя 6ЧН18/22 в пересчете на индикаторную мощность (по регуляторной характеристике):
— - эксперимент

Fig. 2. Change of the index weakening of the torrent light of exhaust gases of the diesel engines 6ЧН18/22 on the mode loading characteristic:
— experiment

Так как коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива с уменьшением нагрузки дизеля при его работе по регуляторной характеристике увеличивается, то даже одно и то же количество сажи будет содержаться в большей массе воздуха. Поэтому для обеспечения равных условий сравнения результаты экспериментов были скорректированы по формуле

$$C_{x \text{ прив}} = C_x \cdot \alpha_x / \alpha_{\text{ном}} \quad (11)$$

Результаты представлены на рис. 3

Для двигателя 6ЧН18/22 зависимость аппроксимируется уравнением ($R^2 = 0,926$):

$$(C_x/C_n)_{\text{пр}} = -4,63Pe^2 + 5,866Pe - 0,3025; \quad (12)$$

а для двигателя D2866 LXE фирмы «MAN» - уравнением ($R^2 = 0,918$):

$$(C_x/C_n)_{\text{пр}} = 2,6574Pe^2 - 2,0624Pe + 0,4824. \quad (13)$$

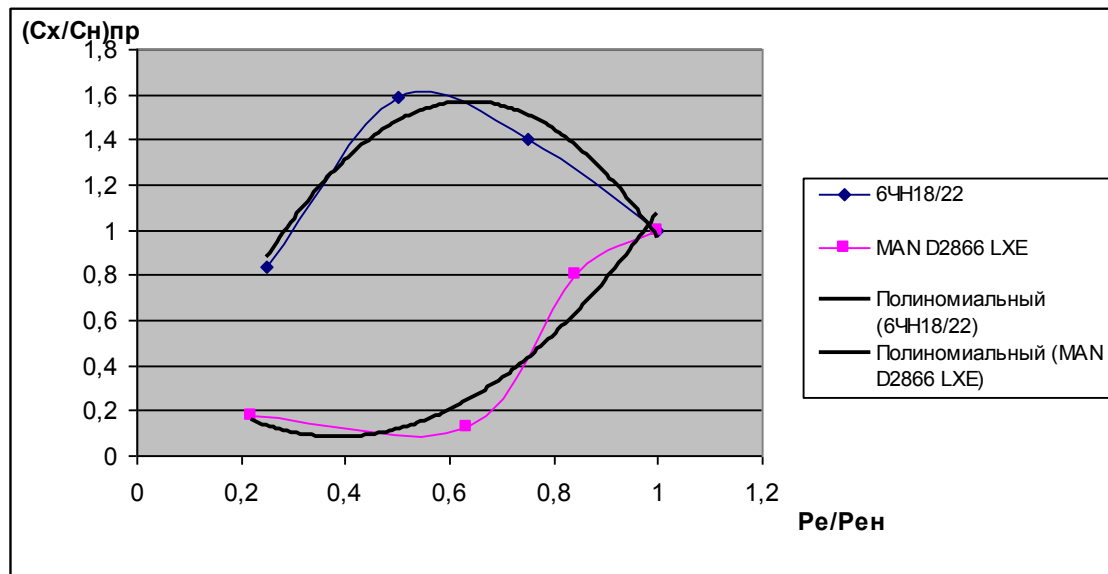


Рис. 3. Относительное изменение характеристики ослабления светового потока ОГ двигателей 6ЧН18/22 и D2866 LXЕ фирмы «MAN» по регуляторной характеристике
 Fig. 3. Relative change of the index weakening of the torrent light of exhaust gases of the diesel engines 6ЧН18/22 and MAN D2866 LXЕ on the mode loading characteristic

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа литературных источников по процессам распыливания, смесеобразования и сгорания топлива установлены условия и микрообъемы топливных струй, в которых происходит образование сажи. Предложены показатели, характеризующие эти условия.

2. В связи с отсутствием универсальных методов расчета, учитывающих в явном виде влияние конструктивных и эксплуатационных факторов (без проведения экспериментов по уточнению коэффициентов применительно к каждому исследуемому типоразмеру дизеля), были проведены исследования изменения концентрации сажи при работе дизелей по регуляторной характеристике. Их результаты обработаны в программе MS Excel и получены соответствующие уравнения.

3. Отличие в характеристиках показателей ослабления светового потока объясняется особенностями процессов смесеобразования: объёмно-плёночного в 6 ЧН18/22 и струйного в D2866LXE фирмы «MAN».

4. Для получения зависимостей, в явном виде отражающих влияние конструктивных особенностей камер сгорания и способов смесеобразования, необходимо провести дальнейшее теоретическое исследование на базе уравнений (1) – (5).

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лышевский, А.С. Распыливание топлива в судовых ДВС / А.С. Лышевский.- Л.: Судостроение, 1971.- 248 с.

2. Некоторые результаты исследования температурных полей факела распыленного топлива в объеме и при его взаимодействии со стенкой / Б.Н. Семенов [и др.] // Труды ЦНИДИ. - Л., 1975. - Вып.68. - С. 27-35.
3. Свиридов, Ю.Б. Смесеобразование и сгорание в дизелях / Ю.Б. Свиридов. - Л.: Машиностроение, 1972. – 224 с.
4. Завлин, М.Я. К вопросу о связи динамики выделения тепла с развитием сгорания во времени и пространстве камеры / М.Я. Завлин // Труды ЦНИДИ. - Л., 1975. - Вып. 67. - С. 48-52.
5. Разлейцев, Н.Ф. Особенности смесеобразования и сгорания в тепловых дизелях типа Д-70 / Н.Ф. Разлейцев // Двигатели внутреннего сгорания. - Харьков, 1974. - Вып. 20. – С. 32-40.
6. Одинцов, В.И. Повышение топливной экономичности судовых ДВС: дисс. ... докт. техн. наук: 050805 - Повышение топливной экономичности судовых ДВС / Санкт-Петербургский университет водных коммуникаций; В.И. Одинцов. – СПб., 1993. – 329 с.
7. Звонов, В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания / В.А. Звонов. - М.: Машиностроение, 1981.- 159 с.
8. Варшавский, И.Л. Токсичность дизельной сажи и измерение сажесодержания дизельного выхлопа / И.Л. Варшавский, В.Ф. Мачульский // Труды ЛАНЭ. - М.: Знание, 1969. - С. 120 - 157.
9. Теснер, П.А. Образование углерода из углеводородов газовой фазы / П.А. Теснер. - М.: Химия, 1972. - 136 с.
10. Смайлис, В.И. Малотоксичные дизели / В.И. Смайлис. - Л.: Машиностроение, 1972. - 128 с.
11. Воинов, А.Н. Сгорание в быстроходных поршневых двигателях / А.Н. Воинов. - М.: Машиностроение, 1977. - 277с.

EXPERIMENTAL RESEARCH THE PROCESS FORMING OF THE SOOT IN EXHAUST GASES OF THE DIESEL ENGINES ON THE MODE LOADING CHARACTERISTIC

V.I. Odintsov, E.V. Sapozhnikov, D.Yu.Glazkov

Important problem of the present time is the problem of ecological. Decision present problem search in reduction of the influence human factors and decrease toxicity exhaust gases of the diesel engines.

Harmful components finding in atmosphere with the composition of the exhaust gases is the particles of the soot.

Nowadays there is no universal model that takes into account the impact of design and operational factors on the formation of soot. Therefore, there were conducted experimental studies on the engine 6CHN18/22 (with volume-film air-fuel mixing) and on the engine of the company MAN D2866 LXE, installed at UPS "Kruzenshtern" in the diesel laboratory of the Ship Power Plants Department of the BFFSA.

diesel engine, toxic components, the forming of the soot

