

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ ЧАСТОТЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ СУДОВЫХ ТОПЛИВ

Важность обеспечения необходимого качества топлива определяется требованиями Приложения VI Конвенции MARPOL, а также резолюциями Международной морской организации МЕРС.203(62) и МЕРС.213(63) где, в частности, в качестве одного из способов повышения конструктивной энергетической эффективности судна рассматривается совершенствование топливоподготовки.

Одним из методов подготовки топлива, способствующим уменьшению концентрации в нем сернистых составляющих, является ультразвуковая обработка. Обработка топлива ультразвуковыми волнами способствует возникновению в нем кавитационных явлений, что, в свою очередь, разрушает молекулярные связи и приводит к изменению его структуры. При этом основной задачей проведения ультразвуковой кавитационной обработки топлива является определение оптимальных частот ультразвукового сигнала, способствующих максимально возможному для заданных условий эксплуатации и сорта топлива удалению сернистых примесей [1].

Для удаления серы из топлива наиболее оптимальным считается физико-химический метод, который представляет собой ультразвуковую обработку топлива с целью разрыва связи C–S в гетероциклических соединениях с последующим проведением химической реакции для выведения серы из топлива в составе газовой фазы [2].

Возникновение химических реакций в поле ультразвуковых волн тесно связано с явлением кавитации. Образование кавитации зависит от вязкости, т.к. при ее увеличении возрастает прочность жидкости. Чем больше вязкость жидкости, тем больше интенсивность ультразвуковых волн, которая обуславливает появление кавитационных пузырьков. Величина переменного акустического давления, необходимого для возбуждения кавитаций на одной и той же частоте, будет зависеть от вязкости топлива [3]. Химические процессы в топливе возникают при такой интенсивности ультразвуковых волн, при которой неизбежным становится образование кавитационных полостей. Имеется определенный порог интенсивности ультразвуковых волн, ниже которого химические процессы не наступают. Химические процессы,

протекающие в поле ультразвуковых волн, весьма разнообразны. К ним относится процесс распада органических веществ, которые необходимы для дальнейшего извлечения серы из топлива.

Для судового моторного топлива, характеризующегося повышенной вязкостью, подбор оптимальных условий ультразвуковой обработки имеет первостепенное значение. В качестве критерия выбора оптимальной частоты ультразвуковой кавитационной обработки топлива может быть принято условие снижения содержания серы в топливе, а также содержание серосодержащих компонентов в газах, выделяемых топливом после его обработки [4, 5].

При проведении исследований в качестве постулатов принимались следующие утверждения:

ультразвуковая кавитационная обработка топлива способствует снижению содержания сернистых примесей в топливе;

при ультразвуковой кавитационной обработке топлива в связи с термическим разложением серосодержащих соединений происходит выделение сульфида водорода H_2S с открытой поверхности топлива.

Данные утверждения были подтверждены экспериментально следующим образом. Исследуемая порция топлива помещалась в стеклянную емкость и подвергалась ультразвуковой обработке при разной частоте генерируемого звукового излучения. В емкости с топливом находился температурный датчик, позволявший контролировать уровень температуры, что, впоследствии, позволяло определять энергию, поглощенную топливом при ультразвуковой обработке, а также избегать перегрева топлива до температур, близких к температуре самовоспламенения его паров. Непосредственно над емкостью с топливом размещался портативный газоанализатор Dräger X-am 2000 (производства Германии), с помощью которого определялась концентрация сульфида водорода H_2S и оксидов серы SO_x в выделяющихся из топлива газах.

Экспериментальная установка (рис. 1) располагалась в автономном химическом шкафу, при этом на протяжении всего эксперимента циркуляция воздушных потоков в нем не осуществлялась. В пробе топлива, подвергающегося ультразвуковой кавитационной обработке, определялось содержание сернистых примесей. С этой целью анализировались спектры горения топлива. С помощью плазменной спектрофотометрии определялись линейчатые спектры поглощения серы, как одной из составляющей топлива. Зная первоначальное содержание сернистых соединений в топливе, по интенсивности данных спектров возможно определить изменение количества сернистых примесей в топливе после его ультразвуковой обработки.

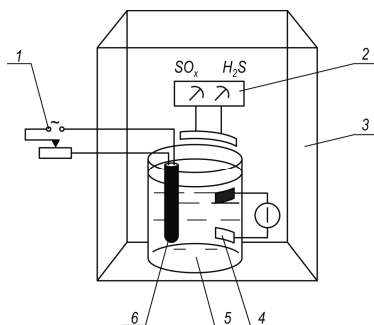


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – ультразвуковой генератор; 2 – газоанализатор; 3 – химический шкаф; 4 – датчик температуры; 5 – стеклянная емкость с топливом; 6 – ультразвуковой излучатель

В качестве ультразвукового генератора использовался модульный генератор многофазного ультразвукового поля УЗГ-5-М с фазовой коррекцией и магнитострикционным излучателем. Генератор состоит из нескольких силовых ячеек УЗГ-5 и общей системы управления. Система позволяет регулировать разность фаз выходного напряжения ячеек, добиваясь требуемого распределения картины ультразвукового поля. При синфазной работе генератор позволяет набрать модульно любую мощность в диапазоне 20...5000 Вт, а также обеспечить выходную частоту ультразвукового сигнала в диапазоне 7...30 кГц с точностью задания частоты до 1 Гц [6].

Мощность ультразвукового генератора N_{y3} позволяет оценить величину амплитуды ультразвуковой звуковой волны a . Согласно выражению для вектора Умова–Пойтинга

$$N_{y3} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 v a^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность топлива, кг/м^3 ; $\omega = 2\pi\nu_{y3}$ – частота ультразвукового сигнала; v – скорость распространения ультразвуковой волны, м/с (в случае распространения ультразвуковой волны в топливе $v = 1000$ м/с); a – амплитуда ультразвуковой волны, м.

Из уравнения (1) амплитуда ультразвуковой волны

$$a = \frac{1}{2\pi\nu_{y3}} \sqrt{\frac{2N_{y3}}{\rho v}}.$$

Диапазон значений амплитуды ультразвуковой волны a в зависимости от мощности ультразвукового генератора $N_{уз}$ и частоты ультразвукового сигнала $\nu_{уз}$ для высоковязкого топлива НФО380 с плотностью $\rho = 920 \text{ кг/м}^3$ приведен в табл. 1.

Значения табл. 1 подтверждают, что мощность ультразвукового генератора, а также ультразвуковые волны выбранной частоты воздействуют на частицы микронных размеров, к которым относится молекулярная структура топлива.

Таблица 1

Диапазон значений амплитуды ультразвуковой волны
для топлива НФО380

Мощность генератора ультразвука, $N_{уз}$, Вт	Амплитуда ультразвуковой волны a , мкм при частоте ультразвукового сигнала, $\nu_{уз}$, кГц					
	20	22	24	26	28	30
1000	0,393	0,357	0,328	0,302	0,281	0,262
2000	0,556	0,506	0,463	0,428	0,397	0,371
3000	0,681	0,619	0,568	0,524	0,486	0,454
4000	0,786	0,715	0,655	0,605	0,562	0,524
5000	0,879	0,799	0,733	0,676	0,628	0,586

По приведенной методике определялось содержание сернистых примесей в топливах, прошедших ультразвуковую кавитационную обработку, с различным первоначальным содержанием серы S: 2,7 %, 3,0 % и 3,2 %.

Изменение содержания сернистых примесей в различных топливах S в зависимости от частоты ультразвукового сигнала $\nu_{уз}$ представлена массивом кривых на рис. 2, а. Зависимость содержания сульфида водорода H_2S в парах различных топлив над его поверхностью в функции от частоты генерируемого звука показана на рис. 2, б. Обе зависимости имеют ярко выраженный экстремум, соответствующий определенной частоте звукового сигнала $\nu_{уз}^{опт}$.

Совмещение данных зависимостей на одной координатной сетке позволяет определить диапазон частот, обеспечивающих максимальное снижение сернистых примесей в топливе и максимальное количество сероводорода в парах топлива (рис. 3).

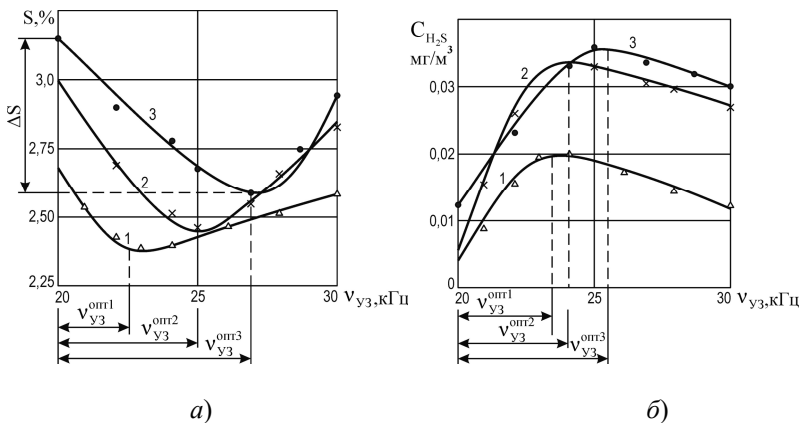


Рис. 2. Изменение содержания сернистых примесей в топливе S (а) и концентрации сульфида водорода C_{H_2S} в парах топлива (б) в зависимости от частоты ультразвукового сигнала ν_{y3} для топлив с различным содержанием серы: 1 – $S=2,7\%$; 2 – $S=3,0\%$; 3 – $S=3,2\%$

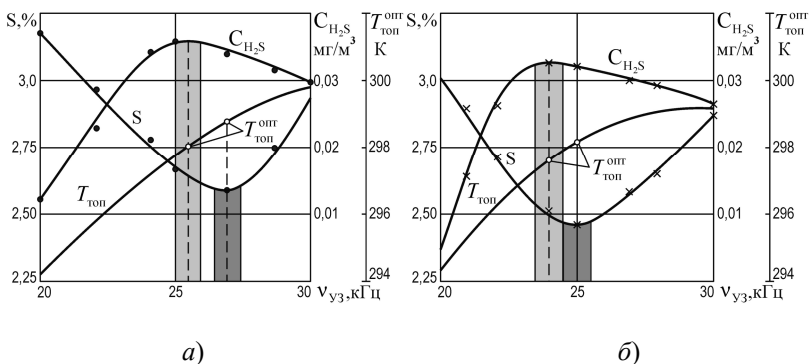


Рис. 3. Изменение содержания сернистых примесей в топливе S , концентрации сульфида водорода C_{H_2S} в парах топлива и температуры топлива T_{top} в зависимости от частоты ультразвукового сигнала ν_{y3} : а) – топливо NFO380 ($S=3,2\%$); б) – топливо NFO180 ($S=3,0\%$)

Еще одним критерием выбора оптимальной частоты ультразвукового сигнала является температура топлива, подвергающегося облучению. Зависимость $T_{top} = f(\nu_{y3})$ носит слабо выраженный экспоненциальный характер (см. рис. 3). Для минимизации энергетических затрат

выбор частоты ультразвукового сигнала должен обеспечивать температуру топлива $T_{\text{топ}}^{\text{онт}}$ максимально приближенную к ближайшему оптимуму кривых $S=f(v_{\text{уз}})$ и $C_{\text{H}_2\text{S}}=f(v_{\text{уз}})$.

На рис. 4 представлены зависимости $S=f(v_{\text{уз}})$ и $C_{\text{H}_2\text{S}}=f(v_{\text{уз}})$ для различного времени ультразвуковой обработки топлива. Обе зависимости имеют экспоненциальный вид и позволяют определить оптимальное время ультразвуковой обработки, которое, с одной стороны, обеспечивает максимальное удаление сернистых примесей из топлива, а с другой – способствует минимизации энергозатрат на проведение такой обработки.

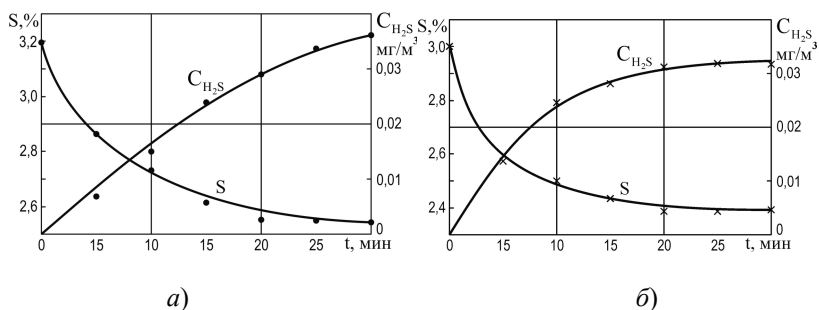


Рис. 4. Определение оптимального времени ультразвуковой обработки различных топлив: а) – топливо HFO380 (S=3,2 %); б) – топливо HFO180 (S=3,0 %)

Удаление сернистых примесей в составе газовой фазы приводит к изменению структурного состава топлива, влияющего на низшую теплотворную способность топлива $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$. Для оценки этого изменения калориметрическим методом определялась величина $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ для топлива, прошедшего ультразвуковую кавитационную обработку. При этом, несмотря на удаление из топлива горючих составляющих (водорода H и серы S в составе сульфида водорода H_2S) максимальное изменение $Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ не превышало 1,2 % (с учетом погрешности эксперимента). Это подтверждает высказывание о том, что при ультразвуковой обработке происходит диссоциация и разрыв не только C–S, но и C–H и C–C связей в топливе. В результате протекания этих процессов в топливе увеличивается количество активированных частиц: радикалов, ионов, ионно-радикальных образований, интенсифицирующих процесс сгорания топлива и способствующих повышению его теплотворной способности [7].

Проведенные исследования и полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Оптимальным способом десульфуризации топлива в условиях морского судна является его ультразвуковая обработка, проведение которой целесообразно выполнять в малоподвижном объеме топлива для чего наиболее подходит расходная топливная цистерна.

2. Процесс десульфуризации топлива с помощью ультразвуковой обработки сопровождается выделением сульфида водорода H_2S в составе газовой фазы, образующейся над поверхностью топлива. Концентрация H_2S в составе газовой фазы для топлива с исходным содержанием сернистых примесей до 3,5% не превышает $0,04 \text{ мг/м}^3$, что позволяет применять блок ультразвуковой обработки топлива в составе судовых систем топливоподготовки.

3. Обеспечение энергетической эффективности ультразвуковой обработки топлива достигается на частотах ультразвукового сигнала $\nu_{уз}$, соответствующих оптимуму кривых $S = f(\nu_{уз})$ и $C_{H_2S} = f(\nu_{уз})$, где S – концентрация сернистых примесей в топливе; C_{H_2S} – концентрация сульфида водорода над поверхностью топлива. Значение этой частоты при обработке топлив с вязкостью до $380 \text{ мм}^2/\text{с}$ и содержанием сернистых примесей до 3,5 % лежит в пределах $22 \dots 26 \text{ кГц}$ при амплитуде ультразвуковой волны $0,36 \dots 0,68 \text{ мкм}$ и определяется экспериментально.

4. Для минимизации энергетических затрат на ультразвуковую обработку топлива частота ультразвукового сигнала должна обеспечивать температуру топлива $T_{\text{топ}}^{\text{опт}}$ максимально приближенную к ближайшему оптимуму кривых $S = f(\nu_{уз})$ и $C_{H_2S} = f(\nu_{уз})$.

6. Предложенный метод ультразвуковой обработки топлива позволяет определить оптимальное время этого процесса как синергетическое решение зависимостей $S = f(t)$ и $C_{H_2S} = f(t)$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилов С.П., Селиверстов В.М., Браславский М.И. Ультразвуковая кавитационная обработка топлив на судах. – Л.: Судостроение, 1988. – 80 с.
2. Анисимов А.В. Окислительное обессеривание углеводородного сырья // Рос. хим. журнал. – 2008. – № 4. – Т. LII. – С. 32 - 40.
3. Маргулис М.А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях): учеб. пособие для хим. и хим.-технол. спец. вузов. – М.: Высш. шк., 1984. – 272 с.

4. Солодовников В.Г. Повышение эффективности процесса топливоподготовки в судовых дизелях за счет использования дополнительной кавитационной обработки топлива // Сб. научных трудов. IV межд. научн.-практ. конф. "Техника и технологии: роль в развитии современного общества", 27 января 2015 г., г. Краснодар. – Краснодар: науч.-изд. центр Априори, 2015. – С. 121 – 128.

5. Солодовников В.Г. Ультразвуковая обработка топлива для снижения сернистой коррозии в судовых среднеоборотных дизелях // Автоматизация судовых технических средств: наук.-техн. сборник. – 2015. – Вып. 20. – С. 84 – 91.

6. Sagin S.V., Solodovnikov V.G. Cavitation Treatment of High-Viscosity Marine Fuels for Medium-Speed Diesel Engines // Modern Applied Science; Published by Canadian Center of Science and Education. – 2015. – Vol. 9. – № 5. – P. 269 – 278.

7. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное топливо / А.Ф. Немчин [и др.] // Пром. теплотехника. – 2002. – Т. 24. – № 6. – С. 60 – 63.