

## Механическая прочность и твердость полимерных материалов, радиационно сшиваемых рентгеновским излучением электрического газового разряда

НОВИКОВ Г.К., ФЕДЧИШИН В.В., КАКОРИН А.А.

*Исследуются механические и электрофизические свойства полимерных материалов, радиационно сшиваемых рентгеновским излучением электрического газового разряда (ЭГР). Эффект влияния технологии радиационного сшивания на механическую прочность и твердость полимеров представлен на примере образцов различной толщины полиэтилена низкой (ПЭНП) и высокой (ПЭВП) плотности, изготовленных с использованием технологий радиационного сшивания рентгеновским излучением электрического газового барьерного разряда (ЭГБР). Экспериментальные данные получены на образцах, изготовленных в виде разрывных лопаток, вырубленных в соответствии с ГОСТ ИЕС 60811-2-1 из полиэтиленовых пластин. Для исследования электрофизических свойств и глубины полупоглощения рентгеновского излучения ЭГР использовались образцы в виде ПЭНП, ПЭВП дисков разной толщины. Проведена оценка глубины проникновения рентгеновского излучения в экспериментальные образцы. Выполнены сравнительные исследования изменений электрофизических свойств, механической прочности  $\sigma$ , твердости  $h$  и гель-фракции  $\sigma_p$  кабельного ПЭНП под действием рентгеновского излучения ЭГР и под влиянием электронного пучка. Показано, что механическая прочность и твердость ПЭНП, ПЭВП при использовании технологии радиационного сшивания рентгеновским излучением ЭГР может быть увеличена не менее чем на 30 и 60%.*

*К л ю ч е в ы е с л о в а:* полимерные материалы, рентгеновское излучение, глубина поглощения, электрический газовый разряд, механическая прочность и твердость

Повышение механической прочности кабельного полиэтилена низкой плотности (ПЭНП) за счет эффекта его химической или радиационной сшивки – основное направление улучшения термомеханических характеристик силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией. Радиационная сшивка позволяет наиболее широко использовать полимерное сырье, производимое на химических предприятиях РФ, уменьшая при этом зависимость производителей кабельной продукции от поставок импортного сырья.

Сшитый кабельный полиэтилен СПЭ низкой плотности является основным компонентом изоляции силовых кабелей. Существующие способы получения СПЭ (химический и радиационный) имеют свои достоинства и недостатки, обусловленные технологией процесса сшивания ПЭНП. К достоинствам химической (пероксидной, озонидной и силановой) сшивки относят ее независимость от толщины кабельной изоляции, а недостатки и заключаются в том, что привитый сшивающийся ПЭ гранулят с импортными ингредиентами вулканизирующей группы более дорогой по сравнению с отечественным ПЭ и поступает в РФ в ограниченном количестве [1].

Впервые процесс радиационной сшивки ПЭНП кабельной изоляции с помощью электронных пуч-

ков был разработан во ВНИИкабельной промышленности и получил практическое применение на кабельном заводе в Подольске [2].

К достоинствам способа радиационной сшивки следует отнести возможность его осуществления с использованием отечественного полимерного сырья, а к недостаткам – зависимость сшивки от толщины кабельной изоляции и высокую степень радиационной опасности электронно-лучевого технологического процесса для обслуживающего персонала.

В [3–8] показано, что рентгеновское излучение электрического газового разряда (ЭГР) вызывает в полимерных кабельных диэлектриках обратимые и необратимые изменения электрофизических и механических свойств, аналогичные действия электронного пучка, – обратимую радиационную электропроводность  $\gamma$ ; обратимые радиационные изменения электретной поляризации  $U_3$ , спектров токов термостимулированной деполяризации ТСД; механический радиационный эффект памяти формы, адгезионный поверхностный эффект склеивания и т.д.

До настоящего времени оставался неизученным важнейший вопрос о влиянии радиационной сшивки рентгеновским излучением ЭГР на механическую прочность ПЭНП кабельной изоляции. С учетом вышеизложенного в Иркутском националь-

ном исследовательском техническом университете (ИРНТУ) и ОАО «Иркутсккабель» были проведены исследования изменений механических свойств кабельного ПЭНП, модифицированного рентгеновским излучением ЭГР.

Образцы ПЭНП толщиной 80 мкм; 1,2 мм; 5 мм и 15 мм облучались в реакторе, принципиальная схема которого приведена в [1]. При определении значения  $\delta_{1/2}$  использовался сцинтилляционный дозиметр ДРГЗ-04 и тонкопленочные электретные дозиметры [3, 4]. Облучение электронами проводилось на ускорителе РТЭ-1 (энергия электронного пучка 900 кэВ). Методика определения глубины полупоглощения  $\delta_{1/2}$  рентгеновского излучения ЭГР в ПЭНП с использованием пленочных электретных дозиметров приведена в [1].

Результаты определения  $\delta_{1/2}$  для образцов ПЭНП разной толщины, облученных рентгеновским излучением ЭГР различной жесткости, представлены на рис. 1. Видно, что глубина полупоглощения рентгеновского излучения ЭГР в ПЭНП  $\delta_{1/2}$  существенным образом зависит от жесткости излучения, длины волны рентгеновского излучения ЭГР ( $\lambda=1\div 10$  нм). Значение  $\delta_{1/2}$  определяется напряжением питания реактора ЭГР и может составлять в ПЭНП более 10 мм.

По ГОСТ на кабельную продукцию [1, 4] толщина СПЭ изоляции токопроводящих жил ТПЖ силовых кабелей среднего и высокого напряжения обычно не превышает 12 мм. С учетом этого следует важный для практики вывод о том, что рентгеновское излучение ЭГР (при определенных режимах генерации) способно осуществлять модификацию радиационного сшивания полимеров на всю толщину изоляции ТПЖ кабелей среднего и высокого напряжения.

Электретная поляриметрия, метод измерения спектров токов термостимулированной деполяризации (ТСД) и метод измерения температурной зависимости электропроводности  $\ln \gamma = f(1/T)$  могут быть использованы для контроля радиационной модификации электрофизических свойств полимерных кабельных диэлектриков [1].

Ионизирующие излучения (электронный пучок и рентгеновское излучение ЭГР) могут существенно ускорять процессы релаксации электретной поляризации  $\ln U_3 = f(t)$ , сдвигать пики спектров токов ТСД в область более низких температур, вызывать значительное увеличение объемной электропроводности  $\gamma$  кабельного ПЭНП [1].

На рис. 2–4 представлены экспериментальные результаты исследования изменений электрофизических свойств облученного и необлученного ПЭНП (завод полимеров НК «Роснефть», Ангарск) методами электретной поляриметрии, ТСД спектроскопии, а также температурные зависимости электропроводности.

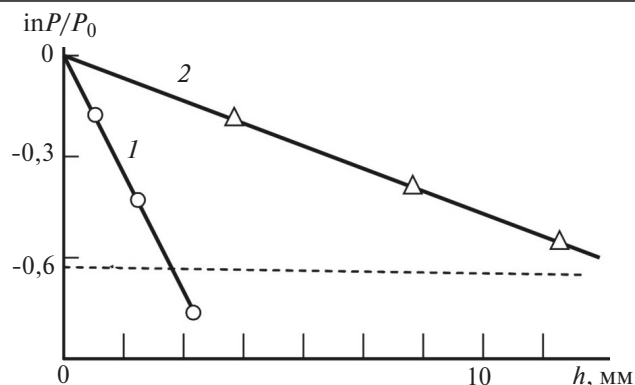


Рис. 1. Определение глубины полупоглощения рентгеновского излучения ЭГР в ПЭНП при разных режимах облучения: 1 –  $U_{\text{ЭГР}} = 6$  кВ; 2 –  $U_{\text{ЭГР}} = 50$  кВ

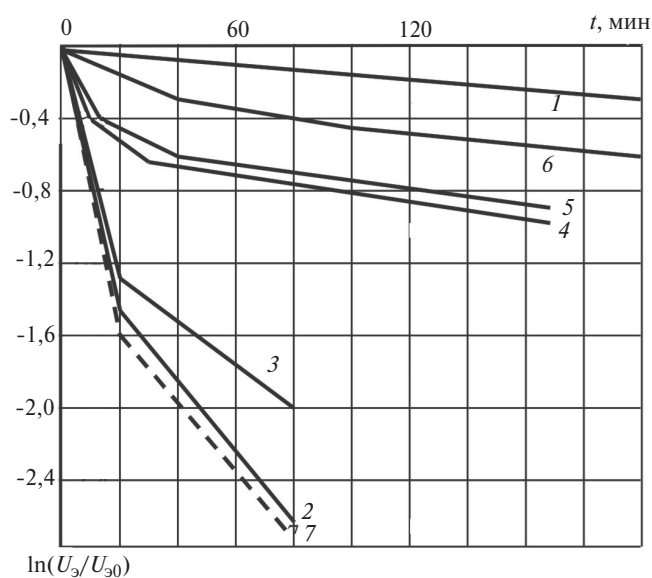


Рис. 2. Зависимости  $\ln(U_3/U_{30}) = f(t)$  для необлученного (1) и облученного ( $D = 30$  кРад) рентгеновским излучением ЭГР (2–6) и электронами (7) ПЭНП разной толщины: 1 – необлученный ПЭНП ( $h=80$  мкм); 2 –  $h=80$  мкм; 3 –  $h=2,4$  мм; 4 –  $h=5$  мкм; 5 –  $h=12,5$  мм; 6 –  $h=17,5$  мм

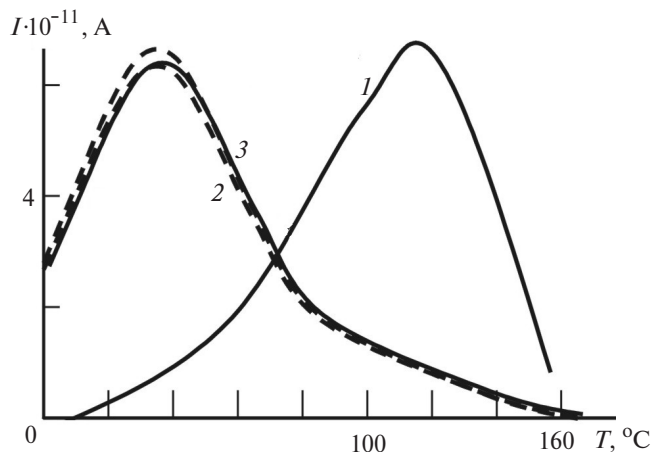


Рис. 3. Сопоставление спектров токов ТСД необлученной пленки ПЭНП (1) и ПЭНП, облученной электронами (2) и рентгеновским излучением ЭГР (3)

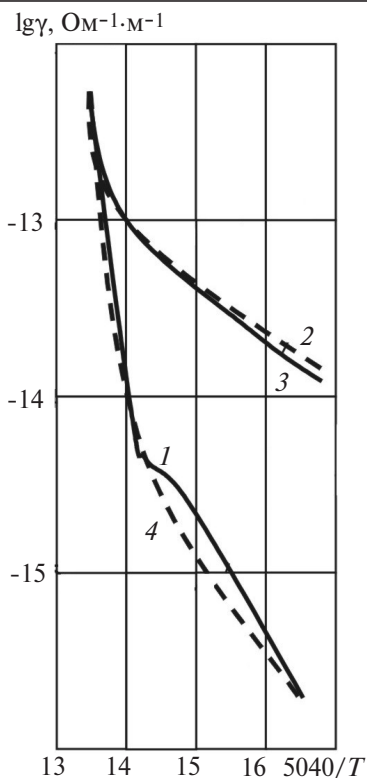


Рис. 4. Сопоставление зависимостей  $\lg \gamma = f(1/T)$  необлученной пленки ПЭНП (1), пленки ПЭНП, облученной электронами (2), рентгеновским излучением ЭГР,  $D = 30$  кРад (3) и прогретой в течение 1 ч при  $T = 60$  °С (4)

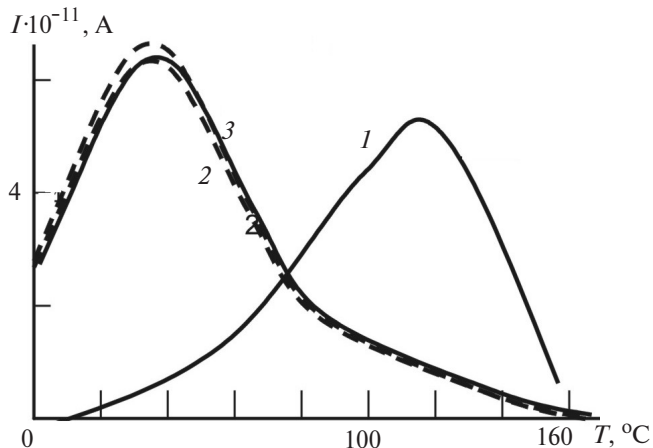


Рис. 5. Сопоставление спектров токов ТСД пленки ПЭНП, облученной излучением ЭГР,  $D = 30$  кРад и прогретой в течение 1 ч при  $T = 60$  °С (1) и пленки ПЭНП, облученной электронами (2) и рентгеновским излучением ЭГР (3)

Эксперименты показали, что все радиационные изменения электрофизических свойств ПЭНП обусловлены радиационным увеличением концентрации электронов и дырок в полимере  $N_{e,p}$  за счет разрыва химических связей с атомами водорода полимерной цепи.

В [1, 4] показано, что радиационные изменения электрофизических свойств ПЭНП в большинстве случаев являются обратимыми. Со временем после облучения разорванные излучением химические

связи в ПЭНП постепенно восстанавливаются (рис. 4 и 5), что, в свою очередь, вызывает обратимое уменьшение концентрации носителей заряда в полимере  $N_{e,p}$ . Процесс уменьшения концентрации  $N_{e,p}$  сопровождается уменьшением значения электропроводности  $\gamma$ , восстановлением исходного вида зависимостей  $\ln U_{\vartheta} = f(t)$  и формы спектров токов ТСД. В [1] показано, что процесс восстановления электрофизических свойств облученного полиэтилена с течением времени значительно ускоряется за счет его нагрева.

Проанализированы результаты сравнительных исследований механической прочности у электрической изоляции ТПЖ для кабелей среднего напряжения на основе сшитого полиэтилена низкой плотности, изготовленных с использованием технологий радиационного сшивания рентгеновским излучением электрического газового разряда ЭГР. Получены данные экспериментов на образцах в виде разрывных лопаток, вырубленных в соответ-

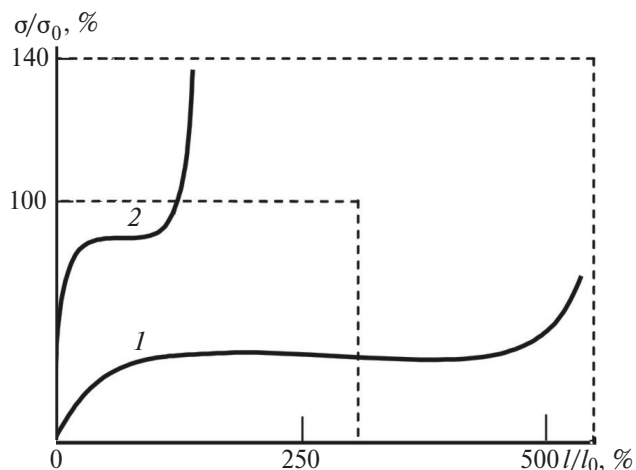


Рис. 6. Зависимость  $\sigma/\sigma_0 = f(I/I_0)$  для ПЭВП: 1 – необлученный образец; 2 – образец, сшитый рентгеновским излучением ЭГР

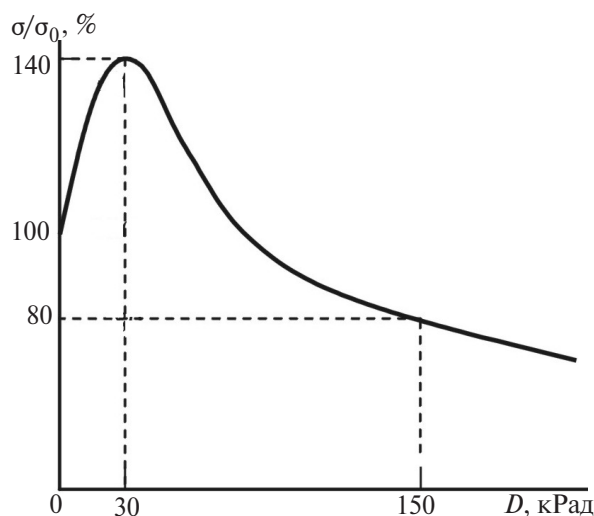


Рис. 7. Зависимость  $\sigma/\sigma_0 = f(D)$  для ПЭНП, сшитого рентгеновским излучением ЭГР

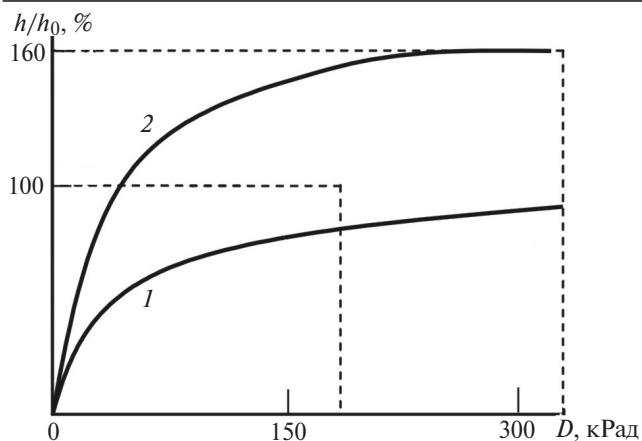


Рис. 8. Зависимость  $h/h_0 = f(D)$  (твердость  $h$ , измеренная методом Шора) для ПЭНП – (107-02К)-(1) и ПЭВП – (271-82К)-(2)  $h_0$ , сшитого рентгеновским излучением ЭГБР

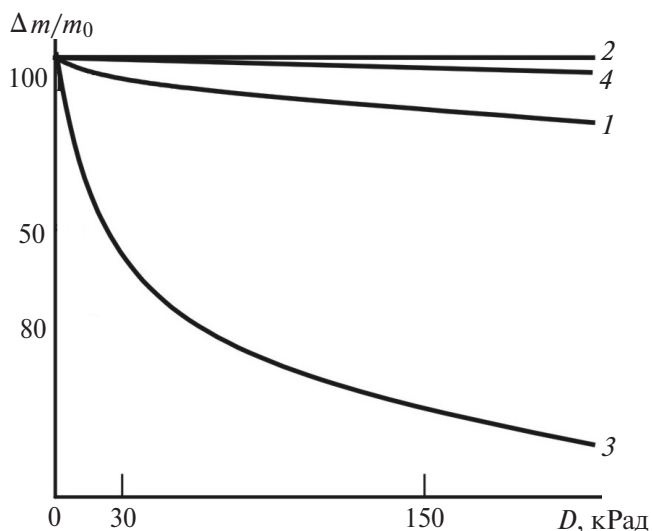


Рис. 9. Зависимость  $\Delta m/m = f(D)$  для гель-фракции ПЭНП – (107-02К), ПЭВП – (271-82К), сшитого (1, 2) рентгеновским излучением ЭГБР и несшитого (3, 4)

вии с ГОСТ ИЕС 60811-2-1 из ПЭ пластин и пленок, а также на полномасштабных образцах кабелей.

Результаты исследования механической прочности ПЭНП изоляции, сшитой в разных режимах облучения рентгеновским излучением ЭГР, представлены на рис. 6 и 7.

Из рис. 6–9 следует, что рентгеновское излучение ЭГР при определенных режимах облучения вызывает увеличение выхода гель-фракции  $\Delta m/m$  механической прочности  $\sigma/\sigma_0$  и твердости  $h/h_0$  ПЭНП изоляции ТПЖ силовых электрических кабелей.

Таким образом, экспериментально показано, что рентгеновское излучение ЭГР имеет высокую проникающую способность в ПЭНП и ПЭВП, по-

зволяющую проводить модификацию радиационного сшивания в слоях изоляции силовых кабелей среднего и высокого напряжения. Впервые определено, что радиационное сшивание ПЭНП и ПЭВП при определенных режимах облучения рентгеновским излучением ЭГР позволяет увеличить механическую прочность и твердость радиационно сшиваемых полимеров приблизительно на 40–60%.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Новиков Г.К., Потапов В.В., Сулов К.В., Федчишин В.В. Основы электротехнологии (электросинтез озона, плазменная модификация полимерных кабельных диэлектриков). Иркутск: Изд. Иркутского национального исследовательского технического университета, 2017, 208 с.
- Финкель Э.Э., Брагинский Р.П. Нагревостойкие провода и кабели с радиационно-модифицированной изоляцией. М.: Энергия, 1975, 193 с.
- Новиков, Г.К. Плазмофизические электротехнологии модификации полиолефиновой кабельной изоляции. Изд. Иркутского государственного технического университета, 2007, 104 с.
- Новиков Г.К., Потапов В.В., Сулов К.В., Федчишин В.В. Электротехнологическое и конструкционное материаловедение. Иркутск: Изд. ИргТУ, 2014, 336 с.
- Новиков Г.К., Федчишин В.В. Электрически активные центры захвата носителей заряда в неполярных и полярных полимерных диэлектриках. – Электричество, 2016, № 11, с. 51–54.
- Новиков Г.К., Федчишин В.В. Электрически активные центры захвата носителей заряда в диоксиде кремния  $\text{SiO}_2$  и слюде. – Электричество, 2017, № 5, с. 57–61.
- Пат. РФ № 2250912. Способ получения сшивного кабельного полиэтилена/ Г.К. Новиков, А.И. Смирнов, А.С. Жданов, БИ, 2005, № 12.
- Пат. РФ № 2322716. Устройство для сшивания кабельной изоляции/ Г.К. Новиков, А.И. Смирнов. – БИ, 2008, № 11.
- Пат. РФ 2662532. Способ радиационной сшивки полимерной изоляции электрических кабелей и проводов и устройство для его осуществления/ Г.К. Новиков, В.В. Федчишин, К.В. Сулов, А.И. Смирнов, В.В. Потапов, В.В. Новиков, О.Е. Пушко. – БИ, 2018, № 21.
- Новиков Г.К., Потапов В.В., Сулов К.В., Федчишин В.В., Шушпанов И.Н. Современная электротехнология: плазменная модификация полимерных кабельных диэлектриков, электросинтез озона. Иркутск: Изд. ИрННТУ, 2018, 180 с.

[28.01.2019]

*А в т о р ы:* Новиков Геннадий Кириллович – кандидат техн. наук, доцент Иркутского национального исследовательского технического университета (ИрННТУ), диссертацию защитил в 1995 г.

Федчишин Вадим Валентинович – кандидат техн. наук, директор института энергетики ИрННТУ, диссертацию защитил в 1996 г.

Какорин Андрей Алексеевич – директор технического департамента ОАО «Иркутсккабель», диссертацию магистра защитил в ИрННТУ в 2016 г.

## The Mechanical Strength and Hardness of Polymeric Materials Cross-Linked by X-Ray Radiation of Electric Gas Discharge

**NOVIKOV Gennady K.** (*Irkutsk National Research Technical University (IrNRTU), Irkutsk, Russia*) – Associate Professor of Power Supply and Electrical Engineering Dept., Cand. Sci. (Phys.-Math.)

**FEDCHISHIN Vadim V.** (*IrNRTU, Irkutsk, Russia*) – Director of Institute of Energy, Cand. Sci. (Eng.)

**KAKORIN Andrey A.** (*JSC «Irkutskkabel», Irkutsk, Russia*) – Director of the Technical Dept., Undergraduate of IrNRTU

The mechanical and electrophysical properties of polymeric materials cross-linked by the X-ray radiation of electric gas discharge (EGD) are investigated. The influence of the radiation cross-linking technology on the strength and hardness of polymers is presented on the examples of low- and high-density polyethylene (LDPE and HDPE) samples with different thickness made using the technologies of cross-linking by means of X-ray radiation of electric gas barrier discharge (EGBD) [1–10]. The experimental data have been obtained on samples made in the form of rupture blades cut from polyethylene plates in accordance with GOST IEC 60811-2-1. For studying the electrophysical properties and semi-absorption depth of EGD X-ray radiation, samples in the form of LDPE and HDPE disks having different thickness were used. The X-ray radiation penetration depth into the experimental samples was estimated. Comparative investigations of changes in the electrophysical properties, mechanical strength  $\sigma$ , hardness  $h$ , and gel fraction  $\sigma_g$  of cable LDPE under the effect of X-ray radiation from EGD and under the effect of electron beam have been carried out. It has been shown that with using the technology of cross-linking by means of X-ray radiation from EGD, the mechanical strength and hardness of LDPE and HDPE can be increased by no less than 30 and 60%.

**Key words:** polymeric materials, X-ray radiation, absorption depth, electric gas discharge, mechanical strength and hardness

### REFERENCES

1. **Novikov G.K., Potapov V.V., Suslov K.V., Fedchishin V.V.** *Osnovy elektrotekhnologii (Elektrosintez ozona, plazmennaya modifikatsiya polimernykh kabel'nykh dielektrikov)* (Fundamentals of electrotechnology (electrosynthesis of ozone and plasma modification of polymeric cable dielectrics). Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, 2017, 208 p.
2. **Finkel' E.E., Braginskiy R.P.** *Nagrevostoykiye provoda i kabeli s radiatsionno-modifitsirovannoy izolyatsiyey* (Heat-resisting wires and cables with radiation modified insulation). Moscow, Energiya, 1975, 193 p.
3. **Novikov G.K.** *Plazmafizicheskiye elektrotekhnologii modifikatsii poliolefinovoi kabel'noi izolyatsii* (Plasma-physical electrotechnologies for modifying polyolefinic cable insulation). Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 2007, 104 p.
4. **Novikov G.K., Potapov V.V., Suslov K.V., Fedchishin V.V.** *Elektrotekhnologicheskoe i konstruktsionnoe materialovedeniye* (Electro-technological and structural materials science). Irkutsk, Irkutsk State Technical University, 2014, 336 p.
5. **Novikov G.K., Fedchishin V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2016, No. 11, pp. 51–54.
6. **Novikov G.K., Fedchishin V.V.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 5, pp. 57–61.

7. **Pat. RF No. 2250912.** *Sposob polucheniya sshivnogo kabel'nogo polietilena* (The method of obtaining cross-linked cable polyethylene)/G.K. Novikov, A.I. Smirnov, A.S. Zhdanov. Bulletin of inventions, 2005, No. 12.

8. **Pat. RF No. 2322716.** *Ustroystvo dlya sshivaniya kabel'noi izolyatsii* (A device for stapling the cable insulation)/G.K. Novikov, A.I. Smirnov. Bulletin of inventions, 2008, No. 11.

9. **Pat. RF No. 2662532.** *Sposob radiatsionnoy sshivki polimernoy izolyatsii elektricheskikh kabelei i provodov i ustroystvo dlya yego osushchestvleniya* (A method for obtaining cross-linked cable polyethylene, radiation cross-linking of the polymeric insulation of electric cables and wires, and a device for its embodiment)/G.K. Novikov, V.V. Fedchishin, K.V. Suslov, A.I. Smirnov, V.V. Potapov, V.V. Novikov, O.Ye. Pushkov. Bulletin of inventions, 2018, No. 21.

10. **Novikov G.K., Potapov V.V., Suslov K.V., Fedchishin V.V., Shushpanov I.N.** *Sovremennaya elektrotekhnologiya: plazmennaya modifikatsiya polimernykh kabel'nykh dielektrikov, elektrosintez ozona* (Modern electrotechnology: plasma modification of polymeric cable dielectrics and electrosynthesis of ozone). Irkutsk, Irkutsk National Research Technical University, 2018, 180 p.

[28.01.2019]