

**МОДИФИКАЦИЯ ФЕРРОСУЛЬФАТНОГО ДОЗИМЕТРА**

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

В работе предложен вариант модификации дозиметра Фрике – одного из наиболее распространенных в практике дозиметрии устройств для исследования радиационных эффектов в материалах. Проанализированы возможности модификации на основе используемых в автомобильной промышленности методов контроля содержания кислорода в выхлопных газах. Показана возможность повышения в несколько раз точности определения дозы облучения, полученную человеком при работе с ионизирующим излучением.

Химические дозиметры – эти приборы, широко применяющиеся для определения мощности дозы излучения источников, которые используются для исследования радиационных эффектов в материалах, в особенности тогда, когда нет необходимости знать энергетический спектр. Использование этих дозиметров основано на образовании химически активных продуктов под действием излучения. Эти продукты подвергаются химическим превращениям по хорошо известным реакциям, а образующиеся соединения могут быть легко определены. Количество образовавшихся активных продуктов пропорционально полной поглощенной дозе излучения. Наиболее распространенным химическим дозиметром является водный раствор сульфата двухвалентного железа (дозиметр Фрике).

Ферросульфатный дозиметр – измерительный прибор, который применяется для измерения больших доз ионизирующего излучения, чаще всего для изучения свойств материалов до и после облучения. Работает данный прибор на окислении ионов двухвалентного железа продуктами радиолиза воды, например,  $H + OH \rightarrow H_2O$ ,  $H_2 + OH \rightarrow H + H_2O$ ,  $H_2O_2 + e_{гидр} \rightarrow OH + OH$ , в кислом водном растворе, и в последствии измерении концентрации образовавшихся ионов трёхвалентного железа, которая в широком диапазоне (0,5 – 2000 Гр) пропорциональна поглощённой дозе. Измерения поглощённой дозы дают результаты близкие к поглощённой дозе для биологических тканей. Такая согласованность объясняется тем, что в качестве рабочего вещества применяется водный раствор [1].

Таким образом, ферросульфатный дозиметр имеет сильную сторону в виде практически полной тканезквивалентности, и слабую – в виде нижнего порога поглощённой дозы для пропорциональности результатов, что делает невозможным его применение для измерения величины поглощенной дозы ниже 0,5 Гр, что очень много для использования в качестве мониторинга радиационной обстановки, кроме случаев чрезвычайных ситуаций. В таблице 1 приведены различные дозы облучения на человеческий организм и их последствия.

Таблица 1

Дозы и их влияние на организм

Доза, Гр	Причина и результат воздействия
$(0,7 - 2) \cdot 10^{-3}$	Доза от естественных источников в год
0,05	Предельно допустимая доза профессионального облучения в год
0,1	Уровень удвоения вероятности генных мутаций
0,25	Однократная доза оправданного риска в чрезвычайных обстоятельствах
1,0	Доза возникновения острой лучевой болезни
3 - 5	Без лечения 50% облученных умирает в течение 1-2 месяцев вследствие нарушения деятельности клеток костного мозга
10 - 50	Смерть наступает через 1-2 недели вследствие поражений главным образом желудочно-кишечного тракта
100	Смерть наступает через несколько часов или дней вследствие повреждения центральной нервной системы

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

Из таблицы 1 следует, что до значения 0,5 Гр есть достаточно пунктов, которые требуется отслеживать и важно, чтобы такие дозы считались максимально точно, передавая дозу, которую мог получить человек. Это необходимо по причине разной реакции различных тканей организма.

Для максимально точного результата можно использовать биологические методы дозиметрии, но их минус заключается в медленной обработке данных при массовом облучении и необходимости иметь данные о человеке до облучения.

Во многом ограничения по нижнему порогу чувствительности ферросульфатного дозиметра обусловлены способом исследования его образцов после облучения, а именно – спектрофотометром.

Измерение концентрации ионов  $Fe^{3+}$  после облучения кюветы производится на спектрофотометре, обычно на длине волны  $\lambda = 304$  нм. Определив оптическую плотность  $D = \ln(I/I_0)$  раствора относительно необлучённого дозиметра и зная длину оптического пути  $l$ , можно вычислить молярную концентрацию ионов  $Fe^{3+}$  в растворе, равную  $M = \frac{D}{l\mu(Fe^{3+})}$  где  $\mu(Fe^{3+}) = 2095 \frac{л}{\text{моль}\cdot\text{см}}$  — молярный коэффициент ослабления пучка света от ионов трехвалентного железа на длине волны 304 нм. Далее поглощённая доза в ферросульфатном дозиметре, для известных значений плотности раствора  $\rho$  (кг/л) и молярной концентрации действующего вещества  $M$  (моль/л), вычисляется по формуле  $D_{\text{полг}} (\text{Гр}) = 9,65 \cdot 10^6 M / (Gr)$ , где коэффициент  $G$  – так называемый радиационно-химический выход, то есть среднее количество прореагировавших молекул (атомов, ионов) действующего вещества на 100 эВ поглощённой энергии ионизирующего излучения в растворе [2]. Следовательно, расчет идет исходя из оптической плотности раствора, что и обуславливает высокий порог работы дозиметра. Для снижения минимального порога дозы требуется использовать другие методы измерения раствора.

В поисках альтернативных способов анализа результатов было решено обратиться к автомобилестроению. С учётом современных экологических норм для автомобилей с двигателями внутреннего сгорания становится понятно, что их системы газоанализа точны и при этом относительно бюджетные. Вывод о точности лямбда зондов можно сделать исходя из значений выбросов, установленных в последнем экологическом стандарте евро-6 для бензиновых и дизельных двигателей внутреннего сгорания (таблицы 2 и 3) и норм по содержанию веществ для топлива [3].

Таблица 2

Норма содержания веществ для дизельных двигателей

Экологический стандарт	Оксид углерода(CO), г/км	Оксид азота(NOx), г/км	HC+NOx, г/км	Взвешенные частицы, г/км
Евро-1	2,72 (3,16)	-	0,97 (1,13)	0,14 (0,18)
Евро-2	1,00	-	0,7	0,08
Евро-3	0,64	0,50	0,56	0,05
Евро-4	0,50	0,25	0,3	0,025
Евро-5	0,50	0,18	0,23	0,005
Евро-6	0,50	0,08	0,17	0,005

Для соблюдения высоких требований Евро-3, Евро-4, Евро-5 и Евро-6 к выбросам вредных веществ в выхлопных газах автомобилей в ЕС поэтапно вводились и более строгие нормы к качеству автомобильного топлива, которые установлены в европейском стандарте EN 590 «Автомобильные топлива. Дизельное топливо. Требования и методы испытаний» и в европейском стандарте EN 228 «Автомобильные топлива. Неэтилированный бензин. Требования и методы испытаний», а именно [4]:

- для дизельного топлива цетановое число должно быть не менее 51 (с 2000 года), содержание серы — не более 350 ppm (с 2000 года), 50 ppm (с 2005 года) и 10 ppm (с 2009 года), полициклических ароматических углеводородов — не более 8 % масс. (с 2009 года);

#### Секция 4. Прикладные проблемы физики конденсированного состояния

- для автомобильного бензина содержание серы — не более 150 ppm (с 2000 года), 50 ppm (с 2005 года) и 10 ppm (с 2009 года), бензола — не более 1 % об. (с 2000 года), ароматических углеводородов — не более 42 % об. (с 2000 года) и 35 % об. (с 2005 года), олефиновых углеводородов — не более 18 % об. (с 2000 года).

Таблица 3

Норма содержания веществ для бензиновых двигателей

Экологический стандарт	Оксид углерода(II) (CO), г/км	СН соед., г/км	Летучая органика, г/км	Оксид азота(NOx), г/км	HC+NOx, г/км	Взвешенные частицы, г/км
Евро-1	2,72 (3,16)	-	-	-	0,97 (1,13)	-
Евро-2	2,2	-	-	-	0,50	-
Евро-3	2,3	0,2	-	0,15	-	-
Евро-4	1,0	0,1	-	0,08	-	-
Евро-5	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,005
Евро-6	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,005
Евро-6D temp	1,0	0,1	0,068	0,06	-	0,0045

Исходя из анализа данных из приведенных выше стандартов, можно сделать вывод, что современные системы газоанализа в автомобилестроении должны улавливать значения меньше, чем содержание контролируемых веществ в исходном топливе, а это меньше 10 ppm. Целесообразно внедрить систему с подобными датчиками в ферросульфатные дозиметры, адаптировать их для определения трехвалентного железа и проверять раствор не в жидкой фазе, а в газообразной. Это позволит улавливать и определять число отдельных молекул Fe<sup>3+</sup>, что поможет снизить порог определения дозы облучения в несколько раз, и приведет к возможности использования данных дозиметров не только в технике и материаловедении, но и для определения дозы, получаемой человеком. А с учётом такого свойства дозиметра Фрике, как тканеэквивалентность, данные показания будут гораздо более приближенными к реальной дозе, получаемой человеком, нежели значения, полученные другими способами дозиметрии.

#### Список литературы

1. Справочник химика 21 / Химия и химическая технология [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://chem21.info/> (дата обращения: 20.03.2023).
2. Химическая энциклопедия: В 5 т.: т.2: Даффа-Меди/Редкол.: Кнунянц И. Л. (гл. ред.) и др. – М.: Сов. энцикл., 1990. – 671 с.: ил.
3. Федеральный портал спецтехники и коммерческого транспорта [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://perevozka24.ru/> (дата обращения: 20.03.2023).
4. Портал о нефти и химии Беларуси «Нефтехимия» [Электронный ресурс] / World Health Organization. – Электрон. дан. и прогр.: Швейцария, 2013. – Режим доступа к ресурсу: <https://belchemoil.by> (дата обращения: 20.03.2023).