

Влияние радиационного излучения и температуры на жидкие органические топлива

Л. Ю. Джаббарова[✉], *И. И. Мустафаев*

Институт Радиационных Проблем, Национальная Академия Наук Азербайджана, г. Баку, Азербайджанская республика, e-mail: clala@mail.ru

Поступила в редакцию: 26.04.2020 г., после доработки: 14.06.2020 г., принята в печать: 18.06.2020 г.

Аннотация – Способность топлива сохранять свои свойства в условиях эксплуатации, в том числе в условиях повышенных температур и различных видов излучения имеет важное практическое значение, поскольку топливо с нестабильными свойствами представляет серьезную опасность. Представлены результаты исследования воздействия гамма-излучения и температуры на изменение физико-химических свойств трех видов жидкого органического топлива – бензина АИ-92, бензина АИ-95 и дизельного топлива, полученных из нефтей Азербайджана. Лабораторные исследования выполнены на гамма-источнике ^{60}Co при мощности дозы $P = 0,18$ Гр/с при различных поглощенных дозах $D = 15\text{--}150$ кГр в температурном диапазоне от 50 до 250°C. В результате гамма-радиолиза бензина и дизельного топлива образуются газообразные продукты – водород и углеводороды $\text{C}_2\text{--}\text{C}_7$ фракций. Рассчитаны средние радиационно-химические выходы газов, образовавшихся в результате гамма-радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива при комнатной температуре в изученном диапазоне поглощенных доз. Данные анализа исходного и облученного ионизирующим излучением бензина АИ-95 с помощью экспресс-анализатора Zeltex ZX-440 XL показывают ухудшение технических свойств топлива, особенно значительные по истечении 4 месяцев после облучения. Основными химическими реакциями, происходящими в топливе под влиянием указанных факторов, по всей вероятности, являются дегидрогенизация и свободно-радикальные цепные реакции, которые могут приводить к полимеризации и образованию нежелательных химических соединений, что в целом значительно ухудшает рабочие характеристики жидкого топлива.

Ключевые слова: жидкое органическое топливо, гамма-радиолиз, бензин АИ-92, бензин АИ-95, дизельное топливо, радиационно-химический выход.

Effect of ionizing radiation and temperature on liquid organic fuels

Lala Y. Jabbarova[✉], *and Islam I. Mustafaev*

Institute of Radiation Problems, National Academy of Sciences of Azerbaijan, Baku, Republic of Azerbaijan, e-mail: clala@mail.ru

Received: April 26, 2020, Revised: June 14, 2020, Accepted: June 18, 2020

Abstract – A fuel ability to maintain its characteristics under operating conditions is of great practical importance, including operating under exposure to elevated temperatures and various types of radiation, because of the danger of fuel with unstable properties. The paper presents results of studying effects of gamma radiation and temperature on changes in physicochemical properties of three types of liquid organic fuel – AI-92 gasoline, AI-95 gasoline and diesel fuel obtained from Azerbaijani oils. Laboratory studies have been carried out on ^{60}Co gamma source at a dose rate of $P = 0.18 \text{ Gy/s}$ at absorbed doses of $D = 15\text{--}150 \text{ kGy}$ in the temperature range from 50 to 250°C. Gamma radiolysis of gasoline and diesel fuel results in formation of gaseous products, mainly, hydrogen and $\text{C}_2\text{--C}_7$ hydrocarbon fractions. The average radiation-chemical yields of gases formed in the course of gamma radiolysis of AI-92 gasoline and diesel fuel at room temperature in the studied range of absorbed doses are calculated. The initial and irradiated samples of AI-95 gasoline are analyzed with the help of Zeltex ZX-440 XL express analyzer, and an obvious deterioration in technical characteristics of the fuel is found, especially after 4 months of its storage after irradiation. The most likely occurring chemical reactions in the fuel under the influence of the irradiation and temperature are dehydrogenation and free radical chain reactions, which can lead to polymerization and formation of undesirable chemical compounds, which can result in significant impairing of the liquid fuel performance.

Keywords: liquid organic fuel, gamma radiolysis, AI-92 gasoline, AI-95 gasoline, diesel fuel, radiation-chemical yield.

ВВЕДЕНИЕ

Жидкие органические топлива являются смесями органических соединений различного состава, которые должны сохранять свои рабочие свойства в течение всего срока их эксплуатации [1]. Однако в процессе их работы под воздействием энергии излучения может происходить изменение их физических и химических свойств [2]. Действие излучения на топливо может вызывать различные реакции химической трансформации, приводящие к разрыву и замещению химических связей, образованию свободных радикалов, выделению газов, образованию двойных связей и полимеризации. Поэтому возникает необходимость добавлять к физическим и химическим характеристикам топлива требование к его радиационной стойкости, поскольку топливо с нестабильными свойствами представляет опасность, повышая риск возникновения аварий.

Воздействие облучения на общий состав топлива, установление связи между требованиями к составу топлива и его радиационной стойкостью представляет практический интерес. Методы определения радиационной стойкости основаны на облучении топлива и последующем определении произошедших в нем изменений. Под стабильностью подразумевается способность органического топлива сохранять свое химическое строение в условиях эксплуатации при изменении температуры и различных видов излучения.

Значительное влияние на стабильность моторных топлив оказывает продолжительность действия на них факторов, перечисленных выше. Существенно увеличивают скорость образования смол в топливах солнечный свет и радиация.

Как известно, процессы, возникшие в результате радиолиза, могут продолжать развиваться в течение длительного времени после прекращения

облучения, что в конечном счете приводит к изменению состава топлива. В топливах, содержащих большое количество непредельных углеводородов в своем составе, в процессе хранения несколько увеличивается коксуемость и ухудшается цвет. В зоне высокой температуры (клапаны, днище поршня, камера сгорания, канавки поршневых колец) образующиеся смолистые отложения постепенно уплотняются, частично выгорают, образуют хрупкие и твердые нагары, которые в основном состоят из углерода. При большом накоплении нагаров в двигателе повышается износ, ухудшается процесс сгорания, увеличивается расход топлива. В результате радиолиза при температуре окружающего воздуха эксплуатационные свойства нефтяных топлив и масел ухудшаются. Это становится проблемой, так как от топлива требуется высокая термическая стабильность. В условиях эксплуатации особенно отрицательную роль могут играть также органические неуглеводородные примеси, минеральные примеси - пыль, продукты коррозии и износа металлов, присадки, содержащие металлы, фосфор, серу. При повышенной температуре негативный эффект облучения топлив, находящихся в контакте с кислородом воздуха, проявляется гораздо сильнее, чем в отсутствии температуры. В последние годы проявляется повышенный интерес к окислению и стабилизации реактивных топлив. Это обусловлено ужесточением требований к эксплуатационным характеристикам топлив с ростом теплонапряженности авиационных двигателей.

Ранее приводились экспериментальные исследования радиационно-химического поведения синтетической нефти и масляной фракции из нефтебитуминозной породы [3–8]. А также изучалось воздействие радиации на эксплуатационные характеристики моторных топлив в статических условиях до и после облучения при комнатной температуре [9–14]. В нашей предыдущей работе было изучено влияние ионизирующего гамма-излучения на плотность, вязкость, йодное число и изменение структуры смесей гексан-гексен [15].

В данной работе мы сосредоточились на изучении совместного действия ионизирующего излучения и температуры на изменение свойств трех видов жидкого органического топлива – бензина АИ-92, бензина АИ-95 и дизельного топлива.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объектами исследования являлись образцы бензина АИ-92, АИ-95 и дизельного топлива, полученные из нефтей Азербайджана.

Образцы бензина и дизельного топлива ($V = 2,5$ мл) помещались в стеклянные ампулы, запаиваемые в вакууме, и облучались при различной температуре под действием γ -излучения от источника ^{60}Co типа МРХ γ -30 при мощности дозы $P = 0,18$ Гр/с, диапазон поглощенных доз варьировался от 15 до 150 кГр. Было исследовано влияние поглощенной дозы и температуры на изменение свойств указанных видов топлива.

Образующиеся газообразные продукты анализировали газохроматографическим методом на газовых хроматографах «Цвет-102» для анализа углеводородов C_2 – C_7 и «Газохром-3101» для анализа H_2 , CO , CH_4 .

Мощность дозы γ -излучения определяли этиленовым и ферросульфатным дозиметрами, результаты которых согласуются в пределах 12–15%. Скорости образования продуктов, а также разложения исходных веществ определяли путем измерений хроматографических концентраций (c) анализируемых веществ во времени (τ) и рассчитывали по формуле: $W = c/\tau$.

Радиационно-химические выходы продуктов определяли по формуле:

$$G = \frac{W_p}{p} 10^2,$$

где W_p – скорость реакции, p – мощность дозы.

Для определения октанового числа и других характеристик бензина применяли лабораторный экспресс-анализатор топлив Zeltex ZX-440 XL (фирма Zeltex, США).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Температурные зависимости концентрации газообразных продуктов (H_2 , CH_4 и различных углеводородов состава C_2 – C_7), образовавшихся при гамма-радиолизе бензина АИ-92 [9] и дизельного топлива в диапазоне температур от 50 до 200°C, приведены на рисунках 1 и 2, соответственно.

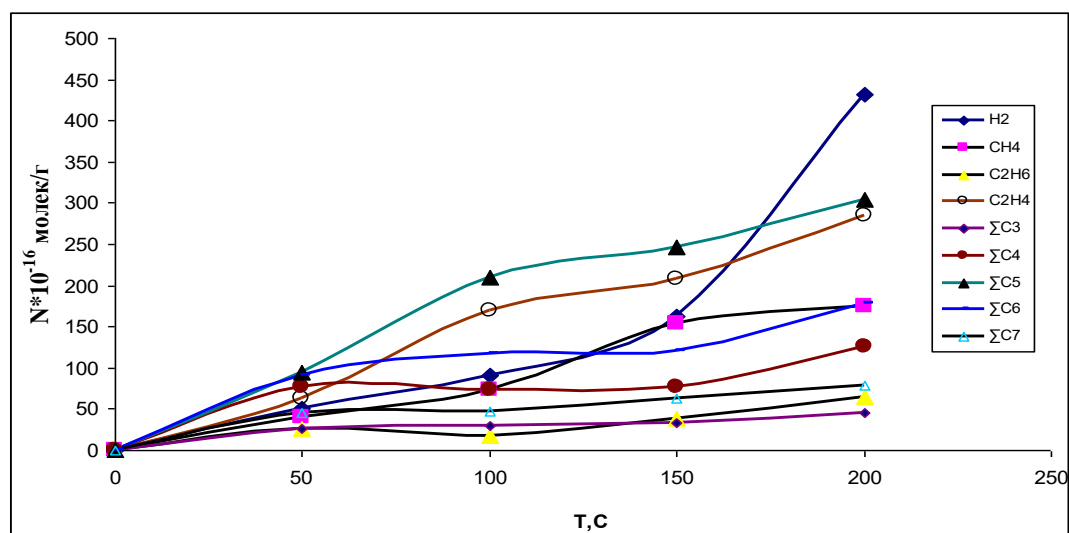


Рис. 1. Температурные зависимости образования газов при гамма-радиолизе бензина АИ-92 [9].

Fig. 1. Temperature dependences of gas products formation in gamma-radiolysis of gasoline AI-92 [9].

Сравнение температурных зависимостей образования газообразных продуктов гамма-радиолиза бензина и дизельного топлива, приведенных на рис. 1 и 2, показывает, как общие черты, так и различия в поведении кривых для двух исследованных видов топлива. В бензине (рис. 1) с ростом температуры наблюдается увеличение выхода водорода и C_2 – C_5 фракций, причем после 150°C выход водорода резко возрастает и превышает выход всех других продуктов в 1,5 раза и более. Выход C_6 – C_7 углеводородов незначительный и практически не меняется. По-видимому, рост температуры стимулирует образование в бензине алкенов и ароматических углеводородов.

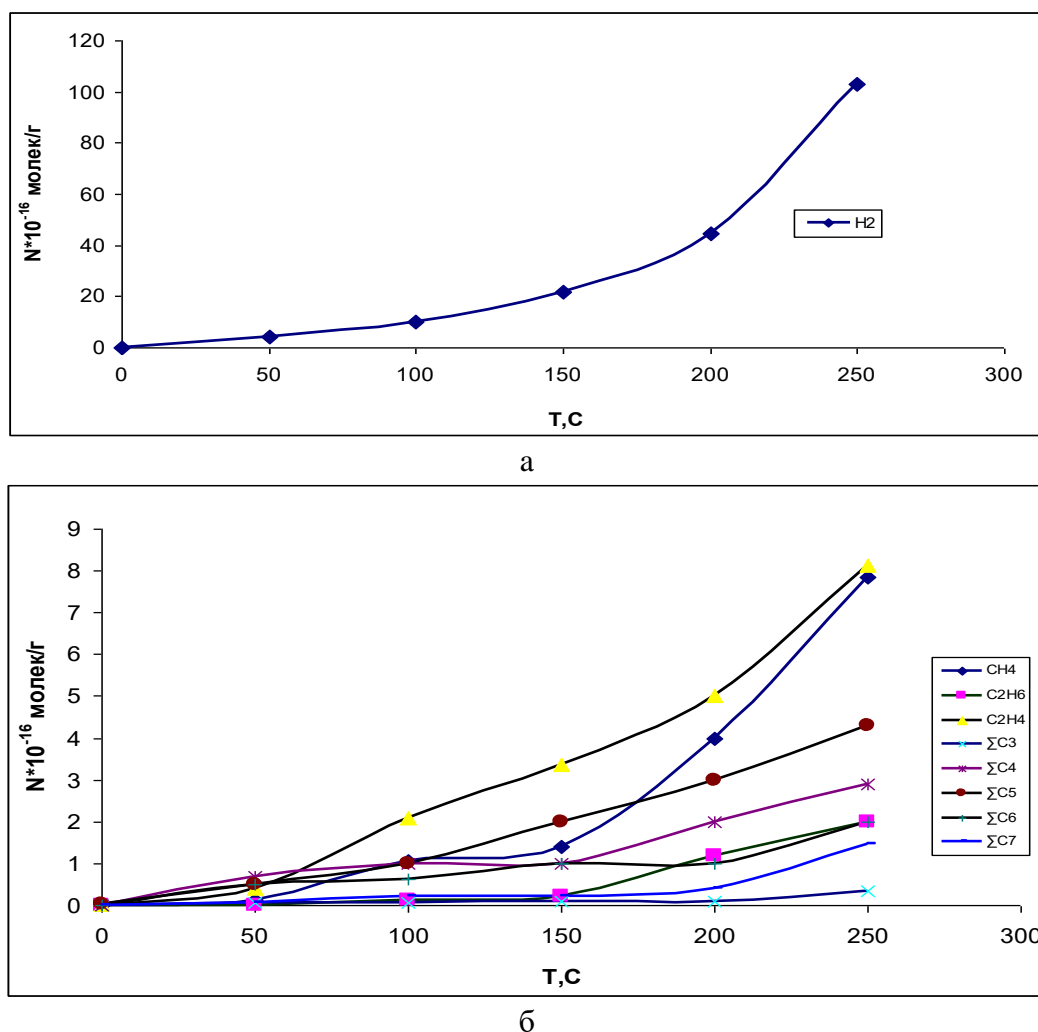


Рис. 2. Температурные зависимости образования водорода (а) и других газов (б) при гамма-радиоллизе дизельного топлива.

Fig. 2. Temperature dependences of formation of hydrogen (a) and other gaseous products in gamma-radiolysis of diesel fuel.

В дизельном топливе (рис. 2) с ростом температуры также растет выход водорода (наибольший выход среди других продуктов, рис. 2а) и выход фракций C_2 – C_5 (рис. 2б), но по сравнению с бензином значения выходов значительно ниже (для водорода – на порядок ниже, чем в случае радиолиза бензина). При $\leq 200^\circ C$ кривые выхода C_2 – C_5 углеводородов имеют малый наклон, но он резко возрастает при более высоких температурах облучения. Выход C_6 – C_7 углеводородов также незначителен.

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что в результате воздействия гамма-излучения на бензин и дизельное топливо среди газообразных продуктов увеличивается количество ненасыщенных углеводородов.

В исследованиях влияния температуры на радиолитические превращения углеводородов топлива, как правило, выделяют два типа реакций – низкотемпературные нецепные реакции и высокотемпературные цепные реакции. При низкотемпературном облучении и низких степенях конверсии углеводородов главной реакцией является дегидрогенизация. Степень

превращения зависит от суммарной поглощенной энергии и от мощности дозы. Высокотемпературный радиолиз обычно представляет собой цепной процесс распада свободных радикалов, когда никакие иные реакции, типичные для низкотемпературного радиолиза, кроме стимулированного температурой цепного разложения радикалов, не играют роли. Поскольку развитие цепного процесса осуществляется путем однотипного расщепления радикалов, то продукты крекинга в обоих режимах одинаковы.

В таблице 1 представлены рассчитанные средние радиационно-химические выходы газов, образовавшихся в результате гамма-радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива при комнатной температуре в диапазоне поглощенных доз 15–150 кГр. На рисунках 2 и 3 приведены вычисленные радиационно-химические выходы газов, образовавшихся в результате гамма-радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива в диапазоне температур 50–200°C при поглощенной дозе 0,64 кГр, соответственно.

Таблица 1. Средние радиационно-химические выходы (молек/100 эВ) газов после гамма-радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива при комнатной температуре в диапазоне поглощенных доз 15–150 кГр при мощности дозы $P = 0.18$ Гр/с

Table 1. Average radiation-chemical yields (molecules/100 eV) of gases after gamma-radiolysis of gasoline AI-92 and diesel fuel at room temperature in the absorbed dose range of 15–150 kGy at a dose rate of $P = 0.18$ Gy/s

Газы	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	ΣC ₃	ΣC ₄	ΣC ₅	ΣC ₆	ΣC ₇
Бензин	0.44	0.007	0.004	0.005	0.005	0.132	0.322	0.091	0.006
Дизельное топливо	0.626	0.0008	0.0004	0.0019	0.0005	0.0014	0.0026	0.0069	0.0005

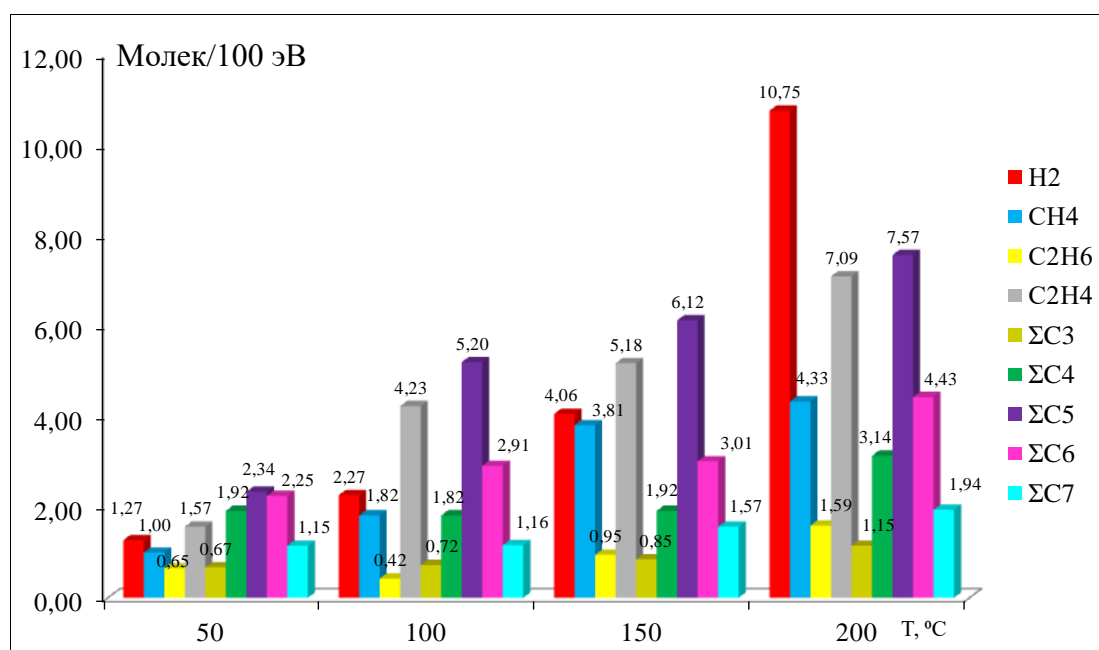


Рис. 2. Радиационно-химические выходы (молек/100 эВ) газов после гамма-радиолиза бензина АИ-92 при поглощенной дозе 0,64 кГр в диапазоне температур 50–200°C.

Fig. 2. Radiation-chemical yields (molecules/100 eV) of gases after gamma-radiolysis of AI-92 gasoline AI-92 at absorbed dose of 0.64 kGy in the temperature range of 50–200°C.

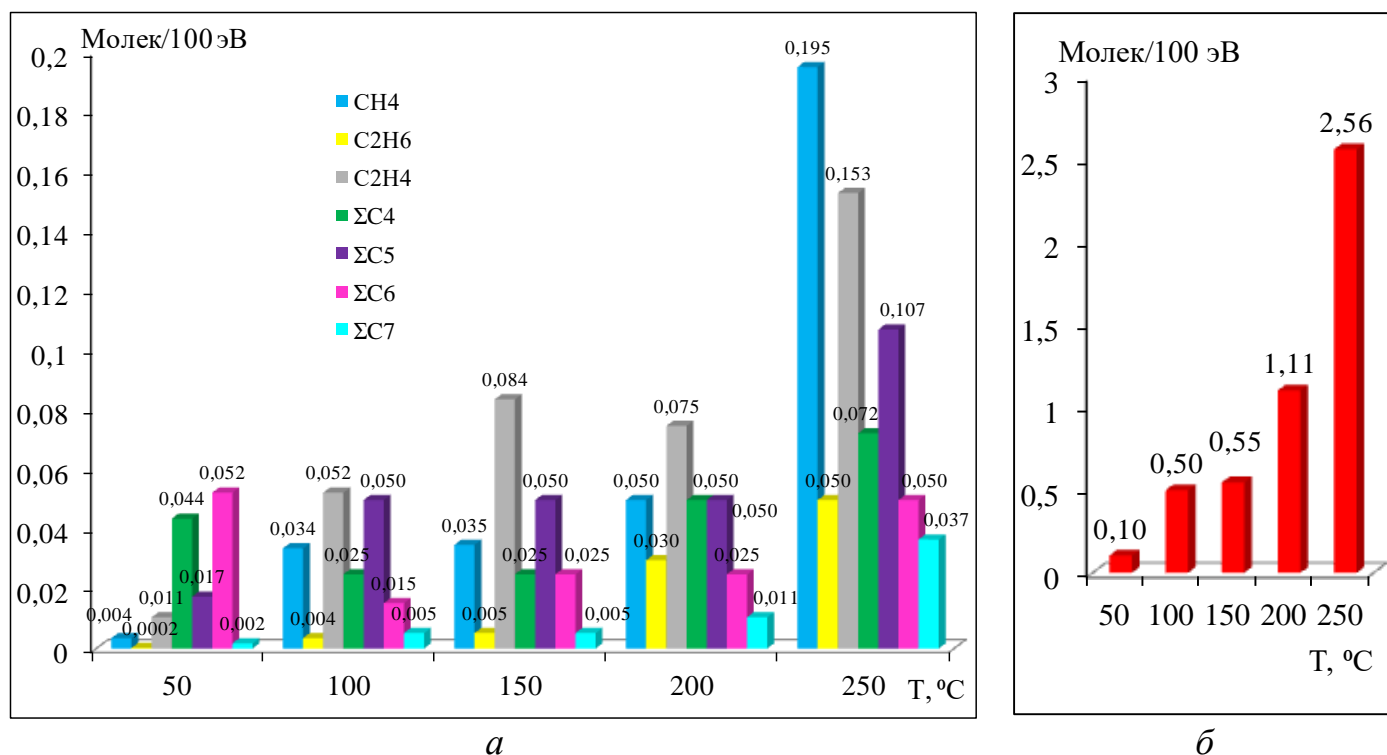


Рис. 3. Радиационно-химические выходы (молек/100 эВ) газов после гамма-радиолиза дизельного топлива при поглощенной дозе 0,64 кГр в диапазоне температур 50–200°C. (а – CH₄, C₂H₆, C₂H₄, ΣC₃, ΣC₄, ΣC₅, ΣC₆, ΣC₇; б – H₂).

Fig. 3. Radiation-chemical yields (molecules/100 eV) of gases after gamma-radiolysis of diesel fuel at an absorbed dose of 0.64 kGy in the temperature range of 50–200°C. (a – CH₄, C₂H₆, C₂H₄, ΣC₃, ΣC₄, ΣC₅, ΣC₆, ΣC₇; б – H₂).

Проведенные исследования показали, что при высокотемпературном радиолизе при поглощенной дозе 0,64 кГр в топливах влияние температуры на ход ионно-молекулярных радиолитических реакций может проявляться вследствие температурной зависимости скорости реакций и термической нестабильности свободных радикалов.

Далее было изучено влияние гамма-излучения на изменение свойств бензина АИ-95 с помощью экспресс-анализатора ZX-440 XL. Для сравнения были взяты три образца: 1) исходный бензин АИ-5 при 20°C, 2) образец после гамма-облучения дозой 78 кГр, и 3) образец, облученный дозой 53 кГр и хранившийся после этого в течение четырех мес. Данные приведены в таблице 2.

Из таблицы видны изменения, произошедшие в составе бензина АИ-95 после воздействия на него гамма-излучения, особенно после облучения и продолжительного хранения. Так, после облучения и четырех мес хранения плотность бензина возросла (от 761, до 847,90 кг/м³), температура кипения увеличилась, общее число олефинов возросло более, чем в 1,5 раза (от 9,6 до 15,2% об.), октановое число понизилось, т.е. эксплуатационные свойства бензина АИ-95 в изученных условиях ухудшились.

Таблица 2. Изменение свойств бензина АИ-95 в результате гамма-радиолиза и при хранении, определенные экспресс-анализатором Zeltex ZX-440 XL

Table 2. Changes in the properties of gasoline AI-95 after gamma radiolysis and during storage, as determined by express-analyzer Zeltex ZX-440 XL

Показатели анализатора Zeltex ZX-440 XL	Исходный бензин АИ-95, Т = 20°C	Бензин АИ-95, облученный дозой D = 78 кГр Т = 20°C	Бензин АИ-95, облученный дозой D = 53 кГр после 4-х мес хранения Т = 20°C
Плотность при 15°C, кг/м ³	761,5	759,70	847,90
Этилтретбутиловый эфир, % об.	0,46	0,23	0,23
Этанол, % об.	0,8	0,8	0,8
Трет-амил-метиловый эфир, % об.	1,5	1,6	1,6
Октановое число по исследовательскому методу	95,3	95,2	93,5
Общее число ароматических соединений, % об.	38,6	38,8	38,8
Бензол, % об.	0,58	0,59	0,59
Общий кислород, % об.	1,4	1,4	1,4
Общее число олефинов, % об.	9,6	9,5	15,2
Октановое число по моторному методу	84	84	76,6
Начальная точка кипения, °С	35,3	35,2	36,8
10% бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:	56,2	57,5	45,3
50% бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:	100,2	100,7	104,5
90% бензина перегоняется при температуре, °С, не выше:	165,2	164,5	174,3

ВЫВОДЫ

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы.

1. Изучено влияние температуры на выход конечных газообразных продуктов гамма-радиолиза двух видов жидкого органического топлива – бензина АИ-92 и дизельного топлива, полученных из нефтей Азербайджана, при мощности дозы $P = 0,18$ Гр/с при поглощенных дозах в диапазоне 5–150 кГр в интервале температур 50–200°C.

2. Из температурных зависимостей выходов газообразных продуктов радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива видно, что при температуре $\leq 200^\circ\text{C}$, кривые выхода газов имеют малый температурный наклон, но он резко возрастает при более высоких температурах облучения.

3. Рассчитаны средние радиационно-химические выходы газов, образовавшихся в результате гамма-радиолиза бензина АИ-92 и дизельного топлива при комнатной температуре в диапазоне поглощенных доз 15–150 кГр.

4. Определены радиационно-химические выходы газов, образовавшихся в результате гамма-радиолиза бензина и дизельного топлива в диапазоне температур 50–200°C при поглощенной дозе 0,64 кГр.

5. Представлены данные анализа исходного и облученного бензина АИ-95 при поглощенной дозе $D = 78$ кГр на экспресс-анализаторе Zeltex ZX-440 XL. По истечению 4 месяцев после облучения происходит значительное ухудшение свойств бензина.

6. Полученные результаты дополняют имеющиеся знания в области влияния ионизирующего излучения и температуры на изменение физико-химических свойств жидких органических топлив на примере бензинов АИ-92, АИ-95 и дизельного топлива.

Дальнейшие исследования будут направлены на повышение стойкости нефтяных топлив к воздействию повышенных температур и ионизирующего излучения путем введения в состав топлива небольших количеств (0,1–10% масс.) противорадиационных препаратов, которые обеспечивают эффективную защиту материалов, подвергающихся облучению в условиях, вызывающих окислительные процессы (например, на воздухе и при повышенных температурах).

Список литературы:

1. Goetzing J.W., Thompson C.J., Brinkman D.W. (1983). Review of storage stability characteristics of hydrocarbon fuels, 1952-1982. Technical Report. United States. <https://www.osti.gov/biblio/5405802>
2. Batts B.D., Zuhdan Fathoni A. (1991). A literature review on fuel stability studies with particular emphasis on diesel oil. *Energy Fuels*, 5(1), 2 - 21. <https://doi.org/10.1021/ef00025a001>
3. Мустафаев И.И., Джаббарова Л.Ю., Набизаде З.О., Ибадов Н.Е., Ахмедбекова С.Ф. (2013). Изучение радиационно-химического превращения синтетического нефти из нефтебитуминозных пород. *Химия высоких энергий*, 53(6), 449 - 455. DOI: [10.7868/S0023119713060070](https://doi.org/10.7868/S0023119713060070)
4. Mustafaev I., Jabbarova L., Yagubov K., Gulieva N. (2004). Radiation - thermal refining of oil-bituminous rocks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 262(2), 509 - 511. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000046788.34734.96>
5. Мустафаев И.И., Джаббарова Л.Ю., Гулиева Н.Г., Рзаев Р.С., Алиева С.Ф. (2014). Влияние ионизирующего излучения на жидкие масляные фракции тяжелой битуминозной нефти. *Химия высоких энергий*, 48(5), 363 - 368. DOI: [10.7868/S002311971405010X](https://doi.org/10.7868/S002311971405010X)
6. Jabbarova L., Mustafaev I., Rzayev R., Nabizade Z., Ibadov N., Akhmedbekova S. (2014). Radiation chemical conversion of oil derived from oil-bitumen rock. *Chemistry Journal of Moldova*, 9(1), 80 - 84. DOI: [10.19261/cjm.2014.09\(1\).09](https://doi.org/10.19261/cjm.2014.09(1).09)
7. Джаббарова Л.Ю., Ибадов Н.Е. (2010). Альтернативные источники энергии. *Азербайджанский химический журнал*, 3, 128 - 132.
8. Mustafaev I., Jabbarova L., Gulieva N., Yagubov K. (2004). Radiation-thermal refining of organic parts of oil-bituminous rocks. In: *Radiation Safety Problems in the Caspian Region*.

Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol. 41. Dordrecht: Springer (pp. 141-146). https://doi.org/10.1007/1-4020-2378-2_21

9. Джаббарова Л.Ю. (2019). Радиолиз моторного топлива *Химия высоких энергий*, 53(6), 466 - 471. DOI: [10.1134/S0023119319060044](https://doi.org/10.1134/S0023119319060044)
10. Джаббарова Л.Ю., Мустафаев И.И. (2018). Высокотемпературный радиолиз дизельного топлива. *Журнал прикладной спектроскопии*, 85(4), 686 - 690.
11. Джаббарова Л.Ю., Мустафаев И.И., Меликова С.З. (2017). Влияние радиации на нефтяное топливо. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 7(2), 239 - 243.
12. Cabbarova L., Mustafaev I. (2017). Researches of Impact of Ionizing Radiation on Some Characteristics of Diesel Fuel. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 2(3), 41 - 45. DOI: 10.11648/j.jeece.20170203.11
13. Jabbarova, L.Yu., Alieva, S.M., & Melikova, S.Z. (2015). Effect of ionizing radiation on diesel fuel. *Journal of Radiation Research, Baku, Azerbaijan*, 2(2), 71 - 76.
14. Cabbarova L., Mustafaev I. (2017). Influence of radiation on technical and operational qualities of gasoline. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 2(4), 62 - 66. DOI: 10.11648/j.jeece.20170204.11
15. Джаббарова Л.Ю., Акберов Р.Я., Мустафаев И.И., Меликова С.З., Ахмедова Т.Н. (2019). Исследование влияния радиационного излучения на смеси углеводородов гексан-гексен. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*, 9, 101 - 107.

References:

1. Goetzing, J.W., Thompson, C.J., & Brinkman, D.W. (1983). Review of storage stability characteristics of hydrocarbon fuels, 1952-1982. Technical Report. United States. <https://www.osti.gov/biblio/5405802>
2. Batts, B.D., & Zuhdan Fathoni, A. (1991). A literature review on fuel stability studies with particular emphasis on diesel oil. *Energy Fuels*, 5(1), 2 - 21. <https://doi.org/10.1021/ef00025a001>
3. Mustafaev, I.I., Jabbarova, L.Yu., Nabizade, Z.O., Ibadov, N.E., & Akhmedbekova, S.F. (2013). A study of radiation-chemical conversion of synthetic oil derived from oil-bitumen rock. *High Energy Chemistry*, 47(6), 301 - 307. <https://doi.org/10.1134/S0018143913060064>
4. Mustafaev, I., Jabbarova, L., Yagubov, K., & Gulieva, N. (2004). Radiation - thermal refining of oil-bituminous rocks. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 262(2), 509 - 511. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000046788.34734.96>
5. Mustafaev, I.I., Jabbarova, L.Y., Gulieva, N.G., Rzayev, R.S., & Alieva, S.F. (2014). Effect of ionizing radiation on lube oil fractions of heavy bituminous oils. *High Energy Chemistry*, 48(5), 315 - 320. <https://doi.org/10.1134/S0018143914050105>
6. Jabbarova, L., Mustafaev, I., Rzayev, R., Nabizade, Z., Ibadov, N., & Akhmedbekova, S. (2014). Radiation chemical conversion of oil derived from oil-bitumen rock. *Chemistry Journal of Moldova*, 9(1), 80 - 84. DOI: [10.19261/cjm.2014.09\(1\).09](https://doi.org/10.19261/cjm.2014.09(1).09)
7. Jabbarova, L.Yu., & Ibadov, N.E. (2010). Alternative energy sources. *Azerbaidjanskii khimicheskii zhurnal = Azerbaijan Chemical Journal*, 3, 128 - 132 (in Russ.).
8. Mustafaev, I., Jabbarova, L., Gulieva, N., & Yagubov, K. (2004). Radiation-thermal refining of organic parts of oil-bituminous rocks. In: *Radiation Safety Problems in the Caspian Region. Nato Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences*, vol. 41. Dordrecht: Springer (pp. 141-146). https://doi.org/10.1007/1-4020-2378-2_21
9. Jabbarova, L.Yu. (2019). Radiolysis of motor fuel. *Khimiya vysokikh energii = High Energy Chemistry*, 53(6), 466 - 471 (in Russ.).
10. Jabbarova, L.Y., & Mustafaev, I.I. (2018). High-temperature radiolysis of diesel fuel. *Journal of Applied Spectroscopy*, 85(4), 686 - 690. <https://doi.org/10.1007/s10812-018-0705-6>

11. Jabbarova, L.Y., Mustafaev, I.I., & Malikova, S.Z. (2017). Influence of radiation on oil fuel. *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 7(2), 239 - 243 (in Russ.).
12. Cabbarova, L., & Mustafaev, I. (2017). Researches of Impact of Ionizing Radiation on Some Characteristics of Diesel Fuel. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 2(3), 41 - 45. DOI: 10.11648/j.jeece.20170203.11
13. Jabbarova, L.Yu., Alieva, S.M., & Melikova, S.Z. (2015). Effect of ionizing radiation on diesel fuel. *Journal of Radiation Research, Baku, Azerbaijan*, 2(2), 71 - 76.
14. Cabbarova, L., & Mustafaev, I. (2017). Influence of radiation on technical and operational qualities of gasoline. *Journal of Energy, Environmental & Chemical Engineering*, 2(4), 62 - 66. DOI: 10.11648/j.jeece.20170204.11
15. Dzhabbarova, L.Yu., Akberov, R.Ya., Mustafaev, I.I., Melikova, S.Z., & Akhmedova, T.N. (2019). Hexane-hexene hydrocarbons mixture research under the influence of radiation *Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy = International Journal of Applied and Fundamental Research*, 9, 101 - 107 (in Russ.).