

УДК 621.436

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА С ДОБАВЛЕНИЕМ ТОЛУОЛА

© 2024 г. Л. Ю. Джаббаров^{а*}, И. И. Мустафаев^б, А. С. Мирзаева^а, Н. А. Ибадов^а^аИнститут радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, AZ1143, Баку, ул. Ф. Агаева, д. 9^бАзербайджанский университет архитектуры и строительства, AZ1143, г. Баку, ул. Ф. Агаева, д. 9

*e-mail: clala@mail.ru

Получена 22.05.2024, после доработки 09.07.2024, принята к публикации 10.07.2024

Исследована радиолитическая устойчивость дизельного топлива (ДТ) с добавлением различных количеств толуола. Эксперименты проводили достаточно длительное время для изучения процессов постполимеризации. Кинетику процессов при облучении чистого ДТ изучали при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, мощности дозы $P = 0.07$ Гр/с в интервалах поглощенных доз $D = 15\text{--}150$ кГр, а смесь толуола с ДТ облучали в пределах поглощенных доз $D = 24\text{--}90$ кГр при концентрации толуола 1, 3 и 5 об%. Проведен газохромато-масс-спектрометрический (ГХ/МС) анализ, определены плотности, вязкости и иодные числа ДТ до и после облучения при различных поглощенных дозах. Кинетика постполимеризационных процессов после окончания облучения показывает, что скорость процесса и его доля в общей полимеризации зависят от времени облучения, плотности исходной смеси и дозы. Путем добавления присадок (антирадов) можно подобрать состав дизельного топлива, который будет лучше противостоять радиационному воздействию. Необходимо найти оптимальную концентрацию толуола в составе дизельного топлива, при которой вязкость и плотность не изменятся с увеличением поглощенной дозы.

Ключевые слова: дизельное топливо, толуол, γ -излучение, газохромато-масс-спектрометрия (ГХ/МС)**DOI:** 10.31857/S0033831124040109

ВВЕДЕНИЕ

Применение органических материалов (полимеров, смазок, топлив, теплоносителей) в условиях эксплуатации, при которых они подвергаются воздействию ионизирующих излучений, в условиях работы атомных реакторов, ускорителей электронов, в условиях космического пространства расширяется с каждым годом. Изучение воздействия облучения на органические топлива и установление связи между требованиями к составу топлива и его радиационной стойкостью представляют практический интерес. При действии ионизирующего излучения на органические вещества происходят сложные радиационно-химические превращения. Поэтому кроме известных физических и химических характеристик органических топлив и смазок необходимо учитывать их способность работать в условиях облучения, т.е. их радиационную стойкость. Современные топлива должны удовлетворять требованиям, обеспечивающих экономичную и надежную работу двигателя: иметь хорошую испаряемость, позволяющую получить однородную топливо-воздушную смесь оптимального состава при любых температурах, иметь групповой углеводородный состав, обеспечивающий

устойчивый, бездетонационный процесс сгорания на всех режимах работы двигателя, даже в условиях радиационного излучения. Дизельные топлива (ДТ) в современной структуре потребления нефтепродуктов стоят на первом месте. Лучшим ДТ считается моторное топливо с температурой кипения $230\text{--}350^\circ\text{C}$, состоящее из 60% керосиновых фракций, выкипающих до 300°C , и 40% более тяжелых — соляровых фракций, выкипающих в интервале $290\text{--}350^\circ\text{C}$. ДТ состоят из смеси нормальных алканов, изоалканов, циклоалканов и небольшого количества ароматических углеводородов. К важнейшим эксплуатационным характеристикам ДТ относятся плотность, вязкость, химическая стабильность, коррозионная активность, температура вспышки, устойчивость к нагарообразованию, содержание серы. ДТ должны обладать хорошими распыливаемостью, смесеобразованием, испарением и прокачиваемостью, быстрым самовоспламенением, полностью сгорать без дымления. Они не должны вызывать повышенного нагара и лакообразования на клапанах и поршнях, закоксовывания распылителя, заклинивания иглы распылителя, коррозии резервуаров, баков, деталей двигателя. Увеличение стабильности достигается за счет введения присадок. ДТ оцениваются по температуре их

воспламенения и характеризуются цетановым числом. По показателю температуры воспламенения определяется степень безопасности использования ДТ. От плотности ДТ зависит, насколько эффективной будет подача горючего по каналам топливной системы, его фильтрация и распыление в форсунках. Вязкость влияет на качество распыления топлива и смесеобразования, прокачиваемость, работу топливного насоса, износ плунжерных пар насоса высокого давления, для которого ДТ одновременно служит смазочным материалом, полноту сгорания и расход топлива, состав отработавших газов. Из-за большой вязкости могут возникнуть перебои в подаче топлива к насосу вследствие большого сопротивления при протекании его по топливоподающей системе. Чем меньше вязкость, тем тоньше распыление топлива, меньше диаметр образующихся капель, лучше испаряемость. При введении в ДТ эффективных антиокислительных, антикоррозионных, моющих, нейтрализующих присадок в значительной мере предотвращается вредное влияние сернистых соединений топлив, увеличиваются ресурсы работы двигателя, снижается расход топлива, износ механизмов и нагароотложение. Горючие и смазочные материалы, предназначенные для использования в условиях облучения, должны быть достаточно устойчивы к радиации. Процессы постполимеризации могут вызвать серьезные проблемы в дизельных генераторах и в двигателях самолетов, используемых в аварийных ситуациях под воздействием ионизирующего излучения. Повысить стабильность дизтоплива к действию гамма-излучений возможно за счет введения в состав ДТ в незначительном количестве ароматических соединений (антирадов), повышающих их радиационную стойкость. Наиболее распространенными антирадами являются ароматические соединения: бензол, толуол, фенилендиамин, фенилнафтиламин, дифениленсульфид, бензохиноны, нафтохиноны, фенилхинонимин и др. Содержание ароматических антирадов в материале составляет обычно 0.1–10 мас%. В смеси с углеводородами такого строения антирады защищают последние от действия радиации. Ароматические углеводороды стабильны при высокой температуре и достаточно устойчивы к радиолизу, поэтому они были подробно изучены с целью определения возможности их использования в качестве антирадов в условиях действия излучения. Опубликованы работы, посвященные воздействию радиационного излучения на моторные топлива, углеводородные смеси, смазки и масла [1–19], которые позволяют установить закономерности гамма-радиолиза органических топлив и смазок. В работах [1–8] проведенные исследования показали, что в пределах поглощенных доз 15–150 кГр в ДТ протекают химические процессы, приводящие к ухудшению технических характеристик топлива — плотности, вязкости, иодных чисел, цетановых чисел, температуры вспышки и воспламенения. Под действием облучения

происходит одновременно структурирование органических материалов, т.е. сшивание линейных молекул, ведущая к увеличению молекулярного веса, а также их расщепление. При хранении таких топлив значительно увеличивается содержание в них фактических смол и образуется осадок. В работах [9–11] влияние мощности дозы и поглощенной дозы на физико-химические характеристики ДТ при постоянном времени (1,3 ч) показало, что цетановое число увеличилось после воздействия поглощенных доз 3, 6 и 15 кГр (при мощности дозы 2.27, 4.5 и 11.15 кГр/ч соответственно), но снизилось при 10 кГр (7.5 кГр/ч). Эти результаты можно объяснить разрывом и образованием связей в результате воздействия высоких энергетических доз. Происходит превращение некоторых разветвленных, циклических и ароматических соединений в линейные цепные углеводороды. Такие соединения оказывают негативное влияние на цетановое число ДТ. Отрицательные результаты (10 кГр; 7.5 кГр/ч) можно связать с образованием фрагментов и соответствующим образованием изомеров, которые наблюдались в виде разветвленных, циклических и ароматических соединений [9–11, 15, 16]. Цетановое число (ЦЧ) — это показатель производительности или качества ДТ. Чем выше ЦЧ, тем лучше сгорает топливо в двигателе транспортного средства. Однако ЦЧ измеряет задержку времени воспламенения топлива. Это то, как минимизирована задержка между моментом впрыска топлива в камеру и началом сгорания [14, 17]. В работах [18, 19] исследовано влияние излучения на изомерный состав бензиновой фракции. Изомеризация парафинов увеличилась в присутствии добавок битума. При этом для модифицирования бензина требовались малые добавки битума. Авторы связывают наблюдаемое явление с переносом избыточной энергии на ароматические молекулы.

В настоящей работе изучены изменения физико-химических и эксплуатационных свойств ДТ с незначительным добавлением толуола под действием ионизирующего излучения ^{60}Co . Мы использовали различные концентрации толуола. Способность компонентов топлива сохранять свой химический состав в условиях эксплуатации при изменении температуры, радиационном воздействии имеет важное практическое значение. Для нефтяного топлива этот вопрос не изучался. В то же время исследование этого вопроса имеет большое практическое значение.

МЕТОДОЛОГИЯ

Образцы дизельного топлива (ДТ), помещенные в ампулы и запаенные в вакууме, облучали при комнатной температуре на гамма-источнике ^{60}Co типа МРХ γ -30. Средняя энергия гамма-квантов излучения ^{60}Co составляет 1.25 МэВ. Дозиметрию проводили двумя независимыми методами — этиленовым дозиметром и комбинацией цилиндра Фарадея с калориметром. Мощность дозы γ -излучения

определяли этиленовым и ферросульфатным дозиметрами, результаты которых согласуются в пределах 12–15%. Кинетику процессов чистого ДТ изучали при комнатной температуре при мощности дозы $P = 0.07$ Гр/с в интервале поглощенных доз $D = 15–150$ кГр в вакууме с целью прослеживания кинетики протекающих процессов. Кинетику процессов дизтоплива с добавкой толуола изучали при температуре $T = 20^\circ\text{C}$, мощности дозы $P = 0.07$ Гр/с в интервале поглощенных доз $D = 24–90$ кГр в вакууме при концентрации толуола 1, 3, 5 об%. Вязкость определяли на вискозиметрах типа ВПЖ-2 по ГОСТ 33–66. Иодные числа определяли на спектрометре Bruker MPA, плотности измеряли пикнометром по ГОСТ 3900–85. Хроматомасс-спектры анализировали на АГТ ГХ/МС Gerstel. Температуру вспышки топлива определяли по ГОСТ 6356–52 в закрытом тигле до и после облучения. Температуру воспламенения в закрытом тигле определяли по ГОСТ 305–82. Температуру воспламенения топлив до и после облучения определяли по Кливленду (CLA 5). Автоматический анализатор в открытом тигле по Кливленду (Cleveland Open-Cup, СОС) измеряет и описывает свойства образца при нагреве и наличии источника пламени в контролируемых условиях.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Влияние гамма-излучения на характеристики исходного ДТ сразу и через 4 месяца после гамма-облучения показано на рис. 1.

Стабильность ДТ определяется содержанием в них нестабильных продуктов, оцениваемых величиной иодного числа и фактических смол. Для всех светлых топлив иодное число является показателем наличия в них олефиновых и особенно диолефиновых углеводородов, характеризующих химическую нестабильность топлив. Под действием температуры, радиации, света непредельные углеводороды быстро окисляются и полимеризуются. Эти процессы еще долго развиваются после прекращения облучения, и это приводит к изменению состава топлива. В условиях наших экспериментов иодные числа ДТ уменьшаются, что объясняется процессами полимеризации. Как видно из рис. 1, с увеличением поглощенной дозы вязкость и плотность топлив увеличиваются. Важнейшим свойством ДТ является его воспламеняемость, определяющая пусковые свойства двигателя, жесткость рабочего двигателя, расход топлива, токсичность и дымность отработанных газов. Основным показателем воспламенения топлива в условиях камеры сгорания дизеля – ЦЧ – значительно влияет на эмиссию продуктов неполного сгорания топлива и дымности. При высокой воспламеняемости ДТ наблюдаются выбросы черного дыма. ЦЧ предопределяется содержанием в топливе ароматических углеводородов. Качество зажигания определяется путем измерения задержки воспламенения, которая представляет собой период между моментом впрыска и началом воспламенения топлива. Топливо с высоким ЦЧ имеет короткий период задержки воспламенения и начинает воспламеняться вскоре после впрыскивания в двигатель. Качество воспламенения ДТ

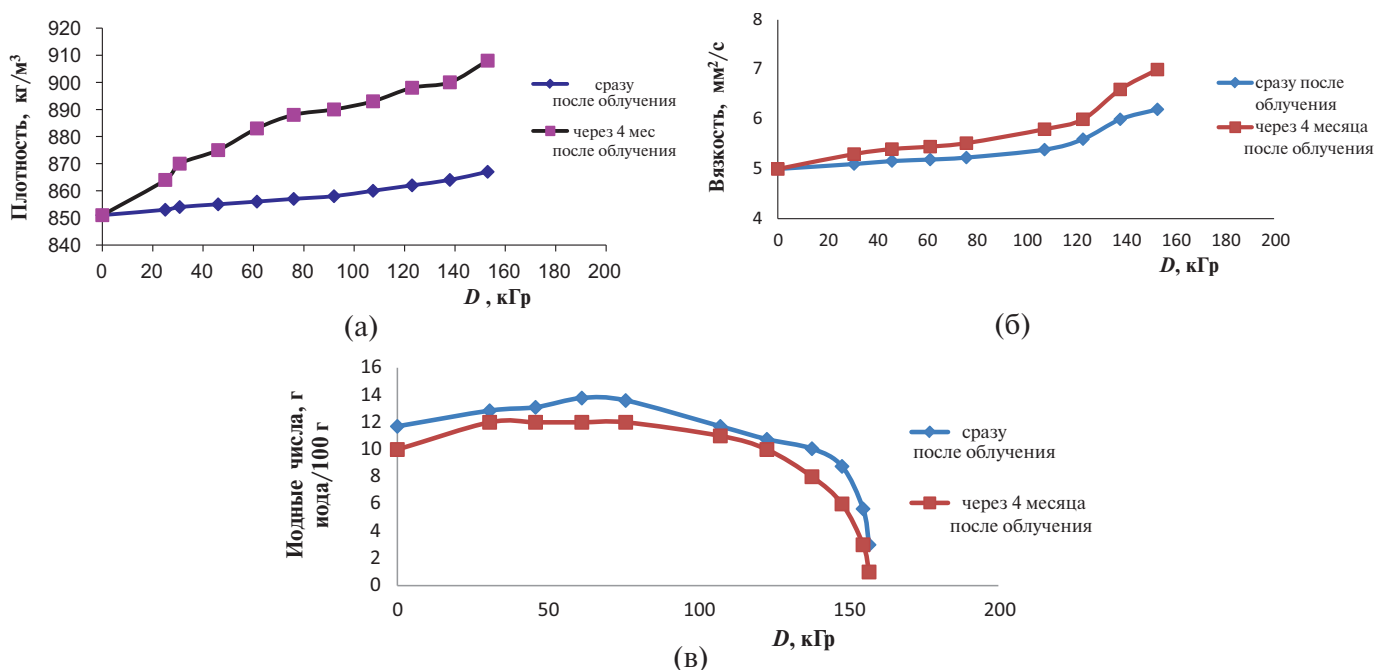


Рис. 1. Изменения плотности (а), вязкости (б) и иодных чисел (в) ДТ сразу после облучения и через 4 месяца спустя после облучения при различных поглощенных дозах. $T = 20^\circ\text{C}$, $P = 0.07$ Гр/с.

зависит от его молекулярного состава. Некоторые из более простых молекулярных компонентов, такие как *n*-парафины, могут воспламеняться в дизельном двигателе относительно легко, но ароматические углеводороды имеют более стабильную кольцевую структуру и поэтому требуют более высокой температуры и давления для воспламенения. В табл. 1 приведены характеристики ДТ после гамма-облучения.

Необходимо защитить топлива и смазочные материалы от излучения, а в тех случаях, когда это неосуществимо, модифицировать имеющиеся с адекватной радиационной стойкостью. Для увеличения радиационной стойкости ДТ мы добавили толуол в малых концентрациях в качестве антирада. Влияние гамма-излучения на плотность и вязкость толуольно-дизельной смеси при различных концентрациях сразу после гамма-облучения показано на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что при добавлении 1 об% толуола вязкость и плотность повышаются незначительно.

На рис. 4 представлены результаты хроматографического анализа на аппарате GC/MS HS SIM состава смеси дизтопливо–толуол при концентрации толуола 1%.

Пострадиационные изменения компонентов ДТ представлены в табл. 2–4 и на рис. 5. Спустя 2 месяца после облучения концентрация нафталина в ДТ

Таблица 1. Изменение некоторых характеристик дизельного топлива при гамма-облучении при комнатной температуре. $D = 0.64$ кГр

ДТ	Температура вспышки в закрытом тигле, °С	Температура воспламенения в закрытом тигле, °С
Исходное ДТ	40	114
Облученное ДТ	47	144

увеличивается в 18 раз, бензола — в 2 раза. Эти результаты можно объяснить разрывом и образованием связей в результате воздействия облучения.

ОБСУЖДЕНИЕ

О термической стабильности топлива судят по накоплению в топливе растворимых продуктов жидкофазного окисления его компонентов и полимеров, выпадающих из раствора. Совокупность процессов, происходящих под действием облучения, способствует изменению физико-химических и эксплуатационных свойств топлив. При выборе топлив и смазок для использования в условиях облучения необходимо применять топлива и смазки с адекватной радиационной стойкостью. От реакционной способности компонентов зависят стабильность топлива, поведение

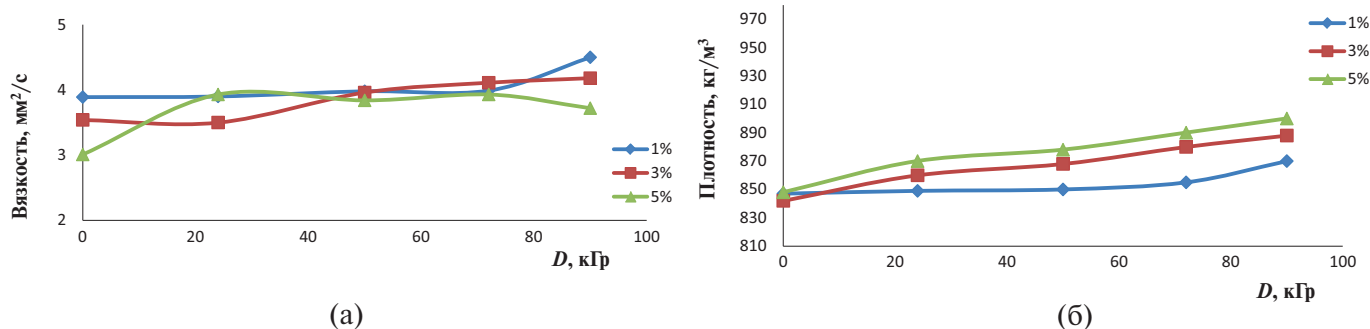


Рис. 2. Влияние гамма-облучения на плотность и вязкость толуольно-дизельной смеси при различных концентрациях сразу после гамма-облучения. $T = 20^\circ\text{C}$, $P = 0.07$ Гр/с.

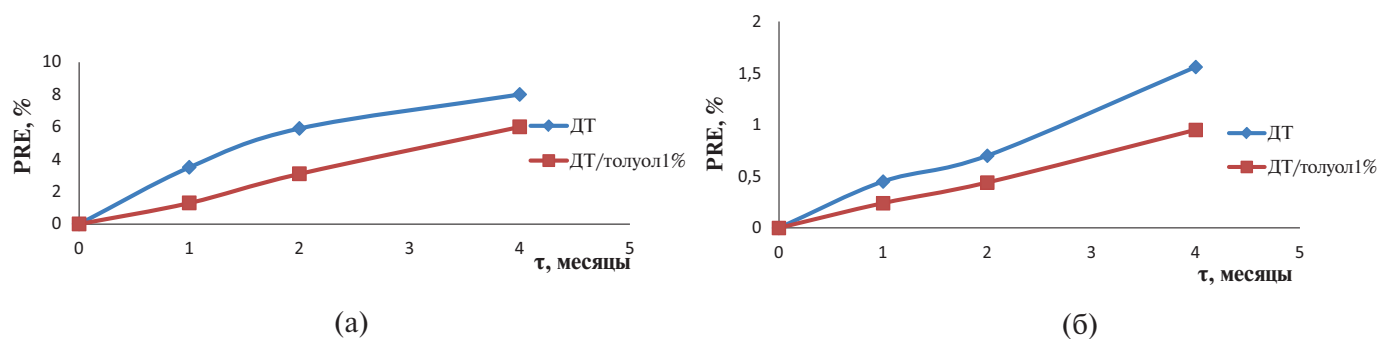


Рис. 3. Временная (месяцы) зависимость пострадиационного эффекта (а – вязкость, б – плотность) ДТ и смеси с 1% толуола. $D = 72$ кГр.

при длительном хранении, огневые качества в камере сгорания. Цепной радикальный характер окисления является причиной высокой чувствительности этих реакций к различным процессам и ингибиторам. Стабильность топлив при высоких температурах оценивается по лако- и нагарообразующей способности топлива при контакте с горячими поверхностями. Эти отложения у нагретых поверхностей выгорают с недостаточной скоростью, в результате накопления лаков и нагаров вызывают нарушение теплового режима двигателя, так как они характеризуются малой теплопроводностью. При накоплении

растворимых кислородных соединений в ДТ повышается их эмульгирующая способность с водой и возрастает температура кристаллизации. Радиационная стойкость аренов обусловлена относительно низкой энергией их первых уровней возбуждения. Вследствие значительной устойчивости кольца разрыв связей С–С уменьшен и стабильные продукты радиолитического разложения представлены главным образом H_2 и полимерами. Некоторая часть энергии, поглощенной алифатической частью молекулы, может быть перенесена на ароматическую часть. Эта энергия будет локализована на ароматической группе, разложение

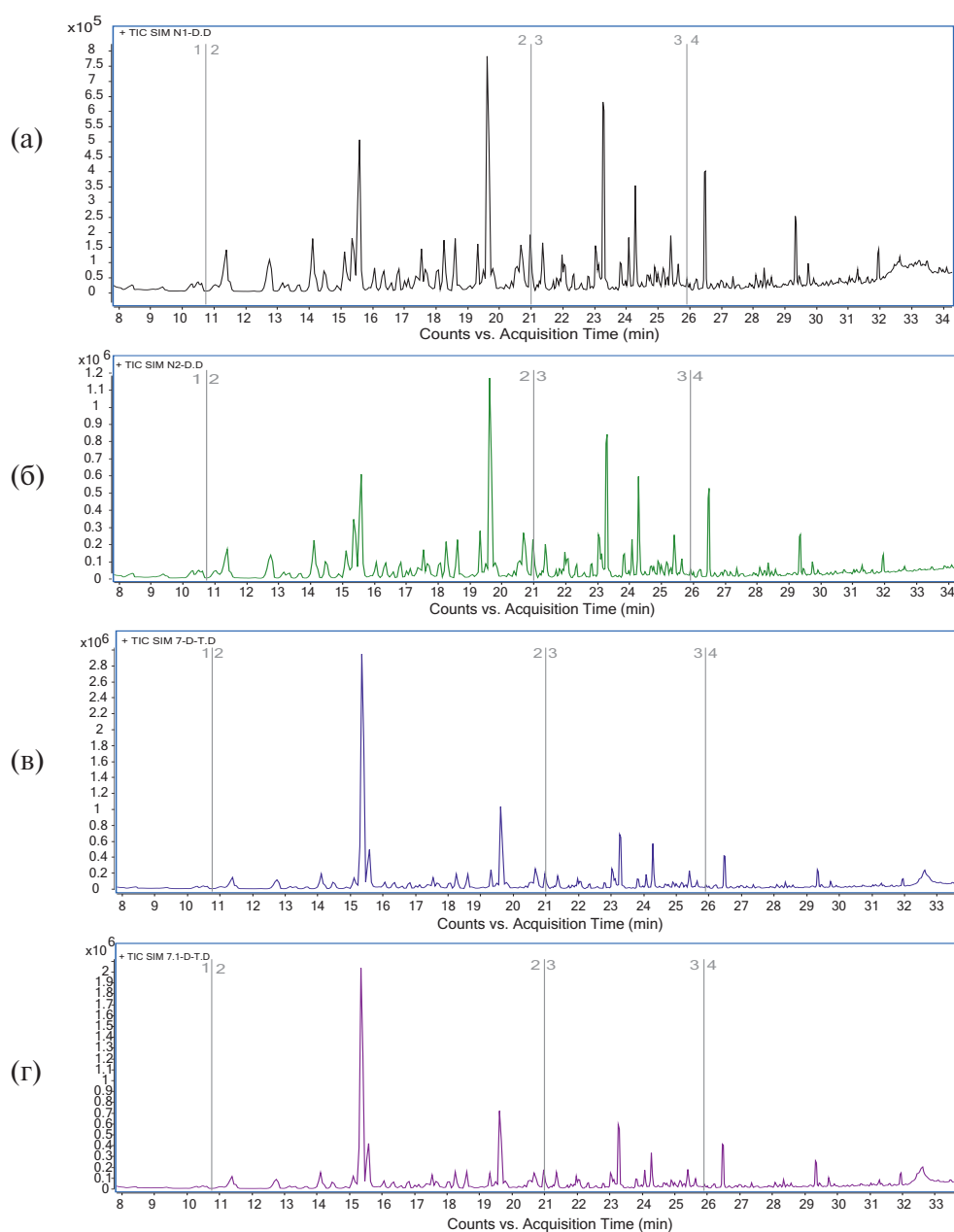


Рис. 4. Хроматограммы смеси дизтопливо–толуол при концентрации толуола 1%: а – N_1 -Rad₀, исходное дизтопливо; б – N_2 -Rad, облученное дизтопливо; в – N_3 7.1-Rad₀ – необлученное дизтопливо с толуолом; г – N_4 7.1-Rad – облученное дизтопливо с 1% толуола.

Таблица 2. Результаты хроматографического анализа состава смеси ДТ – толуол при концентрации толуола 1%

Формула	Компонент	мг/л				%			
		N ₁ -Rad ₀ , исходное ДТ	N ₂ -Rad, облученное ДТ (200 ч)	N ₃ (7.1-Rad ₀), необлученное ДТ с толуолом	N ₄ (7.1-Rad), облученное ДТ с 1% толуола (288 ч)	N ₁ -Rad ₀ , исходное ДТ	N ₂ -Rad, облученное ДТ (200 ч)	N ₃ (7.1-Rad ₀), необлученное ДТ с толуолом	N ₄ (7.1-Rad), облученное ДТ с 1% толуола (288 ч)
C ₆ H ₁₄	<i>n</i> -Гексан	125	175	183	111	0.013	0.017	0.018	0.011
C ₆ H ₆	Бензол	86	261	97	56	0.009	0.026	0.010	0.006
C ₇ H ₁₆	<i>n</i> -Гептан	2218	2663	1948	1453	0.222	0.266	0.195	0.145
C ₇ H ₈	Толуол	777	1475	12264	7990	0.078	0.147	1.226	0.799
C ₈ H ₁₈	<i>n</i> -Октан	6306	7146	5050	4318	0.631	0.715	0.505	0.432
C ₈ H ₁₀	Этил- бензол	445	795	602	319	0.045	0.080	0.060	0.032
C ₈ H ₁₀	<i>m</i> + <i>n</i> -Ксилол	1678	3007	2291	1219	0.168	0.301	0.229	0.122
C ₉ H ₂₀	<i>n</i> -Нонан	9396	10357	7621	6936	0.940	1.036	0.762	0.694
C ₈ H ₁₀	<i>o</i> -Ксилол	647	1194	947	509	0.065	0.119	0.095	0.051
C ₈ H ₈	Стирол	621	1108	911	476	0.062	0.111	0.091	0.048
C ₉ H ₁₂	Изопропил- бензол	194	340	255	178	0.019	0.034	0.026	0.018
C ₉ H ₁₂	<i>n</i> -Пропил- бензол	531	872	683	382	0.053	0.087	0.068	0.038
C ₉ H ₁₂	1,3,5-Три- метилбензол	3861	6609	5619	2886	0.386	0.661	0.562	0.289
C ₁₀ H ₂₂	<i>n</i> -Декан	23489	28607	19635	16726	2.349	2.861	1.963	1.673
C ₁₀ H ₁₄	<i>трет</i> -Бутил- бензол	283	509	431	201	0.028	0.051	0.043	0.020
C ₉ H ₁₂	1,2,4-Три- метилбензол	2812	4730	3945	1949	0.281	0.473	0.394	0.195
C ₁₀ H ₁₄	<i>втор</i> -Бутил- бензол	217	102	131	121	0.022	0.010	0.013	0.012
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Изопропил- толуол	186	228	98	143	0.019	0.023	0.010	0.014
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Бутил- бензол	309	401	295	227	0.031	0.040	0.029	0.023
C ₁₀ H ₈	Нафталин	14	14	13	11	0.001	0.001	0.001	0.001

Таблица 3. Результаты хроматографического анализа состава смеси дизтопливо–толуол при концентрации толуола 3 и 5%. N_{15} – исходное ДТ, облученное 360; N_{14} – смесь 5% толуол–ДТ, облученная 360 ч; N_{10} – смесь 3% толуол–ДТ, облученная 360 ч

Формула	Компонент	N_{15}	N_{14}	N_{10}	N_{15}	N_{14}	N_{10}
		мг/л			%		
C_6H_{14}	<i>n</i> -Гексан	251	343	292	0.03	0.03	0.03
C_6H_6	Бензол	137	72	70	0.01	0.01	0.01
C_7H_{16}	<i>n</i> -Гептан	1442	1705	1660	0.14	0.17	0.17
C_7H_8	Толуол	607	33165	26601	0.06	3.32	2.66
C_8H_{18}	<i>n</i> -Октан	4095	4605	4633	0.41	0.46	0.46
C_8H_{10}	Этилбензол	344	297	312	0.03	0.03	0.03
C_8H_{10}	<i>m+n</i> -Ксилол	1310	1106	1163	0.13	0.11	0.12
C_9H_{20}	<i>n</i> -Нонан	7950	8763	8762	0.80	0.88	0.88
C_8H_{10}	<i>o</i> -Ксилол	647	566	593	0.06	0.06	0.06
C_8H_8	Стирол	653	550	590	0.07	0.06	0.06
C_9H_{12}	Изопропилбензол	97	91	101	0.01	0.01	0.01
C_9H_{12}	<i>n</i> -Пропилбензол	234	189	219	0.02	0.02	0.02
C_9H_{12}	1,3,5-Триметилбензол	1926	1545	1488	0.19	0.15	0.15
$C_{10}H_{22}$	<i>n</i> -Декан	11949	11599	12902	1.19	1.16	1.29
$C_{10}H_{14}$	<i>трет</i> -Бутилбензол	1.25	1.49	6.21	0.00	0.00	0.00
C_9H_{12}	1,2,4-Триметилбензол	1273	955	1155	0.13	0.10	0.12
$C_{10}H_{14}$	<i>втор</i> -Бутилбензол	89	76	85	0.01	0.01	0.01
$C_{10}H_{14}$	<i>n</i> -Изопропилтолуол	89	74	84	0.01	0.01	0.01
$C_{10}H_{14}$	<i>n</i> -Бутилбензол	267	253	282	0.03	0.03	0.03
$C_{10}H_8$	Нафталин	146	125	137	0.01	0.01	0.01

Таблица 4. Результаты хроматографического анализа состава исходного ДТ: N_1 – исходное ДТ; N_2 – сразу после 200 ч облучения; N_3 – через 2 месяца через 200 ч облучения

Формула	Компонент	N_1		N_2		N_3	
		мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%
C_6H_6	Бензол	86	0.009	261	0.026	161	0.02
C_7H_{16}	<i>n</i> -Гептан	2218	0.222	2663	0.266	1918	0.19
C_7H_8	Толуол	777	0.078	1475	0.147	1125	0.11
C_8H_{18}	<i>n</i> -Октан	6306	0.631	7146	0.715	5445	0.54
C_8H_{10}	Этилбензол	445	0.045	795	0.080	565	0.06
C_8H_{10}	<i>m+n</i> -Ксилол	1678	0.168	3007	0.301	2184	0.22
C_9H_{20}	<i>n</i> -Нонан	9396	0.940	10357	1.036	10379	1.04
C_8H_{10}	<i>o</i> -Ксилол	647	0.065	1194	0.119	1046	0.10
C_8H_8	Стирол	621	0.062	1108	0.111	1039	0.10
C_9H_{12}	Изопропилбензол	194	0.019	340	0.034	137	0.01
C_9H_{12}	<i>n</i> -Пропилбензол	531	0.053	872	0.087	348	0.03
C_9H_{12}	1,3,5-Триметилбензол	3861	0.386	6609	0.661	2929	0.29

Таблица 4. (окончание)

Формула	Компонент	N ₁		N ₂		N ₃	
		мг/л	%	мг/л	%	мг/л	%
C ₁₀ H ₂₂	<i>n</i> -Декан	23489	2.349	28607	2.861	17941	1.79
C ₁₀ H ₁₄	<i>трет</i> -Бутилбензол	283	0.028	509	0.051	258	0.03
C ₉ H ₁₂	1,2,4-Триметилбензол	2812	0.281	4730	0.473	1856	0.19
C ₁₀ H ₁₄	<i>втор</i> -Бутилбензол	217	0.022	102	0.010	124	0.01
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Изопропилтолуол	186	0.019	228	0.023	135	0.01
C ₁₀ H ₁₄	<i>n</i> -Бутилбензол	309	0.031	401	0.040	405	0.04
C ₁₀ H ₈	Нафталин	14	0.001	14	0.001	253	0.03

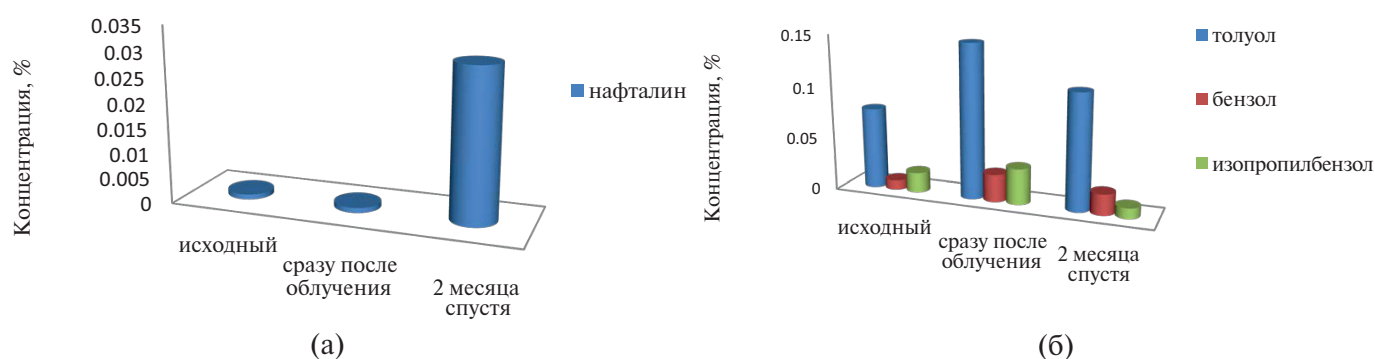


Рис. 5. Концентрация (%) ароматических углеводородов (а – нафталин; б – толуол, бензол и изопропилбензол) в ДТ: исходном, сразу после облучения и через 2 месяца после гамма-облучения. $T = 20^{\circ}\text{C}$, $P = 0.07$ Гр/с.

которой дает низкие выходы водорода и акцепторных радикалов. Перенос энергии возбуждения и перенос заряда могут происходить внутри одной молекулы или между алифатической группой одной молекулы и ароматической группой другой. На это указывают потенциалы ионизации и низкие уровни возбуждения соответствующих групп [20, 21].

ВЫВОДЫ

Выполненные исследования показывают, что с увеличением поглощенной дозы увеличиваются вязкость, плотность, температура вспышки и воспламенения дизтоплива, что отрицательно влияет на его технические свойства. Иодные числа уменьшаются, что объясняется процессами полимеризации. В результате окисления и полимеризации в ДТ образуются смолистые отложения. Высокая вязкость увеличивает выбросы дыма и расход топлива при сгорании, что приводит к снижению эффективности двигателя. В результате нарушается процесс сгорания, увеличивается количество продуктов неполного сгорания топлива, в деталях образуется нагар. Топливо высокой плотности вызывает увеличение скорости износа запасных частей транспорта. Температура воспламенения ДТ должна находиться в пределах $69\text{--}119^{\circ}\text{C}$, что характеризует устойчивую горючую способность

ДТ и отражает возможность образования его парами взрывоопасных смесей с воздухом. ДТ должно иметь низкую температуру самовоспламенения и малое время задержки воспламенения. Температура воспламенения ДТ ниже нормы создает опасность пожара, а при превышении нормы воспламенения – взрывов из-за высокой концентрации образующихся паров топлива. Это называется детонацией и приводит к преждевременному выходу двигателя из строя. Простые молекулярные компоненты – *n*-парафины – легко воспламеняются в дизельном двигателе, но ароматические углеводороды имеют более стабильную кольцевую структуру и поэтому требуют более высокую температуру и давление для воспламенения. Радиационная стойкость аренов обусловлена их относительно низкой начальной энергией возбуждения. Тoluол увеличивает радиационную стойкость ДТ. При оптимальной концентрации толуола 1% в ДТ вязкость и плотность мало изменяются с увеличением поглощенной дозы. Изучение кинетики постполимеризационных процессов сразу после облучения и спустя некоторое время после облучения показывает, что скорость процесса и его доля в общей полимеризации зависят от продолжительности облучения, начальной плотности смеси и дозы. Добавив антирады, можно создать более радиационно-стойкий состав ДТ.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Джаббарова Л.Ю., Мустафаев И.И., Ибадов Н.А. // ЖПС. 2022. Т. 89. № 3. С. 315–322.
2. Jabbarova L.Y., Mustafayev I.I., Akperov R.Y., Mirzaeva A.S. // J. Radiat. Res. 2022. Vol. 9. N 1. P. 58–63.
3. Jabbarova L.Y., Mustafayev I.I. // Radiochemistry. 2021. Vol. 63. N 3. P. 373.
4. Jabbarova L.Y., Mustafayev I.I. // High Energy Chem. 2021. Vol. 55. P. 37.
5. Джаббарова Л.Ю., Мустафаев И.И. // ЖПС. 2018. Т. 85. № 4. С. 634.
6. Jabbarova L.Y., Mustafayev I.I. // J. Energy, Environ. Chem. Eng. USA. 2017. vol. 2. № 4. P. 41.
7. Джаббарова Л.Ю., Мустафаев И.И., Меликова С.З. // Междунар. журн. прикл. и фундам. исслед. 2017. №7 (2). С. 239.
8. Jabbarova L.Y., Ibadov N.A., Mustafayev I.I., Mirzaeva A.S. // IV Int. Scientific and Practical Conf. "Science and Technologies." Kazakhstan, 2022. P. 135–139.
9. Ezeldin M., Younis F., Elamin A.A., Suliman Y.S., Sheshko T.F., Abdallah N.E., Cherednichenko A.G. // J. Mex. Chem. Soc. 2021. Vol. 15. P. 31.
10. Ezeldin M., Ishak C.Y., Eljack M., Milad M. // Chem. Methodol. 2018. Vol. 3. P. 64–74.
11. Ezeldin M., Masaad A.M., Abualreish M.J.A., Ishak C.Y. // Orient. J. Chem. 2017. Vol. 33. P. 2085–2089.
12. Филатов И.Е., Первова М.Г. // Горение и плазмохимия. 2011. Т. 9. № 3. С. 227.
13. Пономарев А.В., Холодкова Е.М., Ершов Б.Г. // Радиационная физика и химия. 2012. Т. 81. № 9. С. 1440.
14. Zannis T.C., Hountalas D.T., Papagiannakis R.G. // Energy Fuels. 2007. Vol. 21. P. 2642–2654.
15. Luana D.S., Andrade W.A.P., Ivone C.C., Celina M.S. // Radiat. Phys. Chem. 2015. Vol. 115. P. 196–201.
16. Osman M.E., Sheshko T.F., Dipheko T.D., Abdallah N.E., Hassan Ishak E.A. // Int. J. Green Energy. 2021. Vol. 18. P. 1396–1404.
17. Yasin M.H.M., Mamat R., Yusop A.F., Rahim R., Aziz A., Shah L.A. // Procedia Eng. 2013. Vol. 53. P. 701–706.
18. Zaykin Y.A., Zaykina R.F., Silverman J. // Radiat. Phys. Chem. 2004. Vol. 69. № 3. P. 229–238.
19. Zaykin Y.A., Zaykina R.F., Mirkin G. // Radiat. Phys. Chem. 2003. Vol. 67. P. 305–309.
20. Милинчук В.К., Клишипонт Э.Р., Тупиков В.И. Основы радиационной стойкости органических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1994. 256 с.
21. Фельдиак Г. Радиационная химия углеводородов / Пер с англ. А.М. Кабакчи. М.: Энергоатомиздат, 1985. 303 с.

Influence of Ionizing Radiation on Physicochemical and Operational Properties of Diesel Fuel with the Added Toluene

L. Y. Jabbarova^{a*}, I. I. Mustafaev^b, A. S. Mirzaeva^a, and N. A. Ibadov^a

^aInstitute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, AZ1143 Azerbaijan

^bAzerbaijan University of Architecture and Construction, Baku, AZ1143 Azerbaijan

*e-mail: clala@mail.ru

Received May 25, 2024; revised July 9, 2024; accepted July 10, 2024

Radiation resistance of diesel fuel with the addition of various percentages of toluene was studied. The experiments were carried out for a long time to study the postpolymerization processes. The kinetics of processes during irradiation of pure diesel fuel was studied at the temperature $T = 20^\circ\text{C}$ and dose rate $P = 0.07\text{ Gy/s}$ in the range of absorbed doses $D = 15\text{--}150\text{ kGy}$, and a mixture of toluene with diesel fuel was irradiated within the absorbed dose range $D = 24\text{--}90\text{ kGy}$ at a toluene concentration of 1, 3, and 5 vol %. Analysis by gas chromatography–mass spectrometric (GC/MS) was performed, and the density, viscosity, and iodine number of the diesel fuel before and after irradiation at various absorbed doses were determined. The kinetics of postpolymerization processes after the end of irradiation shows that the rate of the process and its share in the total polymerization depend on the irradiation time, initial mixture density, and dose. By adding additives (antirads), one can choose the composition of diesel fuel that will better withstand radiation exposure. It is necessary to find the optimal concentration of toluene in the composition of diesel fuel, at which the viscosity and density will not change with an increase in the absorbed dose.

Keywords: diesel fuel, toluene, γ -radiation, gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS)