

КИНЕТИКА ОБРАЗОВАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ γ -РАДИОЛИЗЕ СМЕСЕЙ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ЖИДКИЕ РАДИОАКТИВНЫЕ ОТХОДЫ

© 2020 г. У. А. Кулиева^{1*}, М. А. Курбанов¹

¹Институт радиационных проблем Национальной академии наук Азербайджана, Баку, Азербайджанская Республика

*E-mail: ulviyegulieva13@gmail.com

Поступила в редакцию 29.11.2018;

после доработки 18.03.2019;

принята в печать 20.03.2019

Исследована кинетика образования газообразных продуктов, изменение показателей кислотности (рН) и химического потребления кислорода (ХПК) при γ -радиолизе водных растворов смесей муравьиной, щавелевой и азотной кислоты – как модельной системы для изучения радиолитических превращений кислотных компонентов жидких радиоактивных отходов. Установлено, что с ростом поглощенной дозы гамма-излучения кислотность и величина ХПК снижаются из-за уменьшения концентрации органических кислот в смеси. В качестве газообразных продуктов идентифицированы CO_2 и H_2 , концентрации которых увеличиваются нелинейно с увеличением поглощенной дозы. Рассчитаны радиационно-химические выходы H_2 и CO_2 . На основе экспериментальных и литературных данных о составе жидких продуктов радиолиза водных растворов исследованных кислот проведен расчет кинетики образования газообразных продуктов с помощью программы KINET (версия 1.2.5).

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, радиационно-химические процессы, γ -излучение, кинетика, поглощенная доза.

DOI: 10.31857/S0207401X20020053

ВВЕДЕНИЕ

Водные растворы низкомолекулярных органических и неорганических кислот составляют основу жидких радиоактивных отходов (ЖРО) и отходов некоторых химических производств. Исследование радиационно-химических процессов, протекающих под действием излучения радионуклидов в ЖРО и при радиационно-химической очистке сточных вод различного происхождения, представляет интерес для оценки безопасности работы с ЖРО и оптимизации параметров радиационно-химической очистки. В процессе ядерно-энергетического цикла образуются различные типы жидких радиоактивных отходов [1]. В состав ЖРО входят более 200 различных продуктов радиоактивного распада [2]. Например, согласно данным из [3], для среднеактивных отходов наиболее значимыми источниками излучения являются изотопы ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{106}Ru и ^{239}Pu с содержанием $1 \cdot 10^{-2}$, $9 \cdot 10^{-2}$, $8 \cdot 10^{-2}$ и $3 \cdot 10^{-7}$ Ки/л соответственно. Несмотря на то, что в составе ЖРО имеются изотопы, которые излучают α - и β -частицы, основной вклад в радиационно-химические процессы в ЖРО вносит γ -излучение. В данной работе проводили экспериментальное изучение и

кинетическое моделирование образования газообразных продуктов радиолиза смесей, моделирующих ЖРО, на основе муравьиной, щавелевой и азотной кислот в водных растворах под действием γ -излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использованы водные растворы муравьиной, щавелевой и азотной кислот с концентрациями $5 \cdot 10^{-3}$ М, $4.75 \cdot 10^{-3}$ М, $0.25 \cdot 10^{-3}$ М– $2.5 \cdot 10^{-3}$ М. Используются: азотная кислота с чистотой 69% (“ВДН Prolabo”, France), муравьиная кислота с чистотой 98–100% (Шосткинский завод химреактивов, Украина), щавелевая кислота с чистотой 99% (Pharmason Biomedicinal, Китай). Состав смесей и концентрации кислот выбраны произвольно, как представляющие только часть компонентов ЖРО.

Аэрированные водные растворы указанных смесей подвергали воздействию γ -излучения от изотопа ^{60}Co в стеклянных ампулах, при комнатной температуре, в статических условиях. Мощность поглощения дозы, определенная методом ферро-сульфатной дозиметрии, составляла 0.16 Гр/с. Хи-

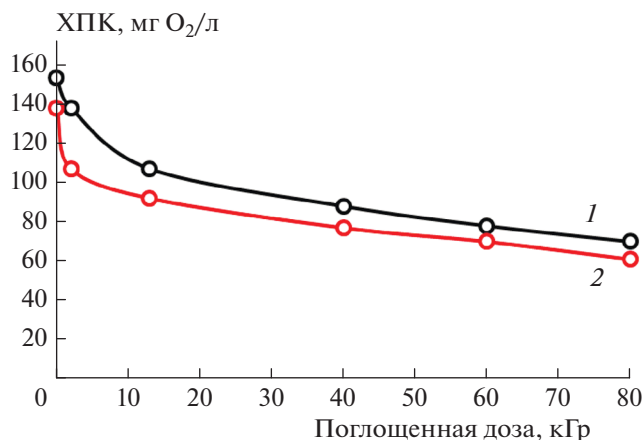


Рис. 1. Кинетика изменения показателя ХПК смеси HCOOH ($5 \cdot 10^{-3}$ М) + HOOC-COOH ($4.75 \cdot 10^{-3}$ М) + HNO_3 ($0.25 \cdot 10^{-3}$ М) (1) и смеси HCOOH ($5 \cdot 10^{-3}$ М) + HOOC-COOH ($2.5 \cdot 10^{-3}$ М) + HNO_3 ($2.5 \cdot 10^{-3}$ М) (2) в зависимости от поглощенной дозы; мощность дозы $J = 0.16$ Гр/с.

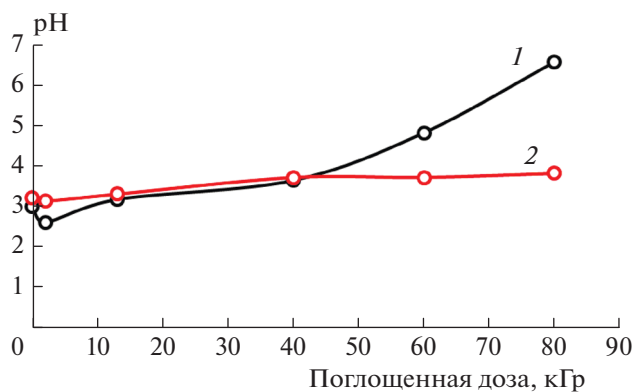


Рис. 2. Кинетика изменения показателя кислотности pH водных растворов смеси HCOOH ($5 \cdot 10^{-3}$ М) + HOOC-COOH ($4.75 \cdot 10^{-3}$ М) + HNO_3 ($0.25 \cdot 10^{-3}$ М) (1) и смеси HCOOH ($5 \cdot 10^{-3}$ М) + HOOC-COOH ($2.5 \cdot 10^{-3}$ М) + HNO_3 ($2.5 \cdot 10^{-3}$ М) (2) в зависимости от поглощенной дозы; мощность дозы $J = 0.16$ Гр/с.

мическое потребление кислорода (ХПК) определяли по стандартной методике титриметрическим методом [4]. Концентрацию газообразных продуктов радиолитического разложения измеряли: в случае водорода — на хроматографе Газохром-3101 (колонка — активированный уголь АГ-3, газ-носитель — воздух), а углекислого газа — на хроматографе Agilent 7890A (США); значения pH растворов кислот и их смесей измеряли на приборе PHS-25 (Wincon Co., Китай). Расчет кинетических параметров соответствующих процессов проводили по программе KINET (версия 1.2.5).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В данной работе экспериментально изучены общие показатели процесса радиолитического разложения — кислот-

ность (pH), характеризующую общее содержание органических и неорганических кислот и химическое потребление кислорода (ХПК), характеризующее концентрации только органических кислот.

На рис. 1 представлены кинетические кривые показателя изменения ХПК в зависимости от поглощенной дозы при облучении водных растворов смесей кислот для разных концентраций азотной кислоты. Как видно из рис. 1, показатель ХПК убывает с ростом поглощенной дозы, причем при более высокой относительной концентрации азотной кислоты (кривая 2) это убывание становится меньше, т.е. присутствие азотной кислоты в растворах приводит к снижению скорости превращения органических кислот.

Молекулы кислот имеют высокую реакционную способность по отношению к гидратированным электронам, первичным частицам радиолитического разложения воды. Кроме того, в исследованных системах присутствует адсорбированный кислород, концентрация которого составляет $\sim 2.7 \cdot 10^{-4}$ М, что меньше концентрации кислот в смеси HCOOH , $(\text{COOH})_2$ и HNO_3 . Константы скорости реакции гидратированного электрона с кислородом и молекулами кислот равны $2 \cdot 10^{10}$, $1.4 \cdot 10^8$, $2.5 \cdot 10^{10}$ и $9.7 \cdot 10^{10}$ л/моль · с для молекул O_2 , HCOOH , $(\text{COOH})_2$ и HNO_3 соответственно. Оценка соотношений скоростей реакций в условиях эксперимента указывает на преобладание скорости захвата электронов молекулами HNO_3 :

$$\omega_{\text{HNO}_3} / \omega_{\text{O}_2} \approx 2.5, \quad \omega_{\text{HCOOH}} / \omega_{\text{O}_2} \approx 0.07, \\ \omega_{(\text{COOH})_2} / \omega_{\text{O}_2} \approx 12.$$

Атомы водорода обладают относительно низкими константами скорости реакции с молекулами кислот HCOOH , $(\text{COOH})_2$ и HNO_3 , которые равны соответственно $4.4 \cdot 10^5$, $1.6 \cdot 10^4$, $4.4 \cdot 10^6$ л/моль · с, поэтому они в условиях экспериментов в основном захватываются молекулами кислорода ($k = 2 \cdot 10^{10}$ л/моль · с). OH-радикалы реагируют с молекулами муравьиной кислоты ($k = 1.4 \cdot 10^8$ л/моль · с) и относительно слабо реагируют с молекулами других кислот $(\text{COOH})_2$ и HNO_3 ($k \sim 10^6 - 10^7$ л/моль · с). Оценка соотношений скоростей соответствующих реакций в условиях экспериментов приведена ниже:

$$\frac{\omega_{\text{HCOOH}}}{\omega_{(\text{COOH})_2}} \approx 10^2, \quad \frac{\omega_{\text{HCOOH}}}{\omega_{\text{HNO}_3}} \approx 0.6 \cdot 10^2.$$

Эти оценки показывают, что уменьшение скорости превращения органических кислот в присутствии молекул HNO_3 в основном связано с акцептированием гидратированных электронов молекулами HNO_3 . На рис. 2 представлены кинетические кривые зависимости показателя pH от поглощенной дозы в процессе радиолитического разложения.

Таблица 1. Формально-кинетическая схема радиолитического разложения смесей кислот
 $\text{HCOOH} + \text{HOOC-COOH} + \text{HNO}_3$ в водном растворе [6–10]

Реакции*	K , л/моль · с
$\text{H}_3\text{O}^+ + e = \text{H}_2\text{O} + \text{H}$	$2.3 \cdot 10$
$\text{H} + \text{OH} = \text{H}_2\text{O}$	$7 \cdot 10^9$
$\text{OH} + \text{H}_2 = \text{H} + \text{H}_2\text{O}$	$3.74 \cdot 10^7$
$\text{OH} + \text{OH} = \text{H}_2\text{O}_2$	$5.3 \cdot 10^9$
$\text{OH} + \text{HO}_2 = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$7.1 \cdot 10^9$
$\text{OH} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}$	$4.06 \cdot 10^7$
$\text{OH} + \text{HO}_2^- = \text{HO}_2 + \text{OH}^-$	$5 \cdot 10^9$
$\text{OH} + \text{O}_2^- = \text{O}_2 + \text{OH}^-$	$9.96 \cdot 10^9$
$\text{OH} + e = \text{OH}^-$	$3 \cdot 10^{10}$
$\text{H} + \text{O}_2 = \text{HO}_2$	$2 \cdot 10^{10}$
$\text{H} + \text{O}_2^- = \text{HO}_2^-$	$2 \cdot 10^{10}$
$\text{H} + \text{HO}_2 = \text{H}_2\text{O}_2$	$2 \cdot 10^{10}$
$\text{H} + \text{H} = \text{H}_2$	$7.7 \cdot 10^9$
$\text{H} + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$3.44 \cdot 10^7$
$e + \text{O}_2 = \text{O}_2^-$	$1.94 \cdot 10^{10}$
$e + \text{O}_2^- = \text{HO}_2^- + \text{OH}^-$	$1.3 \cdot 10^{10}$
$e + \text{HO}_2 = \text{HO}_2^-$	$2 \cdot 10^{10}$
$e + \text{H} = \text{H}_2 + \text{OH}^-$	$2.5 \cdot 10^{10}$
$e + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{OH} + \text{OH}^-$	$1.14 \cdot 10^{10}$
$e + e = \text{H}_2 + \text{OH}^- + \text{OH}^-$	$5.6 \cdot 10^9$
$\text{HO}_2 + \text{O}_2^- = \text{O}_2 + \text{HO}_2^-$	$9.5 \cdot 10^7$
$\text{HO}_2 + \text{HO}_2 = \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O}_2$	$8.1 \cdot 10^5$
$\text{HO}_2 + \text{H}_2\text{O}_2 = \text{O}_2 + \text{OH} + \text{H}_2\text{O}$	$3.7 \cdot 10^0$
$\text{HO}_2 = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_2^-$	$7 \cdot 10^5$
$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_2^- = \text{HO}_2$	$4.5 \cdot 10^{10}$
$\text{H}_2\text{O}_2 = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}_2^-$	$3.56 \cdot 10^{-2}$
$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}_2^- = \text{H}_2\text{O}_2$	$2 \cdot 10^1$
$\text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^- = \text{H}_2\text{O}$	$1.4 \cdot 10^{11}$
$\text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{OH}^-$	$2.52 \cdot 10^5$
$\text{H} + \text{OH}^- = e + \text{H}_2\text{O}$	$1.8 \cdot 10^7$

Таблица 1. Продолжение

Реакции*	K, л/моль · с
$O_2^- + O_2^- = O_2 + HO_2^- + OH^-$	$3 \cdot 10^{-1}$
$O_2^- + H_2O_2 = O_2 + OH^- + OH$	$1.6 \cdot 10^{10}$
$HCOOH = H_3O^+ + HCOO^-$	$1.8 \cdot 10^6$
$H_3O^+ + HCOO^- = HCOOH$	$1 \cdot 10^{10}$
$COOH = COO^- \text{ радикал} + H_3O^+$	$4 \cdot 10^8$
$COO^- \text{ радикал} + H_3O^+ = COOH$	$1 \cdot 10^{10}$
$OH + HCOOH = H_2O + COOH$	$1.4 \cdot 10^8$
$HCOO^- + OH = H_2O + COO^- \text{ радикал}$	$2.6 \cdot 10^9$
$COO^- \text{ радикал} + COO^- \text{ радикал} = ^-OOCSSCOO^-$	$1 \cdot 10^8$
$e + HCOOH = H + HCOO^-$	$1.4 \cdot 10^8$
$H + HCOOH = H_2 + COOH$	$4.4 \cdot 10^5$
$O_2 + COOH = HO_2 + CO_2$	$2 \cdot 10^9$
$H_2O_2 + COOH = OH + H_2O + CO_2$	$5 \cdot 10^4$
$COOH + COOH = (COOH)_2$	$4 \cdot 10^8$
$COOH + COOH = HCOOH + CO_2$	$5 \cdot 10^8$
$(COOH)_2 = HOOCSSCOO^- + H_3O^+$	$5.6 \cdot 10^8$
$HOOCSSCOO^- + H_3O^+ = (COOH)_2$	$1 \cdot 10^{10}$
$HOOCSSCOO^- = ^-OOCSSCOO^- + H_3O^+$	$5.4 \cdot 10^5$
$^-OOCSSCOO^- + H_3O^+ = HOOCSSCOO^-$	$1 \cdot 10^{10}$
$(COOH)_2 + OH = CO_2 + COO^- \text{ радикал} + H_3O^+$	$1.4 \cdot 10^6$
$HOOCSSCOO^- + OH = CO_2 + COO^- \text{ радикал}$	$1.9 \cdot 10^7$
$^-OOCSSCOO^- + OH = CO_2 + COO^- \text{ радикал} + OH^-$	$9.7 \cdot 10^5$
$e + (COOH)_2 = H_2O_2SSCOOH + OH^-$	$2.5 \cdot 10^{10}$
$HOOCSSCOO^- + e = H_2O_2SSCOOH + OH^- + OH^-$	$3.2 \cdot 10^9$
$^-OOCSSCOO^- + e = H_2O_2SSCOOH + OH^- + OH^- + OH^-$	$4.8 \cdot 10^7$
$HOOCSSCOO^- + H = H_2O_2SSCOOH + OH^-$	$1.6 \cdot 10^4$
$H + (COOH)_2 = H_2O_2SSCOOH$	$3 \cdot 10^6$
$^-OOCSSCOO^- + H = H_2O_2SSCOOH + OH^- + OH^-$	$1 \cdot 10^4$
$H_2O_2SSCOOH + H_2O_2SSCOOH = GA + (COOH)_2$	$1 \cdot 10^8$
$H_2O_2SSCOOH + O_2 = (COOH)_2 + HO_2$	$1 \cdot 10^5$
$H_2O_2SSCOOH + H_2O_2SSCOOH = DA$	$1 \cdot 10^8$
$H_2O_2SSCOOH + H_2O_2SSCOOH = (COOH)_2 + HCOOH + HCOOH$	$1 \cdot 10^9$

Таблица 1. Окончание

Реакции*	K , л/моль · с
$H_2O_2CCOOH + COOH = HA$	$1 \cdot 10^9$
$H_2O_2 + H_2O_2CCOOH = OH + H_2O + (COOH)_2$	$1 \cdot 10^5$
$GA + OH = CO_2 + CO_2 + CO_2 + H_2O$	$1 \cdot 10^7$
$HA + OH = CO_2 + CO_2 + CO_2 + H_2O$	$5 \cdot 10^7$
$DA + OH = CO_2 + CO_2 + CO_2 + H_2O$	$1 \cdot 10^7$
$HNO_3 + OH = NO_3 + H_2O$	$8.8 \cdot 10$
$NO_3 + H_2O = HNO_3 + OH$	$3 \cdot 10^2$
$NO_3^- + e = NO_3^{2-}$	$9.7 \cdot 10^{10}$
$NO_3^{2-} + H_3O^+ = NO_2 + OH^-$	$4.5 \cdot 10^{10}$
$H + NO_3^- = NO_2 + OH^-$	$4.4 \cdot 10^6$
$NO_3 + NO_2 = N_2O_5$	$1 \cdot 10^9$
$NO_2 + NO_2 = N_2O_4$	$4.7 \cdot 10^8$
$N_2O_4 = NO_2 + NO_2$	$6.8 \cdot 10^3$
$N_2O_4 + H_2O = HNO_3 + HNO_2$	$1.8 \cdot 10^{10}$
$OH + NO_2 = HOONO$	$5 \cdot 10^8$
$NO_3 + NO_3 = N_2O_6$	$4 \cdot 10^6$
$HNO_3 = H_3O^+ + NO_3^-$	$2 \cdot 10^{10}$
$H_3O^+ + NO_3^- = HNO_3$	$4.4 \cdot 10^8$

* Условия реакций: $T = 298$ К, $C[O_2] = 2.7 \cdot 10^{-4}$ моль/л, $J = 0.16$ Гр/с.

водных растворов смесей органических кислот $HCOOH$ и $(COOH)_2$ в присутствии азотной кислоты двух разных концентраций. Как видно из рис. 2, pH растворов растет с увеличением поглощенной дозы. С ростом концентрации азотной кислоты от $0.25 \cdot 10^{-3}$ до $2.5 \cdot 10^{-3}$ М наблюдается слабое уменьшение показателя pH, что указывает на уменьшение скорости превращения органических кислот в присутствии HNO_3 . При малых дозах поглощенного излучения (на начальном участке) наблюдается небольшое падение величины pH, которое связано с расходом кислорода. При этих дозах облученный раствор становится более деаэрированным при радиолизе водных растворов щавелевой кислоты, как указано в работе [5].

Радиолизу водных растворов муравьиной, щавелевой и азотной кислот посвящен ряд работ [6–10]. Установлено, что конечными газообразными продуктами радиолиза водных растворов вышеуказанных органических кислот являются H_2 и CO_2 . В качестве жидких продуктов были идентифицирова-

ны кислоты и альдегиды. Предполагалось также образование глиоксиловой (GA), гидроксигартроновой (HA) и дигидроксивинной (DA) кислот.

Радиолиз водных растворов смесей кислот $HCOOH$ и $(COOH)_2$ изучен нами ранее в работах [11–13], в которых экспериментально определены и рассчитаны по кинетической модели процессы образования H_2 , CO_2 и кислотность раствора при разных поглощенных дозах. На основе экспериментальных и литературных данных о процессах радиолитических превращений исследованных кислот был проведен расчет кинетики образования газообразных продуктов по программе KINET (версия 1.2.5.).

Стадии кинетической схемы радиолиза воды в присутствии исследуемых кислот включают:

- элементарные реакции радиолиза воды; при pH в диапазоне 1–4 радиационно-химические выходы продуктов радиолиза воды составляют (молекула/100 эВ): H^+ (3.45), OH^- (0.4), e_{aq}^- (3.05),

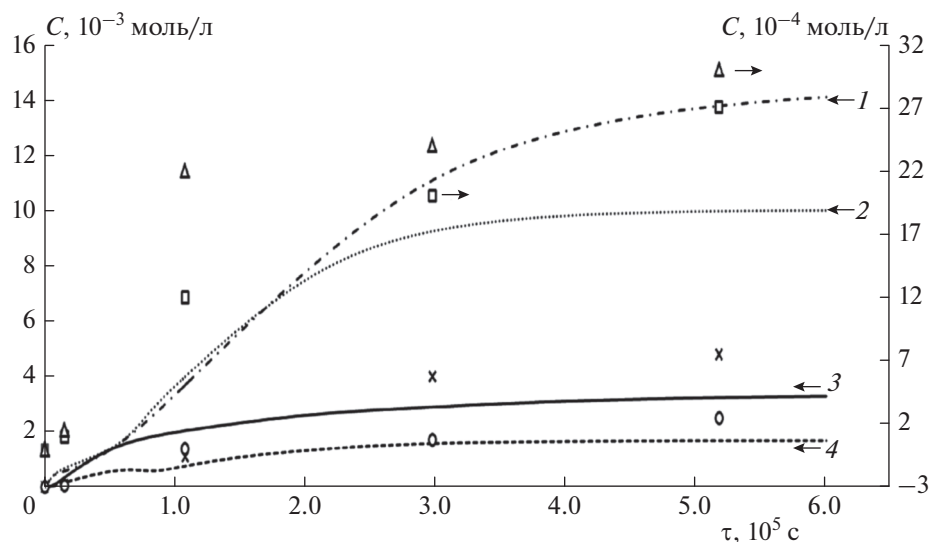


Рис. 3. Кинетические кривые образования газообразных продуктов CO_2 (1, 2) и H_2 (3, 4) при γ -радиолизе водных растворов смесей $\text{HCOOH} + \text{HOOC-COOH} + \text{HNO}_3$ в зависимости от времени облучения (τ) для двух концентраций HNO_3 $0.25 \cdot 10^{-3}$ М и $2.5 \cdot 10^{-3}$ М: линии – расчет, точки – эксперимент. Мощность дозы $J = 0.16$ Гр/с.

H (0.6), H_2 (0.425), OH (2.9), H_2O_2 (0.8) соответственно [14, 15];

- скорость генерации $K_i (\text{H}_2\text{O}) = GJ \cdot 10^{-2}$, где G – радиационно-химические выходы соответствующих частиц, J – мощность поглощенной дозы, K_i – эффективная константа скорости образования i -й частицы;

- использованы имеющиеся в литературе элементарные реакции при радиолизе водных растворов кислот, включающие реакции рекомбинации образующихся радикалов и их реакции с молекулами компонентов смеси;

- рассмотрены процессы электролитической диссоциации щавелевой, муравьиной и азотной кислот с константами диссоциации: $K_1 = 5.4 \cdot 10^{-2}$, $K_{II} = 5.4 \cdot 10^{-5}$ для щавелевой, $K = 1.8 \cdot 10^{-4}$ для муравьиной, $K = 5.1 \cdot 10^{-4}$ для азотной кислоты [16].

Реакции, использованные для составления кинетической модели радиолиза исследуемых водных растворов, приведены в табл. 1 [6–10, 17].

На рис. 3 приведены расчетные кривые кинетического моделирования и полученные нами экспериментальные результаты по кинетике изменения концентрации H_2 и CO_2 при радиолизе водных растворов смесей муравьиная – щавелевая – азотная кислоты в зависимости от времени γ -облучения. Как видно из рис. 3, расчетные данные хорошо согласуются с экспериментальными. Вычисленные по результатам экспериментов радиационно-химические выходы газообразных продуктов реакций составляют $G(\text{H}_2) = 0.4$ молекул/100 эВ и $G(\text{CO}_2) = 0.6$ молекул/100 эВ. Полученные данные показывают, что присутствие

кислот не влияет на образование молекулярного водорода при радиолизе их водных растворов в условиях экспериментов. Как видно, рост содержания азотной кислоты в смеси приводит к уменьшению стационарной концентрации образующего углекислого газа и водорода, что согласуется с данными по изменению показателей рН и ХПК, приведенными выше.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных экспериментальных данных о дозовой зависимости показателей рН и ХПК, а также изучения процесса образования газообразных продуктов превращений предложена кинетическая модель, описывающая радиационно-кинетические процессы при радиолизе водных растворов смесей муравьиной, щавелевой и азотной кислот под действием γ -излучения и учитывающая 80 элементарных реакций. Проведено сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей концентрации CO_2 и H_2 от поглощенной дозы γ -излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубков Г.В., Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш., Палкина Л.А., Голубков М.Г. // Хим. физика. 2018. Т. 37. № 10. С. 3; <https://doi.org/10.1134/S0207401X18090054>
2. Гордеев А.В., Ершов Б.Г. // Матер. рос. конф. “Фундаментальные аспекты безопасного захоронения РАО в геологических формациях”. М.: Граница, 2013. С. 37.

3. *Ершов Б.Г., Гордеев А.В., Косарева И.М.* // Радиохимия. 2014. Т. 56. № 5. С. 545.
4. Государственный стандарт Республики Беларусь. Качество воды. Определение перманганатной окисляемости. СТБ ISO 8467-2009. Минск: БелГИСС, 2009.
5. *Жесткова Т.П., Жукова Т.П., Макаров И.Е.* // Химия высоких энергий. 2011. Т. 45. № 2. С. 115.
6. *Ким Д.Ч., Ким Д.Х., Ким Д.К. и др.* // Там же. 1999. Т. 33. № 6. С. 413.
7. *Гордеев А.В., Ершов Б.Г., Косарева И.М.* // Химия высоких энергий. 2005. Т. 39. № 4. С. 250.
8. *Аристова Н.А., Мокина Т.С.* // ЖОХ. 2003. Т. 73. Вып. 5. С. 756.
9. *Карташева Л.И., Чулков В.Н.* // Химия высоких энергий. 2000. Т. 34. № 6. С. 467.
10. *Ershov B.G., Gordeev A.V., Vykov G.L., Moisy P.* // Radiochim. Acta. 2012. V. 100. № 12. P. 919; <https://doi.org/10.1524/ract.2012.1977>
11. *Gurbanov M.A., Gulieva U.A.* // J. Radiat. Res. ANAS. 2018. V. 5. № 1. P. 46.
12. *Кулиева У.А., Курбанов М.А., Абдуллаев Э.Т.* // Матер. 68 Междунар. конф. “Ядро-2018” “Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий”. СПб.: ВВМ, 2018. С. 51.
13. *Кулиева У.А., Курбанов М.А., Абдуллаев Э.Т.* // Изв. НАН Азербайджана. Сер. физ.-техн. и мат. наук. 2018. № 5. С. 154.
14. *Пикаев А.К.* Современная радиационная химия: Радиолит газы и жидкостей. М.: Наука, 1986.
15. *Кеба В.В., Семиколонова Н.А.* // Мат. структуры и моделирование. 2000. Вып. 6. С. 72.
16. *Гороновский И.Т., Назаренко Ю.П., Некряч Е.Ф.* Краткий справочник по химии. Киев: Наук. думка, 1974.
17. *Поскребышев Г.А., Нета П., Хуи Р.Е.* // Журн. геофиз. исслед.: Атмосфера. 2001. Т. 106. № D5. P. 4995; <https://doi.org/10.1029/2000JD900702>