

А.В. СТЕПУК, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ТЕРМОЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬНОГО ФИЛЬТРА С СВЧ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ

Чисельний аналіз дизельних фільтрів твердих частинок і окислення сажі. Результати підтвердили нестабільність поширення 2.45ГГц ВЧ хвиль і збудження багатозафазних гармонік. Альтернативне рішення для підвищення якості фільтрації сажі пропонується.

Численный анализ дизельных фильтров твердых частиц и окисления сажи. Результаты подтвердили нестабильность распространения 2.45ГГц ВЧ волн и возбуждение многофазных гармоник. Предложено альтернативное решение для повышения качества фильтрации сажи.

Numerical analysis of diesel particulate filters and soot oxidation considered. Results confirmed instability of 2.45GHz HF wave propagation and multiphase harmonic wave excitation. Alternative solution to enhance diesel particulate filtering quality suggested.

Введение. Экологические ограничения, особенно в новых стандартах ЕС, на допустимый выброс сажи при сжигании топлива в тепловых и транспортных дизельных установках приводят к необходимости в установке высококачественных фильтров очистки выхлопных газов. В связи с дороговизной замены таких фильтров в процессе эксплуатации широкое применение находят технологии их восстановления, например, СВЧ регенерации при окислении накопленной сажи. Этот способ, несмотря на невысокую стоимость и достаточную эффективность, обладает рядом недостатков, связанных с неоднородностью окисления сажи в фильтре, например, возможности теплового разрушения при возникновении неконтролируемой регенерации - самовозгорания [1,2].

Поиск возможных решений по предотвращению такого разрушения наиболее эффективен при анализе построенных физико-математических моделей процессов возбуждения и распространения электромагнитных и температурных полей в фильтре. Поскольку эти поля связаны и нелинейные, то применение аналитических и аппроксимационных методов анализа не представляется возможным. В настоящей работе исследование распределения связанных электромагнитного и теплового полей в сажевых фильтрах выполняется численными методами с целью поиска способов предотвращения неоднородной регенерации сажи и самовозгорания.

Постановка и метод решения задачи. Процессы СВЧ нагрева диэлектриков описываются системой дифференциальных уравнений в частных производных, состоящей из уравнений Максвелла и уравнения нестационарной теплопроводности. Уравнения Максвелла в системе СИ:

$$\operatorname{div}\mathbf{D}=\rho; \operatorname{div}\mathbf{B}=0; \operatorname{div}\mathbf{E}=-\partial\mathbf{B}/\partial t; \operatorname{rot}\mathbf{H}=\mathbf{j}+\partial\mathbf{D}/\partial t \quad (1)$$

с учетом материальных соотношений в неподвижной среде:

$$\operatorname{div} \mathbf{j} + \partial \rho / \partial t = 0; \quad \mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}; \quad \mathbf{B} = \mu \mathbf{H}; \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (2)$$

Для медленно меняющихся полей в представлении

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) * E(t) * e^{i\omega t} \quad \text{и} \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) * H(t) * e^{i\omega t}$$

уравнения (1,2) при $k^2 = \mu\omega(\varepsilon\omega - i\sigma)$ сводятся к:

$$\Delta \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0; \quad \operatorname{div} \mathbf{E} = 0; \quad \Delta \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0; \quad \operatorname{div} \mathbf{H} = 0. \quad (3)$$

Тогда условия сопряжения электромагнитного поля на поверхностях раздела S_p будут иметь вид:

$$E_{vn} = E_n; \quad E_{vt} = E_t; \quad \mathbf{n} * (H_v - \mathbf{H}) = 0; \quad H_{vn} = H_n; \quad \sigma_{ij} * n_j = p_{in}; \quad \forall x \in S_p. \quad (4)$$

Свойство нагрева и сжигания сажи в фильтре определяются ее диэлектрическими свойствами:

$$\varepsilon = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (5)$$

где $\varepsilon' = \varepsilon_0$ – обуславливает свойства сажи накапливать энергию, а $\varepsilon'' = \sigma/\omega$ – рассеивать энергию (активное сопротивление). Энергия, выделяющаяся в фильтре, находится из соотношения:

$$Q = \mathbf{j} * \mathbf{E} = \sigma * \mathbf{E}^2 = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2. \quad (6)$$

Для квазистационарного, медленно меняющегося электромагнитного поля решение системы уравнений полностью определяется заданием граничных условий (4), включая область возбуждения СВЧ колебаний магнетроном. После решения уравнений электродинамики и нахождения соответствующего распределения джоулева тепла (6), температурные поля определяются из уравнения теплопроводности:

$$\nabla^2 T + Q/\lambda - (1/a) * (\partial T / \partial t) = 0, \quad (7)$$

где λ , a – коэффициенты тепло- и температуропроводности, при этом линейное расширение материала не учитывается. Граничные условия на поверхности раздела включают в себя конвективный теплообмен с внешней средой:

$$\partial T / \partial n + H_0(T - T_0) = 0, \quad (8)$$

где H_0 – коэффициент теплоотдачи, $\partial T / \partial n = \operatorname{grad} T * \mathbf{n} = \nabla T * \mathbf{n}$; и условия для контактирующих тел:

$$T_1 = T_2; \quad \lambda_1 * (\partial T_1 / \partial n) = \lambda_2 * (\partial T_2 / \partial n) \quad (9)$$

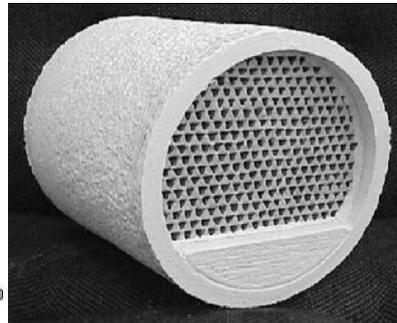
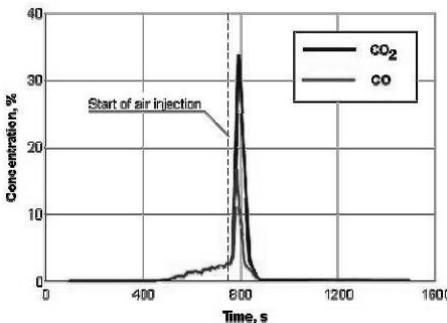


Рисунок 1 – Выделение CO во время СВЧ регенерации в сажевом фильтре (Isuzu)

Нелинейность и связанность системы уравнений обусловлена тем, что значения электромагнитных свойств (2 - диэлектрической проницаемости, проводимости) материалов, зависят от температуры регенерации (400-600°С).

При ограниченной длительности (Рис.1) физических процессов регенерации 100-200 сек [11] влияние процессов теплообмена и потерь электромагнитной энергии в стенках корпуса фильтра не существенно.

Поэтому в граничных условиях устанавливалось, что стенки корпуса фильтра идеально проводящие и теплоизолированные. Также не учитывались дисперсионные (зависимость от частоты) свойства среды при решении системы уравнения. Диэлектрические свойства материалов, используемых в фильтре, приведены в таблице 1:

Таблица 1

Диэлектрические свойства материалов

Материал	Диэлектрическая проницаемость	Диэлектрические потери
Дизель, сажа №1	10.695	3.561
Дизель, сажа №2	9.578	2.854
Дизель, сажа №3	8.6	7.4
Кордерит №1	2.873	0.138
Кордерит №2	1.000	0.00006
Гамма Al	3.006	0.170
SiO	3.066	0.215
TiO	7.020	0.430
ZrO	4.214	0.186

В общем случае нелинейная зависимость теплопроводности и проводимости от температуры приводит к связанности системы уравнений (3,6,7) и численное решение выполняется до достижения сходимости последовательных итераций. А именно, из уравнений электродинамики определяется электромагнитное поле и соответствующее ему распределение джоулева тепла. Полученная мощность непрерывно распределенных тепловых источников используется в уравнении теплопроводности для определения температурного поля. На основании последнего определяются значения теплопроводности и проводимости, а затем вновь выполняется расчет электромагнитного поля до достижения требуемой сходимости расчета на предыдущем шагу (~1%).

Для численного моделирования распределения электромагнитных и тепловых полей внутри фильтра использовался программный МКЭ пакет Comsol 3.5 Multi physics. Расчетная модель включает в себя анализ волнового стационарного СВЧ электромагнитного поля и полученного на его основе распределения тепловых полей. Суперпозиция электромагнитных и температурных полей в материале сажевого фильтра учитывала распределение температуры по толщине материала в зависимости от его диэлектрических параметров.

Анализ распределения СВЧ поля в полости фильтра выполнялся для дизельного автомобильного 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.

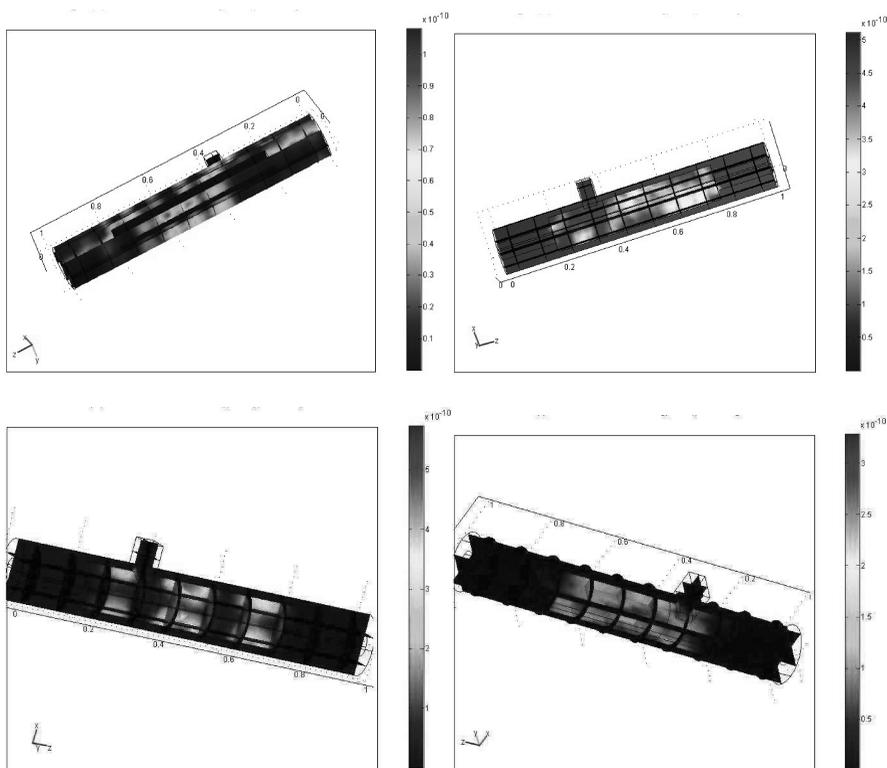


Рисунок 2 – Интенсивность электромагнитного поля в сажевом фильтре для различных СВЧ гармоник и положения отражателя

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. Расчетный анализ выполнялся для первых пяти СВЧ гармоник в узле дизельного фильтра с выхлопными трубами. Также рассмотрено влияние фильтра электромагнитного отражателя, размещенного внутри, на выравнивание поля и концентрации тепловыделения в областях скопления частиц сажи.

Анализ результатов. 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 представлены распределения при 0.96 ГГц – 2.44 ГГц. Зоны ма-

ксимальной концентрации энергии распределяются в соответствии с длиной волны возбужденной гармоники. Причем размещение СВЧ отражателей (рис.2, нижний ряд), искажая пространственно-гармоническую структуру поля, не позволяют добиться выравнивания распределения энергии СВЧ поля по объему сажевого фильтра. Для всех рассмотренных вариантов характерны высокая неоднородность распределения СВЧ поля и, соответственно, тепловыделения, необходимого для окисления сажи.

На рис.3 представлены результаты расчета коэффициентов отражения для сажевого фильтра без СВЧ отражателя и с рефлектором (слева направо).

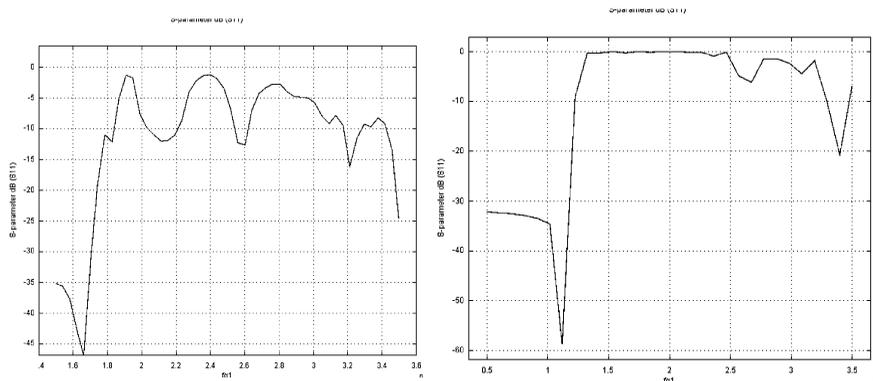


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента отражения от частоты СВЧ гармоники и наличие отражателя в фильтре

По крайней мере для трех резонансных частот коэффициент отражения не превышает 10дБ, что подтверждает многомодовый характер СВЧ возбуждения и невозможность генерации равномерного распределения для заданных физических, геометрических и частотных параметров. Полученные зависимости коэффициента отражения соответствуют теоретическим и экспериментальным значениям затухания [3,4] и распределения мощности в сажевых фильтрах.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило экспериментально наблюдаемые эффекты неоднородной регенерации сажи в фильтрах. Результаты расчетов показали, что, независимо от частоты возбуждения в диапазоне 1-3 ГГц и изменения положения электромагнитного отражателя, распределения поля СВЧ в рабочем объеме фильтра сохраняет свою неустойчивость и неоднородность. На основании проведенного анализа были предложены несколько способов улучшения работы фильтров.

Одним из способов снижения неоднородности электромагнитного поля может быть использование дополнительных корректирующих элементов: ферритовых колец, магнитных ловушек, что позволило бы окислять накопленную сажу не по всему объему, а по мере окисления отдельных участков филь-

тра. К недостаткам такого подхода можно отнести: возрастание сложности и стоимости оборудования; неустойчивость генерируемого поля в зависимости от пространственного распределения осажденной сажи.

Изменение размеров и частоты СВЧ или способа возбуждения основной гармоника может улучшить равномерность выделения энергии и последующего сжигания сажи только при переходе на частоты кГц диапазона. Такой способ неэффективен с точки зрения затрат на оборудование и проблем электромагнитной совместимости.

Другим способом предотвращения неоднородного поглощения СВЧ энергии в фильтре может быть применение дополнительного резистивного нагрева. Проведенный анализ показывает, что в случае предварительного нагрева до 500-600°C, для последующей инициации окисления сажи достаточно воздействия СВЧ импульса магнетрона, длительностью 30-40 сек, соответствующей скорости окисления.

Выбор способа регенерации сажевых фильтров и указанных выше методов их улучшения определяется условиями применения фильтров. Например, для наиболее массового потребителя сажевых фильтров в катализаторах – автомобильной промышленности, основным критерием становится энергетическая эффективность. Автомобильный ДВС значительную часть времени эксплуатируется при низких нагрузках или на холостом ходу. В таких режимах степень разбавления топливной смеси продуктами сгорания, оставшимися от предыдущего цикла, становится выше и, соответственно, возрастает количество сажи в выхлопных газах, т.е. наиболее эффективным становится импульсная регенерация сажевых фильтров. С другой стороны, в энергетических стационарных установках основным фактором является качество непрерывной очистки, поэтому целесообразнее применение корректирующих СВЧ элементов и варьирование частоты возбуждения электромагнитного.

Список литературы. 1. *Richard D. Nixdorf, Johny 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. *K.V. Dilipa, 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, Pages 938-946 3. *W. Addy Majewski*, "Microwave Regenerated Filters" www.DieselNet.com. Revision 2000.02 4. *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 5. *Архангельский, Ю. С.* СВЧ электротометрия - Саратов : СГТУ, 1998. - 408 с 6. *Ma, J., Fang, M., Li, P., Zhu, B., Lu, X., and Lau, N. T.*, 1997, "Microwave-Assisted Catalytic Combustion of Diesel Soot," Appl. Catal. A, 159, pg. 211-228. 7. *Babu, V. S., Fari-nash, L., and Seehra, M. S.*, 1995, "Carbon in Diesel Particulate Matter: Structure, Microwave Absorption, and Oxidation," J. Mater Res., 10(5), pg. 1075-1078. 8. *Meredith, R.*, "Engineers Handbook of Industrial Microwave Heating", ISBN #0852969163, 1988

Поступила в редколлегию 21.03.11