

УДК 541(515+64+14)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ СВОБОДНЫХ РАДИКАЛОВ
В ПОЛИКАПРОЛАКТАМЕ
ПРИ ФОТОРАДИАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Г. С. Жданов, В. К. Милинчук

Методом ЭПР установлено, что в поликаапролактаме при одновременном воздействии γ -излучения и света свободных радикалов образуется в 2 раза больше, чем при последовательном действии двух видов излучений. При дозах больше ~ 6 Мрад концентрация свободных радикалов в полимере, одновременно облученном, больше концентрации парамагнитных центров в γ -облученном полимере. Увеличение концентрации радикалов при одновременном облучении возрастает с дозой и интенсивностью γ -излучения. Установлено, что фоторадиационный выход имеет нелинейный характер от интенсивности света и пороговую зависимость от энергии кванта света. Показано, что за эффект увеличения концентрации свободных радикалов при фоторадиационном воздействии при 77° К частично ответственны фотоинициированные реакции заряженных частиц.

Ранее [1–3] было установлено, что при одновременном воздействии ионизирующих излучений и света в ряде полимеров свободных радикалов образуется больше, чем при облучении только ионизирующими излучениями, а также при последовательном действии ионизирующего и светового излучений. В работе [4] была рассмотрена кинетика накопления свободных радикалов при одновременном, периодическом и последовательном действии ионизирующего излучения и света при условии независимого протекания радиационно-химических процессов и фотохимических реакций. Установлено, что в этих условиях при одновременном облучении свободных радикалов накапливается больше, чем при последовательном.

Известно, что при 77° К свободные радикалы в полимерах под действием света не исчезают [1]. Поэтому если полимер подвергать действию ионизирующих излучений и света при низких температурах, то кинетику накопления свободных радикалов при фоторадиационном воздействии нельзя описать кинетическими уравнениями, полученнымными в работе [4]. Возрастание концентрации свободных радикалов при фоторадиационном воздействии в работах [1–3] объясняли с точки зрения действия света на промежуточные активные частицы, возникающие в полимерах под действием ионизирующих излучений. Однако в этих работах не были исследованы основные закономерности, а также не обсуждены возможные механизмы образования свободных радикалов при фоторадиационном облучении.

В настоящей работе на примере поликаапролактама (ПКЛ) рассмотрены основные закономерности образования свободных радикалов при фоторадиационном воздействии в зависимости от дозы и интенсивности ионизирующих излучений, интенсивности и частоты света и других факторов. На основании результатов, полученных методом ЭПР и радиотермолюминесценции (РТЛ), сделаны предположения о возможном механизме образования свободных радикалов в полимере при фоторадиационном воздействии.

Опыты проводили с неориентированными образцами промышленного ПКЛ в виде гранул, которые помещали в кварцевые тонкостенные ампулы, вакуумировали до $\sim 10^{-5}$ тор и заполняли гелием высокой чистоты до давления 500 тор. Облучение проводили при 77° К на γ -источнике ^{60}Co при мощности дозы 80–640 рад/сек. Одновременно с γ -облучением образцы освещали светом лампы ДРШ-500 через оптическую систему, состоящую из линз, кварцевой кюветы с дистиллированной водой для фильтрации тепловых лучей и кварцевого сосуда Дьюара. Периодическое облучение осу-

ществляли попеременным действием γ -лучей и света с интервалом 10–15 мин. Наименьшая длительность одного периода облучения, которую можно было осуществить в экспериментах, составляла $\Delta t=5$ мин. Интенсивности γ -излучения и света при всех воздействиях соответственно были одинаковыми. Изменение интенсивности γ -излучения достигали изменением расстояния от объекта до источника, интенсивность света меняли с помощью калиброванных стекок. В качестве светофильтров использовали цветные оптические стекла (ГОСТ 9411-60). Оптическую часть установки (линзы, кюветы, оптические цветные стекла) защищали толстым свинцовым экраном для ослабления ионизирующего излучения, под действием которого в оптическом и кварцевом стекле образуются центры окрашивания, уменьшающие пропускание света. За время опытов пропускание света оптической системой уменьшалось на ~10%. РПЛ регистрировали по методике, описанной в [5]. Спектры ЭПР регистрировали на радиоспектрометрах РЭ-1301 и ЭПР-3.

Кривые, описывающие кинетику накопления парамагнитных центров (ПЦ) в поликаапролактаме при 77° К, представлены на рис. 1. Видно, что в зависимости от способа облучения кривые имеют различный характер. Концентрация ПЦ в образцах, облученных только ионизирующими излучениями (кривая 2) и подвергнутых одновременному воздействию γ -излучения и света (кривая 1) до ~6 Мрад, одинакова; при больших дозах концентрация ПЦ при облучении только γ -лучами отклоняется от линейной зависимости и достигает предельного значения при ~20 Мрад. В то же время концентрация ПЦ в образце, подвергаемом одновременному действию γ -излучения и света, растет с дозой облучения и при ~20 Мрад в 1,5 раза превышает концентрацию ПЦ, накапливающихся в ПКЛ при γ -облучении. При периодическом (кривая 3) и последовательном облучении (кривая 4) свободных радикалов накапливается меньше, чем при γ -облучении. Таким образом, образование свободных радикалов в ПКЛ зависит от способа воздействия ионизирующего излучения и света и дозы проникающей радиации. На рис. 1 видно, что в исследованном диапазоне доз (интенсивность γ -излучения

Рис. 1. Кривые накопления свободных радикалов в ПКЛ при 77° К, при γ -облучении (2), одновременном (1), периодическом (3) и последовательном (4) действии γ -излучения и света

560 рад/сек) при одновременном облучении свободных радикалов образуется в ~2 раза больше, чем при последовательном действии двух видов излучения. Такое возрастание концентрации свободных радикалов при одновременном облучении по сравнению с последовательным свидетельствует о том, что при совместном действии ионизирующего излучения и света создаются условия, которые благоприятствуют процессу образования свободных радикалов в полимере.

Рассмотрим экспериментальные результаты, которые могут помочь выяснению причин, ответственных за эффект повышения концентрации свободных радикалов в ПКЛ при совместном действии проникающей радиации и света.

Одновременное облучение. На рис. 2, а приведен начальный участок кривых накопления ПЦ в ПКЛ при γ -облучении и фоторадиационном воздействии. До ~0,5–0,7 Мрад кривые накопления свободных радикалов при одновременном (кривая 1) и последовательном облучении (кривая 2) совпадают, а затем с ростом дозы отношение $[R]'/[R]''$ увеличивается и достигает значения ~2. ($[R]'$ и $[R]''$ – концентрация свободных радикалов при одновременном и последовательном облучении соответственно, г^{-1} .) Эффект одновременного облучения $\Delta R=[R]'-[R]''$ растет линейно при увеличении интенсивности γ -излучения в диапазоне $I=80–320$ рад/сек

и незначительно отклоняется от линейного закона при $I \geq 320$ рад/сек (рис. 2, б). Зависимость ΔR от интенсивности падающего света ($j=1$ соответствует 10^{17} квант/ $\text{см}^2 \cdot \text{сек}$) имеет следующий характер: при уменьшении начальной интенсивности в 2 раза ΔR не изменяется, а при дальнейшем снижении интенсивности света в 16 раз эта величина падает практически до нуля (рис. 3, а). Характер зависимости ΔR от интенсивности света одинаков при различных дозах (рис. 3, а, кривые 1 и 2) и интенсивностях

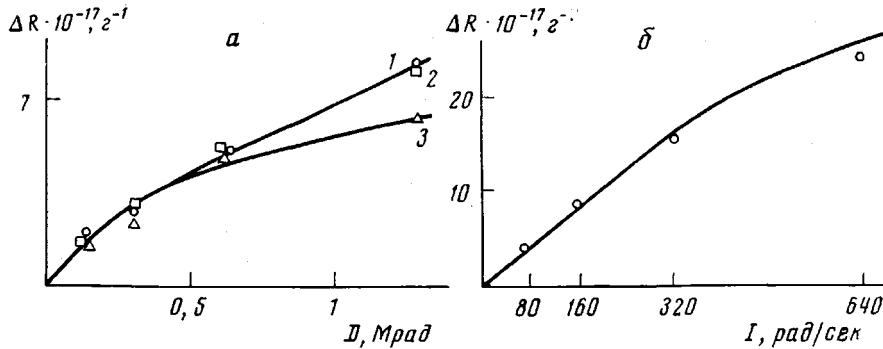


Рис. 2. Начальный участок кривой накопления ПЦ в поликапролактаме при 77° К (а) и зависимость эффекта ΔR при фоторадиационном воздействии от интенсивности γ -излучения (300 мин.) (б)
а: γ -облучение (1), одновременное (2) и последовательное воздействие γ -излучения и света (3)

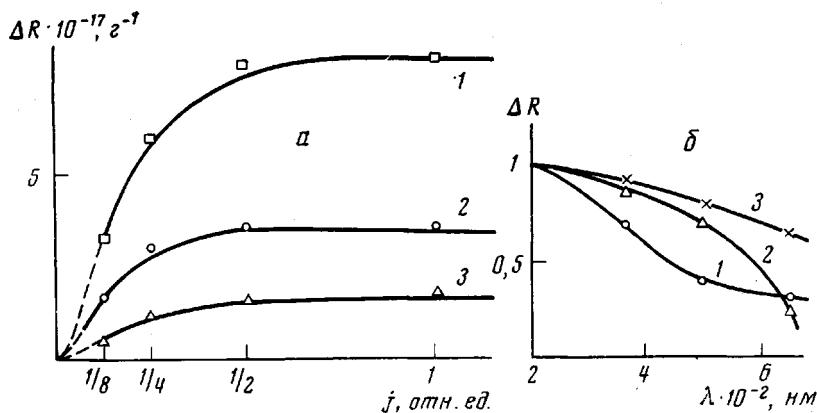


Рис. 3. Зависимость эффекта ΔR при фоторадиационном воздействии от интенсивности (а) и длины волн облучающего света (б)
а: 1, 2 — $D=2,7$ и $1,3$ Mrad при $I=360$ рад/сек соответственно; 3 — $D=0,8$ Mrad при $I=160$ рад/сек; б: 1, 2 — одновременное и периодическое действие γ -излучения и света, 3 — исчезновение ион-радикалов

γ -излучения (рис. 3, а, кривые 2, 3). Исследование зависимости ΔR от частоты действующего света (спектр действия) показывает, что возрастание концентрации свободных радикалов при одновременном облучении наблюдается при действии видимого света, начиная с $\lambda \leq 650$ нм, и значительно возрастает при увеличении частоты света (рис. 3, б, кривая 1).

Периодическое облучение. На рис. 4 представлена зависимость эффекта ΔR от количества периодов, за которые образцы полимеров облучали до одинаковой дозы ($D=2$ Mrad, $I=560$ рад/сек). За предельное значение концентрации свободных радикалов ΔR при периодическом облучении ($\Delta t=0$) взята концентрация свободных радикалов, образующихся при одновременном воздействии γ -излучения и света. Наибольшее значение ΔR получено при длительности периода $\Delta t=5$ мин. (12 циклов облучения

γ -лучами и светом). С увеличением Δt значение ΔR падает, и при одном цикле концентрация свободных радикалов соответствует значению при последовательном облучении. Зависимость ΔR от частоты света при периодическом облучении представлена на рис. 3, б (кривая 2). Видно, что спектр действия при периодическом облучении сдвинут в более длинноволновую область по сравнению со спектром действия при одновременном облучении.

Спектры ЭПР. В неориентированном ПКЛ, γ -облученном при 77° К, образуются в основном радикалы структуры $\sim\text{CH}_2\text{CONH}\dot{\text{C}}\text{HCH}_2\sim$,

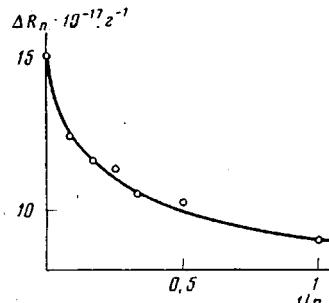


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость концентрации свободных радикалов при периодическом облучении от числа периодов при 77° К ($D=2$ Мрад, 60 мин.)

Рис. 5. Зависимость светосуммы РТЛ γ -облученного ПКЛ при 77° К от дозы (а) и экспериментальная зависимость значения функции $\frac{\Delta R_n - \Delta R_1}{n}$ от длительности периода при различных интенсивностях γ -излучения (доза 2 Мрад) (б): $I=560$ (1), 280 (2), 140 рад/сек (3)

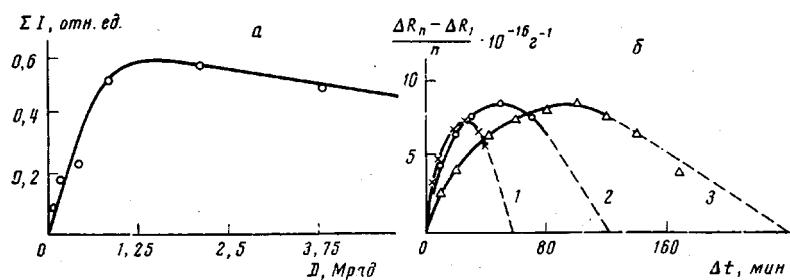


Рис. 5

спектр ЭПР которых имеет следующие константы СТС: $a_{\alpha}^H=20$ э, $a_{\beta}^H=26$ э [6]. Кроме того, исчезающие под действием видимого и УФ-света парамагнитные центры следует отнести захваченным электронам, а также ион-радикалам. В небольших количествах в ПКЛ образуются алкильные радикалы структуры $\sim\text{CH}_2\dot{\text{C}}\text{HCH}_2\sim$, которым отвечает спектр из шести СТС с расщеплением ~ 30 э. Согласно работам [7–9], под действием света $\lambda \approx 365$ нм радикалы $\sim\text{CH}_2\text{CONH}\dot{\text{C}}\text{HCH}_2\sim$ превращаются в ацильные радикалы $\sim\text{CH}_2-(\text{CH}_2)_5\dot{\text{C}}=\text{O}$ с $\Delta H=15,5$ э и $g=2,0010$, которые под действием света $\lambda \geq 445$ нм диссоциируют с образованием концевых радикалов $\sim\text{CH}_2-\dot{\text{C}}\text{H}_2$ (секстет с расщеплением ~ 22 э). Отличия в ЭПР-спектрах ПКЛ, подвергнутого одновременному облучению, по сравнению с последовательным обусловлены различиями в концентрациях свободных радикалов, подвергаемых фотопревращениям в поле и вне поля ионизирующих излучений.

Увеличение концентрации свободных радикалов, которое наблюдается при одновременном и периодическом облучении двумя видами излучений, обусловлено действием света на промежуточные активные частицы, образующиеся при радиолизе полимера. Этот вывод подтверждается тем, что предварительное облучение исходных образцов ПКЛ УФ-светом в течение длительного времени (за 5–6 час. максимальная концентрация радикалов при фотолизе достигает $\sim 6 \cdot 10^{16}$ з⁻¹) не оказывает влияния на характер

кривых накопления радикалов как при γ -облучении, так и при фоторадиационном воздействии. Из зависимости ΔR от количества циклов при периодическом облучении (рис. 4) следует, что образование свободных радикалов при фоторадиационном воздействии связано с действием света на стабильные фоточувствительные частицы. Характер этой зависимости указывает на то, что концентрация стабильных фоточувствительных частиц достигает предельного значения при дозе $< 2 \text{ Mrad}$. Если бы стабильные промежуточные частицы накапливались линейно с дозой, то концентрация свободных радикалов ΔR при периодическом облучении не зависела бы от числа периодов. Исследование образования свободных радикалов при периодическом облучении в зависимости от интенсивности γ -излучения (при дозе 2 Mrad) показало, что период облучения γ -лучами и светом Δt , которому соответствует максимальное повышение концентрации свободных радикалов, обратно пропорционален интенсивности γ -излучения. Такой характер кинетики накопления свободных радикалов в зависимости от интенсивности γ -излучения при периодическом облучении также указывает на достижение при этих дозах предельного значения концентрации стабильных промежуточных частиц, реакции которых под действием света приводят к образованию свободных радикалов. Аналогичный характер от дозы γ -излучения имеет светосумма РТЛ для поликаапролактама (рис. 5, а). Корреляция между ΔR и светосуммой РТЛ, по-видимому, указывает на то, что за увеличение концентрации свободных радикалов при периодическом облучении ответственны реакции заряженных частиц, которые вызывают РТЛ.

На основании полученных экспериментальных результатов можно предположить, что в ПКЛ существует определенный ограниченный набор ловушек N_0 , в которых стабилизируются промежуточные частицы. Накопление этих частиц при действии на полимер γ -излучения будет описываться следующим выражением: $N = N_0(1 - e^{-kt})$, где k — константа скорости накопления стабильных частиц, Mrad^{-1} ; I — интенсивность γ -излучения, $\text{Mrad}/\text{сек}$; t — время, сек. Кривая накопления свободных радикалов должна воспроизводить характер кривой накопления стабильных частиц, и поэтому $\Delta R = \Delta R_0(1 - e^{-kt})$, где $\Delta R_0 = \alpha N_0$. (Экспериментальное значение $\Delta R_0 = 1,3 \cdot 10^{17} \text{ е}^{-1}$, $\alpha < 1$ — степень превращения частиц под действием света в свободные радикалы.) Энергия рекомбинации оставшейся части стабильных заряженных частиц $(1 - \alpha)N_0$ будет выделяться в результате рекомбинационной люминесценции или переходит в тепловую энергию. Выражение, описывающее возрастание концентрации свободных радикалов после n периодов действия ионизирующего излучения и света, можно записать

$$\Delta R_n = n \Delta R_0 (1 - e^{-knt}) \quad (1)$$

Осуществив в уравнении (1) для ΔR_n предельный переход при $\Delta t \rightarrow 0$, определяем вклад в общую концентрацию радикалов, возникающих при одновременном действии γ -излучения и света, за счет переработки стабильных фоточувствительных частиц. Этот вклад составляет $\sim 3,9 \cdot 10^{17} \text{ е}^{-1}$ и равен $\sim 0,6 \Delta R$ при одновременном облучении ($\Delta R' = 6,3 \cdot 10^{17} \text{ е}^{-1}$). Следовательно, необходимо предположить, что в процессе образования свободных радикалов при одновременном облучении участвуют также и другие промежуточные активные частицы, вероятно, с более короткими временами жизни. Из сравнения зависимости концентрации свободных радикалов от длины волны света при одновременном и периодическом облучении видно, что спектр в первом случае сдвинут в более коротковолновую область по сравнению со спектром действия при периодическом облучении. Это косвенно может свидетельствовать в пользу существования других нестабильных частиц, ответственных за увеличение концентрации свободных радикалов при совместном действии ионизирующего и светового излучений.

К такому же заключению мы приходим при рассмотрении зависимости эффекта ΔR от времени задержки τ светового облучения относительно дей-

ствия ионизирующего излучения при периодическом облучении. При задержке ~ 20 сек * . ΔR значительно меньше значения, регистрируемого при одновременном облучении; при больших задержках (до ~ 5 мин.) наблюдается слабое снижение ΔR . В РТЛ γ -облученного при 77° К поликарополактама наблюдается изотермическое свечеание, которое свидетельствует о наличии в полимере подвижных зарядов. Характер спада изотермического свечеания после прекращения облучения близок к характеру зависимости ΔR от времени задержки ($\tau=20\text{--}300$ сек.) светового облучения относительно действия ионизирующего излучения.

Вероятно, за пост-рекомбинационную люминесценцию ответственна только небольшая часть заряженных частиц, основная часть которых рекомбинирует во время радиолиза. При одновременном облучении под действием света происходит непрерывная рекомбинация заряженных частиц, которая приводит к образованию свободных радикалов. Таким образом, в условиях одновременного облучения действию света подвергается значительно большее количество заряженных частиц, чем при периодическом и последовательном облучениях. В результате одновременного облучения свободных радикалов, образование которых связано с фотоинициируемыми реакциями заряженных частиц, образуется больше. Итак, за увеличение концентрации свободных радикалов при одновременном воздействии могут быть ответственны стабильные промежуточные частицы и относительно короткоживущие активные образования (время жизни <20 сек.).

Какова же природа этих промежуточных активных частиц? Прежде всего на основании полученных экспериментальных результатов можно сделать вывод о том, что такими промежуточными активными частицами являются заряженные частицы. ПЦ, исчезающие в ПКЛ под действием света при 77° К, мы относим к ион-радикалам. Известно [10], что продуктами реакций ион-радикалов могут быть свободные радикалы. Нами было проверено, являются ли ион-радикалы, которые в большом количестве образуются в ПКЛ (концентрация ион-радикалов при 77° К достигает значения $\sim 10^{18}$ с^{-1}), теми стабильными частицами, которые дают вклад в увеличение концентрации свободных радикалов после действия света. Из линейной анаморфозы кривой накопления ион-радикалов была определена эффективная константа скорости образования ион-радикалов $k=1,2 \cdot 10^{-2}$ мин^{-1} ($I=560$ рад/сек). Эффективная константа скорости накопления промежуточных стабильных частиц, ответственных за увеличение концентрации свободных радикалов при периодическом облучении, определялась следующим образом. Из зависимости концентрации свободных радикалов от длительности периода был найден максимум функции $(\Delta R_n - \Delta R_1)/n$, где ΔR_n — концентрация свободных радикалов при периодическом облучении за n периодов действия γ -излучения и света (с^{-1}), ΔR_1 — концентрация свободных радикалов при последовательном облучении ($n=1$), который соответствовал следующему значению времени:

$$\Delta t_{\max} = \frac{1}{kI} \ln \frac{kIt}{1 - e^{-kIt}}, \quad (2)$$

где t — общее время облучения. Из экспериментальных кривых, описывающих функцию $(\Delta R_n - \Delta R_1)/n$ при различных интенсивностях γ -излучения, были взяты значения Δt_{\max} (рис. 5, б). Из уравнения (2) $kI=5,0 \cdot 10^{-2}$ мин^{-1} , т. е. в 4 раза превышает константу скорости образования ион-радикалов. Сравнение значения ΔR в зависимости от длины волны света при периодическом облучении (рис. 3, б, кривая 2) и кривой, описывающей исчезновение ион-радикалов в зависимости от длины волны света (рис. 3, б, кривая 3), показывает, что спектр действия ион-радикалов смещен в более длинноволновую область. На основании этих данных можно заключить, что

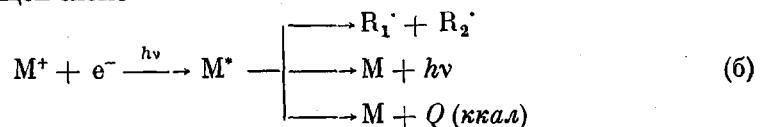
* Экспериментальные условия не позволяли осуществить задержки меньше 20 сек.

за увеличение концентрации свободных радикалов при фоторадиационном воздействии, вероятно, ответственны не ион-радикалы, а фотопреакции промежуточных заряженных частиц двух типов — стабилизирующихся и относительно короткоживущих. Разделение промежуточных частиц на стабилизирующиеся и относительно короткоживущие носит условный характер. Можно думать, что при одновременном облучении в процессе образования свободных радикалов участвуют активные частицы такой же природы, как и при периодическом облучении, но с более коротким временем жизни или в условиях одновременного воздействия повышается эффективность превращения стабилизирующихся частиц в свободные радикалы.

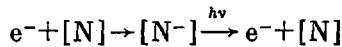
Рассмотрим некоторые возможные реакции заряженных частиц, протекающие под действием света в поле ионизирующего излучения, которые могут быть ответственны за увеличение концентрации свободных радикалов при одновременном облучении. Под действием γ -лучей происходит ионизация макромолекул



Образующиеся заряженные частицы могут рекомбинировать под действием света по следующей схеме



Кроме того, при наличии в полимере ловушек возможна промежуточная стадия образования стабильных заряженных частиц по схеме



Рассмотрение образования свободных радикалов на короткоживущей e^- и стабильной $[N^-]$ части заряженных промежуточных частиц при действии на них светом приводит к следующей системе дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d[N^-]}{dt} &= k_1[N] - k_{1j}[N^-] \\ \frac{d[e^-]}{dt} &= k_2I - k_{3j}[e^-] - k_4[e^-] \\ \frac{d[\Delta R]}{dt} &= k_{5j}[N^-] + k_{6j}[e^-], \end{aligned}$$

где k, k_2 — константы скорости образования стабильных и короткоживущих частиц, k_1, k_3 — константы скорости гибели при освещении стабильных и короткоживущих частиц, k_5, k_6 — константы скорости образования свободных радикалов при действии света на стабильные и короткоживущие частицы, k_4 — константа скорости термической гибели короткоживущих частиц, I, j — интенсивность γ -излучения и света соответственно. В этой схеме учтены следующие предположения. Стационарная концентрация короткоживущих частиц устанавливается очень быстро, поэтому захват электронов ловушками (образование $[N^-]$) пропорционален концентрации $[e^-]$, которая в свою очередь пропорциональна интенсивности ионизирующего излучения. Предполагается также, что $[N^-] \gg [e^-]_{\text{стаци}}$ или $[M^+] \gg [e^-]_{\text{стаци}}$. Кроме того, не учитывается гибель радикалов под действием ионизирующего излучения и в результате захвата электронов радикалами.

Решение системы уравнений при $[N]_0 = [N] + [N^-]$ дает следующую зависимость увеличения концентрации свободных радикалов при одновре-

менном облучении от времени облучения

$$\Delta R = \frac{kIk_{sj}[N]_0}{kI+k_{sj}} t - \frac{kIk_{sj}[N]_0}{(kI+k_{sj})^2} [1 - e^{-(kI+k_{sj})t}] + \frac{k_2Ik_{sj}}{k_{sj}+k_4} t - \\ - \frac{k_2Ik_{sj}}{(k_{sj}+k_4)^2} [1 - e^{-(k_{sj}+k_4)t}] \quad (3)$$

Первые два члена правой части уравнения характеризуют вклад от стабильных частиц, остальные — вклад от короткоживущих. При дозах $\geq 1 \text{ Mrad}$ ($t=30 \text{ мин.}, I=560 \text{ рад/сек}$) эффект ΔR при одновременном облучении следующим образом зависит от дозы и интенсивности γ -излучения и от интенсивности света

$$\Delta R \approx \left(\frac{kIk_{sj}[N]_0}{kI+k_{sj}} + \frac{k_2Ik_{sj}}{k_{sj}+k_4} \right) t \quad (4)$$

Из уравнения (4) видно, что при $kI \ll k_{sj}$ концентрация свободных радикалов зависит линейно от дозы (рис. 1, кривая 1) и интенсивности γ -излучения (рис. 2, б). Незначительное отклонение при $kI=1$ может быть связано с тем, что при данной интенсивности $kI \leq k_{sj}$, и, кроме того, становится значительным вклад от процесса гибели свободных радикалов под действием γ -излучения. При дозе $\sim 1,7 \text{ Mrad}$ эффект ΔR в зависимости от интенсивности света описывается кривой рис. 3, а. Таким образом, упрощенная кинетическая схема качественно описывает наблюдаемые экспериментальные результаты зависимости значения ΔR от параметров ионизирующего излучения и света.

Однако рассмотренное выше образование свободных радикалов за счет фотоинициируемых реакций заряженных частиц было проведено только с точки зрения формальной кинетики. Физически неясно, почему энергия, выделяющаяся при рекомбинации стабилизирующихся зарядов, приводит к более эффективному образованию свободных радикалов в световом поле по сравнению с темновыми условиями. Можно думать, что энергии, выделяющейся при темновой рекомбинации зарядов [11], может быть недостаточно для образования свободных радикалов. При фоторадиационном же воздействии энергия света, поглощаемая матрицей и продуктами радиолиза полимера (свободные радикалы, ион-радикалы, захваченные заряды, стабильные продукты), может способствовать процессу образования радикалов. В условиях одновременного воздействия может также измениться направленность протекающих процессов в сторону образования свободных радикалов.

Филиал научно-исследовательского
физико-химического института
им. Л. Я. Карпова

Поступила в редакцию
29 X 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. В. К. Милинчук, Г. С. Жданов, С. Я. Пшежецкий, Высокомолек. соед., Б12, 658, 1970.
2. В. Г. Скворцов, Г. С. Жданов, В. К. Милинчук, Химия высоких энергий, 5, 466, 1971.
3. V. K. Milinchuk, G. S. Zhdanov, S. Ya. Pshezhetetskii, Proceedings of Third Tihany Symposium on Radiation Chemistry, 1972, p. 1077.
4. Г. С. Жданов, В. К. Милинчук, Высокомолек. соед., А14, 2405, 1972.
5. В. Г. Никольский, Н. Я. Бубен., Докл. АН СССР, 134, 134, 1960.
6. Y. Shinohara, D. Ballantine, J. Chem. Phys., 36, 3042, 1962.
7. В. П. Кирюхин, В. К. Милинчук, Химия высоких энергий, 3, 451, 1969.
8. Г. Б. Парийский, Е. Я. Давыдов, Д. Я. Топтыгин, Изв. АН СССР, серия химич., 1973, 1054.
9. Г. Б. Парийский, Л. М. Постников, Е. Я. Давыдов, Д. Я. Топтыгин, Высокомолек. соед., А16, 482, 1974.
10. В. К. Милинчук, В. Я. Дубарев, Химия высоких энергий, 3, 133, 1969.
11. В. А. Рогинский, Б. В. Котов, Химия высоких энергий, 1, 291, 1967.