

*А.В. СТЕПУК*, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., НТУ "ХПИ",  
Харьков

## **МИКРОВОЛНОВАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ФИЛЬТРОВ ОЧИСТКИ**

Чисельний аналіз дизельних фільтрів твердих частинок і окислення сажі розглядини. Результати підтвердили нестабільність поширення 2,45ГГц ВЧ хвиль і збудження багатофазних гармонік. Альтернативне рішення для підвищення якості фільтрації сажі пропонується.

Рассмотрены численный анализ дизельных фильтров твердых частиц и окисления сажи. Результаты подтвердили нестабильность расширения 2,45 ГГц ВЧ волн и возбуждения многофазных гармоник. Предлагается альтернативное решение для повышения качества фильтрации сажи.

**Введение.** Экологические стандарты, введенные в ЕЭС, США и Японии ограничивают предельно допустимый выброс сажевых частиц, особенно интенсивно происходящий при сжигании дизельного топлива. Эти нормативы распространяются как на действующие энергетические установки промышленных предприятий и тепловых электростанций, так и на транспортные средства.

Используемые в настоящее время фильтры накапливают сажу, что требует их периодической очистки либо замены. Чтобы избежать дорогостоящей разборки оборудования используются различные методы текущей очистки с применением химических растворителей либо энергетических способов регенерации сажи при нагреве, например пропусканием электрического тока, либо воздействием полей СВЧ. Преимуществом последнего является их высокая эффективность и применение недорогих магнетронов 2,45 ГГц, широко используемых в бытовых микроволновых печах. Основным недостатком СВЧ регенерации остаются нестабильность и неоднородность регенерации сажи по объему фильтра.[1,2]. Цель работы – проведение анализа распределения энергии СВЧ и тепловых полей для поиска решений проблемы неоднородной регенерации.

**Постановка и метод решения задачи.** Для моделирования распределения электромагнитных и тепловых полей внутри фильтра использовался программный МКЭ пакет Comsol 3,5 Multi physics. Представляя электродинамическое устройство с нагреваемым материалом в виде волновода с граничными условиями, определен закон распреде-

ления СВЧ мощности по объему материала. Модель основана на принципе суперпозиции распределений электромагнитных и температурных полей в материале и учете зависимости распределения температуры по толщине материала от его диэлектрических параметров.

При решении волнового уравнения нелинейные (зависимость от температуры) и дисперсионные (зависимость от частоты) свойства среды не учитывались. При численном моделировании полагалось, что металлический корпус фильтра по проводящим свойствам близок к меди.

Свойство нагрева и сжигания сажи определяется ее диэлектрическими свойствами

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

где  $\varepsilon'$  – определяет свойства накапливать энергию, а  $\varepsilon''$  – рассеивать энергию (сопротивление). Тогда энергия, выделяющаяся в фильтре, определяется из соотношения:

$$P = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (2)$$

при этом глубина проникновения поля в диэлектрик

$$d = c / 2\pi f \sqrt{\{2[\sqrt{(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2)} - 1]\}} \quad (3)$$

Рассмотрено стационарное возбуждение первых пяти СВЧ гармоник в узле дизельного фильтра с выхлопными трубами. Анализ распределения СВЧ поля в полости фильтра выполнялся для дизельного автомобильно фильтра, подобного выпускаемым компанией Isuzu и Bosch (рис.1) диаметром 125 мм и длиной 525 мм с апертурой излучателя от магнетрона СВЧ 50\*80 мм. Частота возбуждения магнетрона СВЧ 2.45ГГц, что соответствует длине волны в вакууме 12,25 см.



Рис. 1. Кремниво-карбидный наполнитель и сажевые фильтры фирм Isuzu и Bosch.

Поскольку геометрия фильтра неоднородна, то в его полости могут быть генерированы ряд СВЧ гармоник. Например: для прямоугольного волновода (апертуры) – это  $H_{10}$  частотой 1,87 ГГц; для цилиндрического –  $H_{11}$  частотой 1,43 ГГц,  $E_{01}$  частотой 1,87 ГГц и  $H_{21}$  частотой 2,33 ГГц; для цилиндрического резонатора (при размещении отражателя внутри фильтра) –  $H_{111}$  частотой 1,41 ГГц и  $E_{010}$  частотой

1,84 ГГц. Рассмотрено также размещение внутри фильтра электромагнитного отражателя для выравнивания поля и концентрации тепловыделения в областях скопления частиц сажи.

**Анализ результатов исследований.** Результаты расчетов подтвердили неустойчивость и неоднородность распределения поля СВЧ, в зависимости от частоты возбуждения.

На рис. 2 представлены модели с рассчитанными распределениями интенсивности электромагнитного поля в зависимости от частоты возбуждения (0,89 ГГц – 2,88 ГГц) и положения СВЧ рефлектора. Сверху вниз распределения при 0,96 ГГц – 2,44 ГГц. Для всех рассмотренных вариантов характерны высокая неоднородность распределения СВЧ поля и тепловыделения, необходимого для окисления сажи.

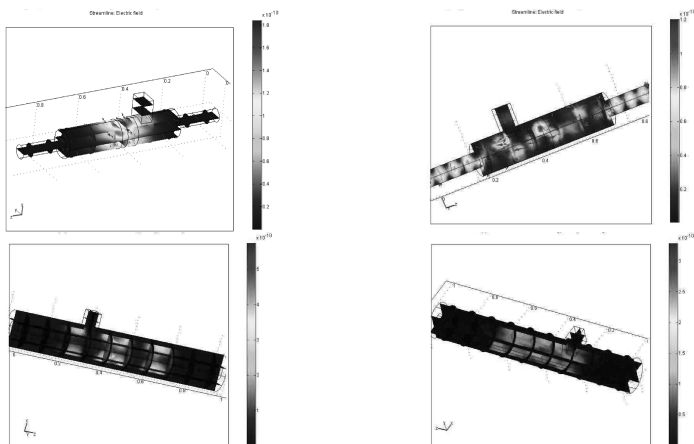


Рис. 2. Интенсивность электромагнитного поля в сажевом фильтре для различных СВЧ гармоник и положения отражателя

На рис. 3 представлены результаты расчета коэффициентов отражения для фильтра без отражателя и с рефлектором (слева направо). По крайней мере, для трех резонансных частот коэффициент отражения не превышает 10 дБ, что подтверждает многомодовый характер СВЧ возбуждения и невозможность генерации равномерного распределения для заданных физических, геометрических и частотных параметров. Получено удовлетворительное соответствие между теоретическими и экспериментальными значениями [3] затухания и распределения мощности в сажевых фильтрах.

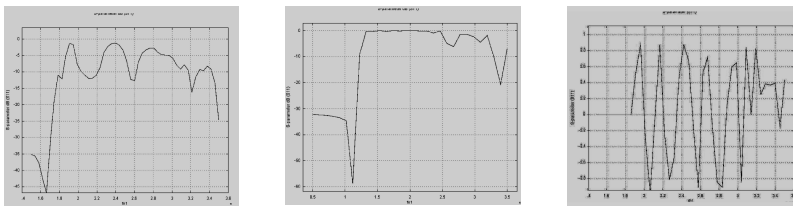


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения от частоты СВЧ гармоники и наличие отражателя в фильтре.

**Выводы.** Проведение исследования подтвердило экспериментально наблюдаемые эффекты неоднородной регенерации сажи в фильтрах. На основании полученных результатов можно предложить несколько способов улучшения работы фильтров.

Одним из способов снижения неоднородности электромагнитного поля может быть использование дополнительных корректирующих элементов: ферритовых колец, магнитных ловушек; изменении размеров и частоты СВЧ или способа возбуждения основной гармоники. Например, нестационарное размещение ловушек позволило бы окислять скопления сажи не сразу по всему объему, а по мере окисления отдельных участков фильтра. Недостатком такого подхода, однако, становятся: возрастание сложности и стоимости оборудования; неустойчивость генерируемого поля в зависимости от пространственного распределения осажденной сажи и внешних вибраций.

Другим способом предотвращения неоднородного поглощения СВЧ энергии в фильтре может быть применение дополнительного резистивного нагрева сетки перед магнетроном для предварительного нагрева до 500–600°C и затем инициация окисления сажи СВЧ импульсом, длительностью соответствующей скорости окисления 30–40 сек.

**Список литературы. 1.** *Richard D. Nixdorf, Johnney B. Green Jr., John M. Story and Robert M. Wagner.* Microwave-Regenerated Diesel Exhaust Particulate Filter // SAE 2001 World Congress, Detroit, Michigan, March 5-8, 2001, 9 p. **2.** *Zhi Ning, Yongsheng He.* Experimental Study on Microwave Regeneration Characteristics of Diesel Particulate After-Treatment System) // SAE Technical Papers 1999-01-1470, Michigan. – 1999. – 6 p. **3.** *Dilipa K.V., Nilesh J. Vasab, Kopp Carstena, K.U. Ravindraa.* Incineration of diesel particulate matter using induction heating technique // Applied Energy. – Vol. 88, Issue 3. – March 2011. – P. 938-946.

Поступила в редколлегию 31.01.2011  
Рецензент д.т.н., проф. Болюх В.Ф.