

УДК 620.172.215.1:620.172.222  
[https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4\(58\)-62-74](https://doi.org/10.47612/2073-4794-2022-15-4(58)-62-74)

Поступила в редакцию 21.09.2022  
Received 21.09.2022

**З.В. Ловкис, С.И. Корзан**

*РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук  
Беларуси по продовольствию», г. Минск, Республика Беларусь*

## **ИЗМЕНЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПАКОВОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

**Аннотация.** В статье представлены результаты исследований механических свойств упаковочных материалов, подвергнутых ультрафиолетовому излучению. Описана методика проведения исследований. Определены предел прочности при растяжении и разрыве, относительное удлинение при разрыве и модуль упругости образцов. Дана визуальная оценка состояния поверхностей образцов и результаты контроля их массы и геометрических размеров. Установлены зависимости изменения прочности и относительного удлинения при разрыве от продолжительности воздействия ультрафиолетового излучения.

**Ключевые слова:** упаковка, ультрафиолетовое излучение, температура, влажность, лабораторный стенд, зависимости

**Z. V. Lovkis, S. I. Korzan**

*RUE “Scientific and Practical Center for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus”,  
Minsk, Republic of Belarus*

## **CHANGES IN MECHANICAL PROPERTIES OF PACKAGING MATERIALS AS A RESULT OF EXPOSURE TO THEM WITH UV RADIATION**

**Abstract.** The article presents the results of studies of the mechanical properties of packaging materials subjected to ultraviolet radiation. The research methodology is described. The ultimate tensile and rupture strength, elongation at break, and modulus of elasticity of the samples were determined. A visual assessment of the state of the surfaces of the samples and the results of monitoring their mass and geometric dimensions are given. The dependences of the change in strength and relative elongation at break on the duration of exposure to ultraviolet radiation have been established.

**Key words:** packaging, ultraviolet radiation, temperature, humidity, laboratory bench, dependencies

**Введение.** Перед отечественными и зарубежными учеными давно стоит одна из важнейших задач по разработке упаковочных материалов и технологических решений, направленных на создание полимеров, имеющих склонность к ускоренному «состариванию» или деградации. При этом стоит отметить, что при выборе подходов к созданию таких материалов следует уделить особое внимание изучению свойств, сроков и условий хранения пищевой продукции для того, чтобы исключить возможность начала процесса деградации до момента окончания жизненного цикла упакованного продукта [1, 2]. В качестве одного из таких решений может быть использовано ультрафиолетовое излучение (УФ-излучение), которое оказывает существенное влияние на скорость фотодеструкции и разрушение материала [3–6].

При старении изменяются многие свойства полимерных материалов — механические (разрушающее напряжение при растяжении, относительное удлинение при разрыве, удельная ударная вязкость, модуль упругости), диэлектрические, окраска (полимер желтеет или окрашивается в другие цвета); состояние поверхности (образуются трещины, появляется липкость и выкрашивание); состояние материала в целом (появление хрупкости, отвердевание или

размягчение). Кроме того, часто изменяются прозрачность, растворимость, запах, а также некоторые химические свойства материалов [7].

Факторы, способствующие старению полимерных материалов, разделяют на внутренние и внешние [8]. К внутренним относят состав и структуру полимера, молекулярную массу и молекулярно-массовое распределение, наличие внутренних дефектов, обусловленных неравномерным распределением вводимых наполнителей и различных добавок, внутренние напряжения. К внешним факторам относят температуру и влажность воздуха, световую и проникающую радиацию, кислород, агрессивные газообразные примеси, содержащиеся в воздухе ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$  и др.), механические нагрузки от ветра, динамической энергии водяных капель, града, песка, пыли. Наиболее распространенным и практически важным активатором, способствующим старению полимерных материалов, является температура. При хранении материал находится под воздействием температуры окружающей среды, которая может оставаться длительное время постоянной либо изменяться в каких-либо пределах.

При отсутствии воздействия света и при комнатной температуре окисление пленок из полиэтилена протекает очень медленно. При повышении температуры скорость окисления возрастает. Аналогичную картину можно наблюдать при воздействии рассеянного и, особенно прямого солнечного света. При всех видах внешних воздействий (тепло и свет) в присутствии кислорода в «инертном» полимере происходит образование кислородсодержащих групп:  $\text{C}=\text{O}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{COO}$ ,  $\text{OON}$ , причем,  $\text{C}=\text{O}$  группы могут быть разных типов — кетонные, альдегидные, сложноэфирные и др. Все эти группы имеют характерные полосы поглощения в ИК-спектре [7]. Внешние воздействия непременно приводят к образованию этих групп в различных количественных соотношениях. Например, при воздействии высоких температур, преобладают кетонные группы, при воздействии излучения — кетонные и альдегидные [8].

Поскольку любые изменения полиэтиленового слоя связаны с возможным изменением его структуры после различных воздействий, представляло интерес проведение соответствующего исследования.

Цель исследований — установить изменение механических свойств упаковочных материалов, подвергнутых воздействию ультрафиолетового излучения.

**Объекты и методы исследований.** Объектом исследований являлись образцы упаковочных материалов.

Испытания упаковочных материалов ультрафиолетовым излучением проводились на лабораторном стенде с контролируемыми условиями [9]. Лабораторный стенд (рис. 1) представляет собой камеру, состоящей из двух секций: морозильной 1 и холодильной 2, которая оборудована стандартным набором оборудования: компрессор, конденсатор, дроссель, испарители. Секции оборудованы контрольно-измерительными приборами и оборудованием. В секциях 1 и 2 установлены решетки 3 для укладки образцов. Морозильная и холодильная секции герметично закрываются дверцами 4 и 5.

В состав контрольно-измерительных приборов входят: термометры 6 и 7, датчик температуры 8, датчик температуры и влажности 9, термогигрометр 10, система измерения и записи данных, состоящая из преобразователя относительной влажности и температуры ПВТ100-Н4.2.И 11, измерителя двухканального ТРМ200-Щ1, модуля сбора данных МСД-200.

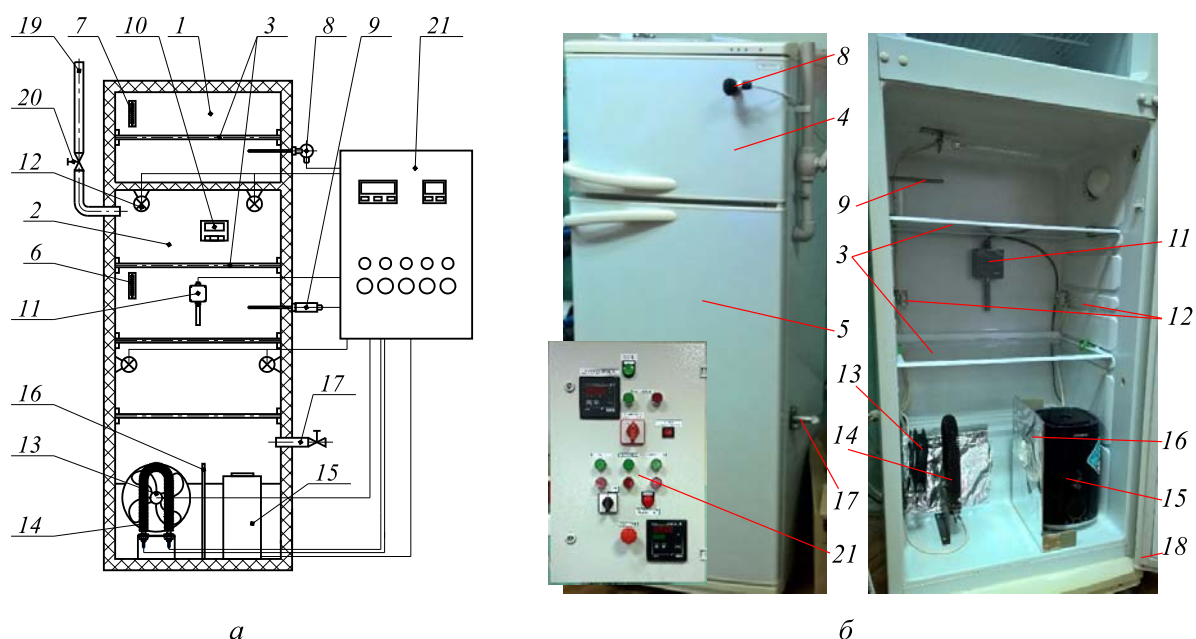
Дополнительно холодильная секция 2 оборудована УФ-лампами 12, вентилятором 13, ТЭНом воздушным 14, увлажнителем 15, перегородкой 16, а также патрубком 17 с вентилем для подачи различных газовых сред в камеру.

Для герметизации камеры, лабораторный стенд оборудован уплотнителем 18.

При работе лабораторного стенда в секции 2 может образовываться избыточное давление. Для этого в стенде предусмотрена вентиляционный трубопровод 19 соединяющий секцию 2 с окружающей средой. Вентиляционный трубопровод 19 снабжен задвижкой 20.

Управление работой лабораторного стенда осуществляется с пульта управления 21, согласно выбранному режиму работы.

В качестве источника излучения при облучении упаковочных материалов, использовались бактерицидные ртутные разрядные лампы низкого давления производства фирмы Philips, модели «tuv-15w», дающие коротковолновое ультрафиолетовое излучение с максимумом в 253,7 нм, обладающее бактерицидным действием. Поверхностная доза облучения в выбранном участке спектра исследования составляла от 18 до 64 мДж/см<sup>2</sup> в УФ диапазоне, от 540 до 1525 мДж/см<sup>2</sup> в видимом и от 47 до 57 мДж/см<sup>2</sup> в инфракрасном диапазоне. При облучении пленочных материалов источник излучения ориентировался над образцами в различных плоскостях.



1 — морозильная секция; 2 — холодильная секция; 3 — решетка; 4, 5 — дверца; 6, 7 — термометр; 8 — датчик температуры; 9, 11 — датчик температуры и влажности; 10 — термогигрометр; 12 — УФ-лампа; 13 — вентилятор; 14 — ТЭН воздушный; 15 — увлажнитель; 16 — перегородка; 17 — патрубок; 18 — уплотнитель; 19 — вентиляционный трубопровод; 20 — задвижка; 21 — пульт управления

Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) лабораторного стенда  
 Fig. 1. Scheme (a) and general view (б) of the laboratory stand

В качестве объектов исследования были использованы материалы: упаковочная пленка из полиэтилена низкого давления (обр. № 1), упаковочная пленка для заморозки из полиэтилена низкого давления (обр. № 2), биаксиально-ориентированная полипропиленовая пленка (обр. № 3), целлофановая пленка (обр. № 4), целлюлозная пищевая бумага (обр. № 5), пергамент (обр. № 6), подпергамент (обр. № 7), опытный образец биоразлагаемой пленки на основе полимолочной кислоты (обр. № 9), образцы биоразлагаемой компостируемой пленки на основе полимолочной кислоты (обр. 10 — 13).

Общий вид образцов упаковочных материалов приведен на рис. 2.

Для наглядного представления и точности проведения эксперимента, и сравнительной оценки образцы упаковочных материалов подготавливались одинакового размера 100 x 50 мм, размещались на стеллажах стенда и хранились при температуре  $25 \pm 1$  °С под ультрафиолетовым излучением ламп лабораторного стенда.

Через промежутки времени 24, 48, 96, 168, 336, 504 и 672 часа контролировалась масса и геометрические параметры образцов, определялась визуальная оценка состояния поверхности образцов и оценка механических свойств образцов путем определения предела прочности при растяжении, относительного удлинения при разрыве и модуля упругости [7, 10, 11].

Для определения механических свойств при растяжении нами был разработан и изготовлен испытательный стенд упаковочных материалов на растяжение (рис. 3).

Испытательный стенд представляет собой разрывную машину, состоящую из неподвижного 1 и подвижного 2 зажимов, силоизмерительного элемента 3, систем направляющих 4 и 5, шпильки 6 с гайкой 7, имитирующей червячный редуктор, пластины для скользящей опоры 8 и уголков 9 и 10. Неподвижный зажим 1, пластина для скользящей опоры 8 и уголки 10 закреплены на станине 11. Стенд дополнительно оборудован измерительной линейкой 12 для замера удлинения материала при разрыве.

Порядок работы на испытательном стенде: образец материала с отмеченным рабочим участком 50 мм закрепляли в зажимах испытательного стенда так, чтобы продольная ось образца была расположена в направлении растяжения и приложенные силы действовали по всей ширине образца. Затем прикладывая усилия, осуществляли растягивание и деформацию образцов, при этом считывали данные действующего усилия с силоизмерительного элемен-

та. После разрыва образца, фиксировали усилие при разрыве и освобождали разорванный образец из зажимов.

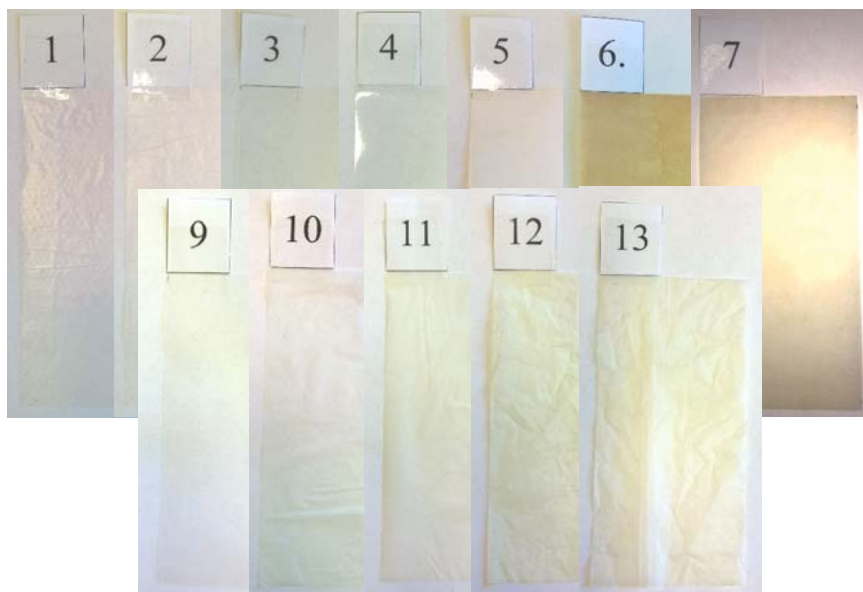


Рис. 2. Общий вид образцов упаковочных материалов  
Fig. 2. General view of samples of packaging materials

Испытания проводились в трехкратной повторности. Во внимание принимались лишь те измерения, в которых разрыв материала происходил в области 50 мм рабочего участка.

На испытательном стенде подвергались разрыву образцы размером 100 x 50 мм, за исключением обр. №3 и №4 — 100 x 25 мм в связи с высокой прочностью.

Испытательный стенд позволил установить усилие деформации на разрыв и удлинение при разрыве упаковочных материалов.

Затем определяли предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве и модуль упругости образцов [10, 12].

Предел прочности при растяжении  $\sigma_p$  (Па) — максимальное напряжение, которое может выдержать образец, не разрушаясь, определяли по формуле (1):

$$\sigma_p = \frac{P}{S_0}, \quad (1)$$

где  $P$  — усилие при разрыве, Н;  $S_0$  — первоначальная площадь поперечного сечения образца, м<sup>2</sup>.

Относительное удлинение при разрыве  $\varepsilon_p$  — способность материала менять первоначальную длину при растяжении под действием внешних сил вплоть до разрушения. Относительное удлинение выражается в процентах от первоначальной длины рабочей части образца, принятой за 100 % (формула 2):

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta l}{l} 100 = \frac{l - l_0}{l_0}, \quad (2)$$

где  $\Delta l$  — удлинение образца, мм;  $l$  — длина рабочей части образца в момент разрушения, мм;  $l_0$  — первоначальная длина рабочей части образца, мм, равна 50 мм.

Модуль упругости образца при растяжении характеризует степень жесткости материала и определяется отношением нормального напряжения к соответствующему относительному удлинению в пределах пропорциональности. Модуль упругости  $E$  (Па) рассчитывали на основании закона Гука согласно формуле (3):

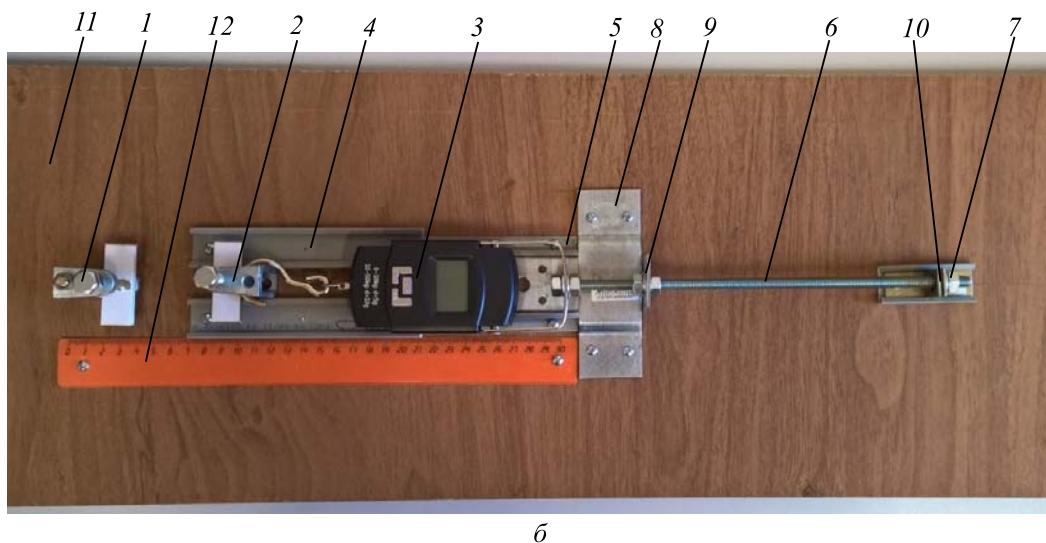
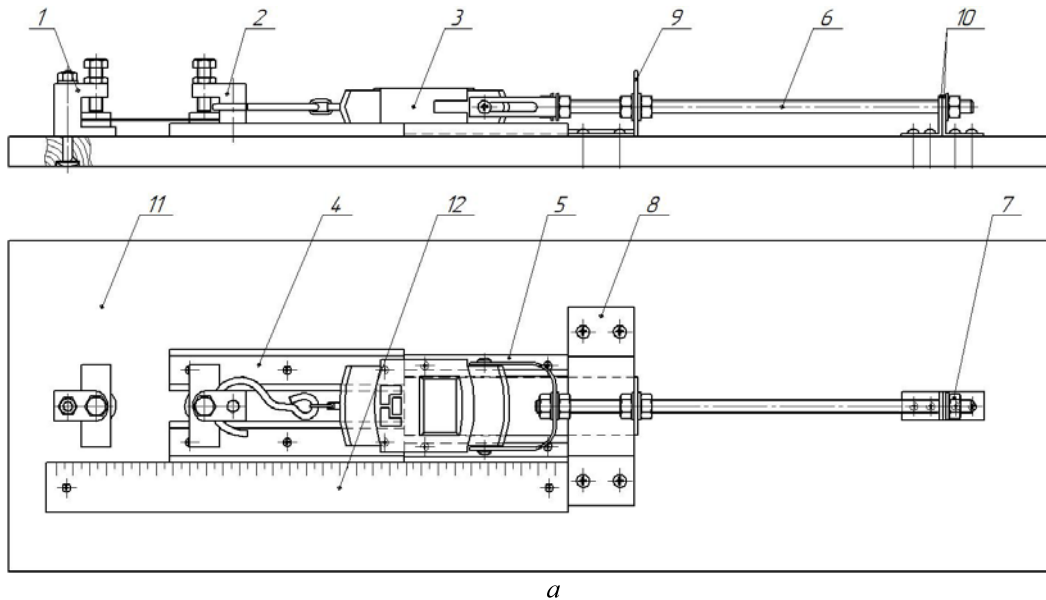
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — относительное удлинение при напряжении растяжения  $\sigma$ .

В ходе обработки экспериментальных данных установлено, что изменение прочности в зависимости от продолжительности УФ-излучения испытываемых образцов описывается уравнением (4):

$$\sigma_t = a - bt, \quad (4)$$

где  $a$  — прочность до испытания под воздействием УФ-излучения;  $b$  — изменение прочности в течение суток;  $t$  — продолжительность воздействия УФ-излучения.



1 — зажим неподвижный; 2 — зажим подвижный; 3 — силоизмерительный элемент — безмен;  
4, 5 — направляющие; 6 — шпилька; 7 — гайка; 8 — пластина для скользящей опоры;  
9, 10 — уголки; 11 — станина

Рис. 3. Схема (а) и общий вид (б) испытательного стенда на растяжение  
Fig. 3. Scheme (a) and general view (б) of the tensile test bench

Зависимость изменения относительного удлинения при разрыве от продолжительности УФ-излучения испытываемых образцов имеет вид (5):

$$\varepsilon_t = At^{-C}, \quad (5)$$

где  $A$  и  $C$  — константы.

Приведенные зависимости для описания изменения прочностных и деформационных свойств носят эмпирический характер и могут использоваться для экстраполяции только в определенных пределах. Полученные зависимости подтверждаются рядом данных, полученных Долежелом Б. [8] в ходе изучения в естественных климатических условиях на старения полистирола и полиэтилена.

Согласно ГОСТ 9.708 [13] результаты испытаний представляются в форме графика, показывающего зависимость коэффициента сохранения свойств  $K_t$  образцов от продолжительности испытаний.

Коэффициент сохранения свойств ( $K_t$ ) в процентах вычисляли по формуле (6):

$$K_t = \frac{\sigma_t}{\sigma_0} \cdot 100, \quad (6)$$

где  $\sigma_t$  — значение показателя напряжения после испытаний к моменту времени воздействия УФ-излучения  $t$ , МПа;  $\sigma_0$  — значение показателя напряжения до испытаний, МПа.

При проведении экспериментальных исследований использовали современные измерительные приборы и оборудование. Основные параметры используемых измерительных приборов и оборудования представлены в табл. 1.

При проведении экспериментальных исследований полученные численные значения, могут быть расположены в пределах возможной ошибки опыта, а полученные закономерности — неточными, поэтому необходима оценка погрешности и достоверности опыта.

Достоверность опыта зависит от погрешности и количества измерений, поэтому для установления достоверности опытных данных было принято минимальное число повторений — 3.

Таблица 1. Параметры приборов и оборудования  
Table 1. Instrument and equipment parameters

Тип прибора	Марка	Предел измерения		Погрешность прибора
		нижний	верхний	
Часы	CASIO WR 50M	0 ч 0 мин	11 ч 59 мин	0,67 с/сут
Термометр	CHECK-TEMP	-50 °C	+150 °C	± 0,3 °C
Термопреобразователь сопротивления	ДТС105-50М.В3.200	-50 °C	+150 °C	± (0,3 + 0,005· T ) <sup>1</sup>
Преобразователь влажности и температуры	ДВ2ТТ20-ГМ-4Т-1П N 7242	0 °C	+150 °C	± 0,5 °C
		0 %	98 %	± 2 %
Преобразователь относ. влажности и температуры	ПВТ100-Н4.2.И	-40 °C	+80 °C	± 0,5 °C
		0 %	100 %	± 3 %
Измеритель-регулятор микропроцессорный	2ТРМ1	-200 °C	+200 °C	± 0,25 %

1.  $T$  — абсолютное значение температуры, °C

**Результаты исследований и их обсуждение.** На протяжении всего промежутка испытаний масса и геометрические размеры образцов не изменялись, за исключением опытного образца биоразлагаемой пленки на основе полимолочной кислоты (обр. №9). Его масса спустя 672 ч увеличилась практически на 25 % по сравнению с исходной. Это связано с разрывом макромолекулярной цепи по радикальному механизму. Деструкция цепи приводит к изменению физико-химических характеристик и к ухудшению эксплуатационных свойств.

Визуальная оценка состояния поверхности образцов показала, что внешний вид испытываемых образцов изменяется: образец №3 спустя сутки приобретает желтоватый оттенок со стороны воздействия УФ-излучения, образец №7 становится более желтым по сравнению с контрольным образцом, напоминая цвет старых книг. Цвет образцов №12 и №13 стал светлее по сравнению с контрольными образцами, а образец №9 вовсе на 7 сутки стал очень хрупким и при малейшем контакте с ним рассыпался. Образцы №1 и №2 на протяжении 14 сут еще сохраняли свои свойства, при дальнейшем воздействии УФ-излучения становились хрупкими. Также установлено, что практически у всех образцов на 14 сут сжались и свернулись края. В образцах №5 и №6 изменений не обнаружено.

Испытуемые образцы упаковочных материалов хранимые в среде УФ-излучения лабораторного стенда приведены на рис. 4.

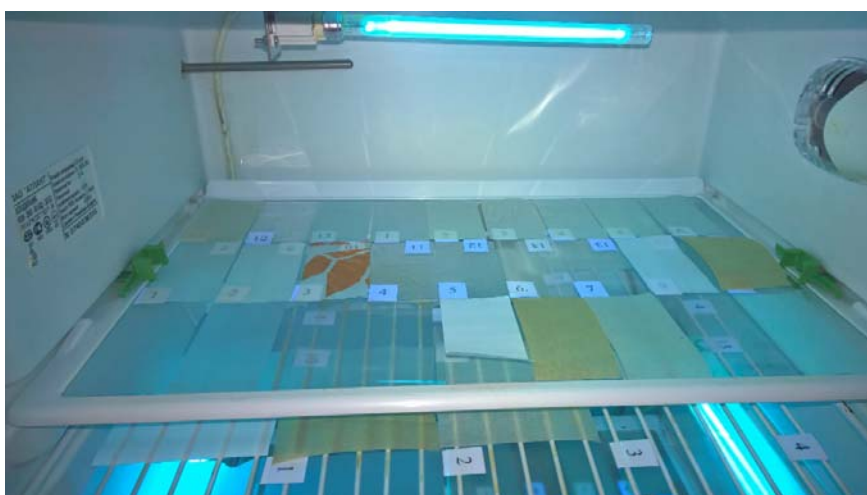


Рис. 4. Испытуемые образцы в лабораторном стенде  
 Fig. 4. Test samples in a laboratory stand

Получены зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении испытуемых образцов, подверженных УФ-излучению (рис. 5–12).

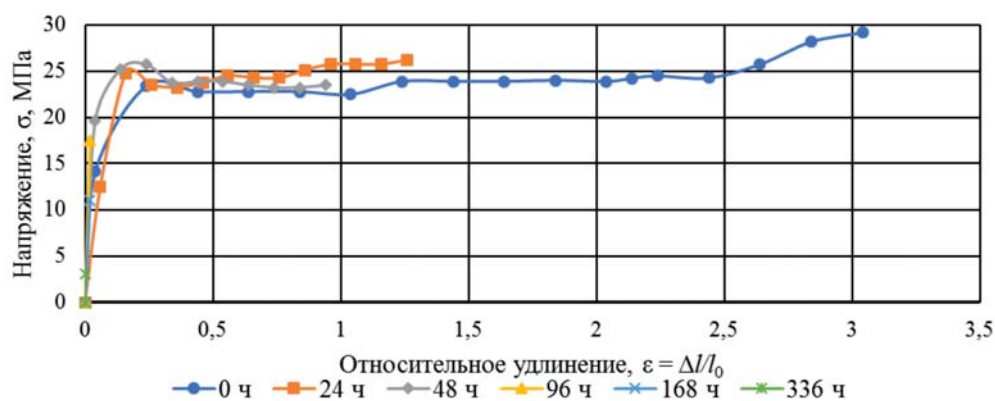


Рис. 5. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №1, подверженного УФ-излучению  
 Fig. 5. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 1 exposed to UV radiation

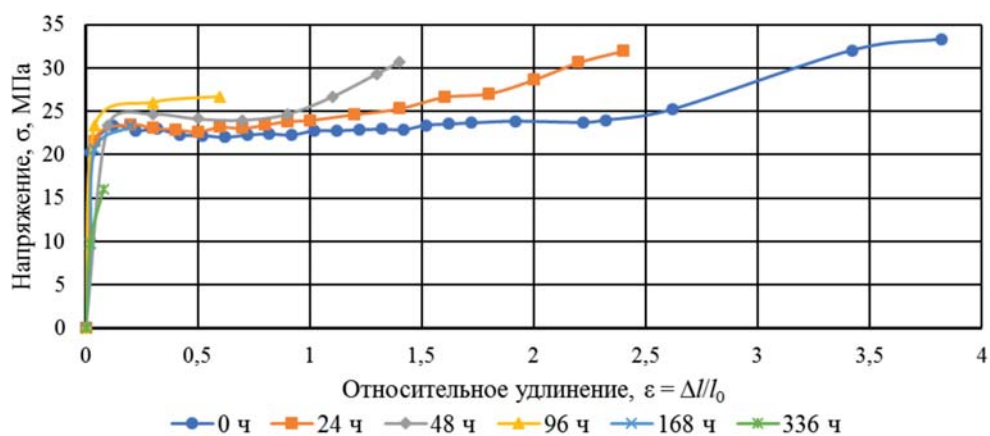


Рис. 6. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №2, подверженного УФ-излучению  
 Fig. 6. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 2 exposed to UV radiation

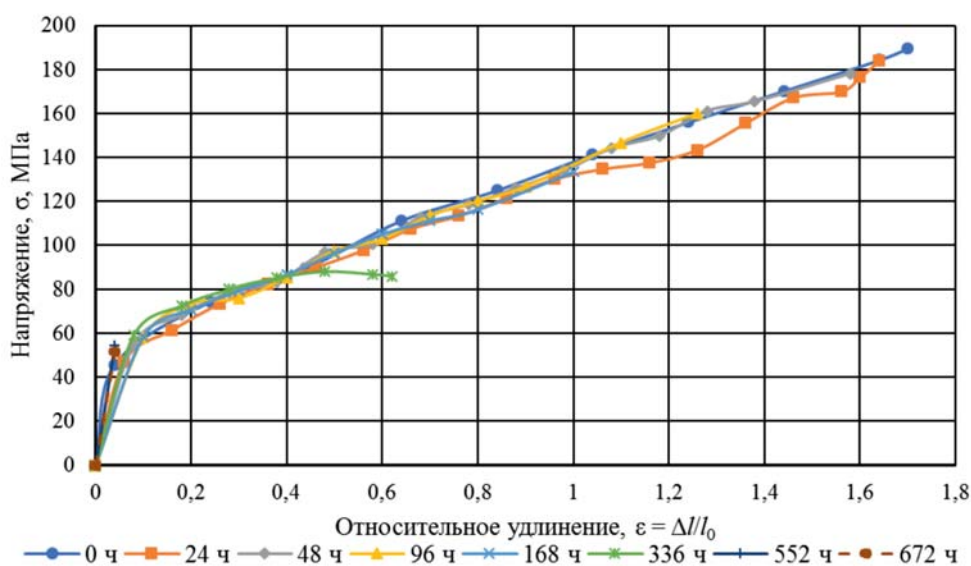


Рис. 7. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №3, подвергнутого УФ-излучению

Fig. 7. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 3 exposed to UV radiation

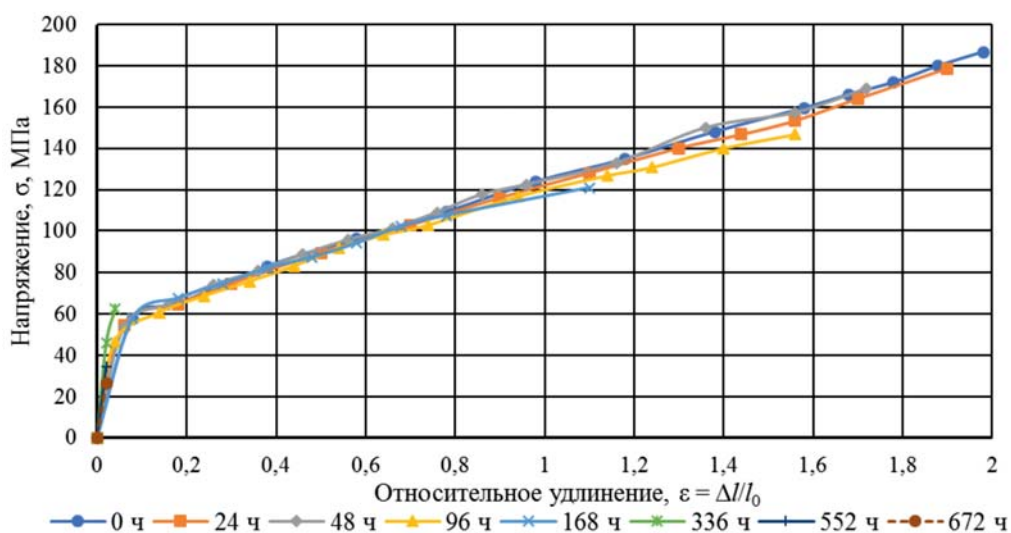


Рис. 8. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №4, подвергнутого УФ-излучению

Fig. 8. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 4 exposed to UV radiation

Из рис. 5–12 видно, что на относительное удлинение образцов значительно влияет продолжительность воздействия ультрафиолетового излучения, и с его ростом, относительное удлинение снижается.

На первом участке в пределах упругих деформаций для образцов №1, 2, 11, 12 и 13 (рис. 5, 6, 10, 11, 12 и 13) относительное удлинение составляет  $\varepsilon = 0,1$ , при достижении напряжения  $\sigma \geq 25$  МПа, материал течет и впоследствии разрушается.

Для образцов №3 и 4 (рис. 7 и 8) на первом участке в пределах упругих деформаций относительное удлинение составляет  $\varepsilon = 0,05$ , при достижении напряжения  $\sigma \geq 60$  МПа, материал течет по прямой пропорциональной зависимости и впоследствии разрушается.

Образец №10 (рис. 9) начинает деформироваться уже при достижении напряжения  $\sigma \geq 10$  МПа, затем течет и впоследствии разрушается.

На рис. 13 приведена динамика изменения предела прочности при разрыве образцов подверженных УФ-излучению, у которых относительное удлинение отсутствовало.



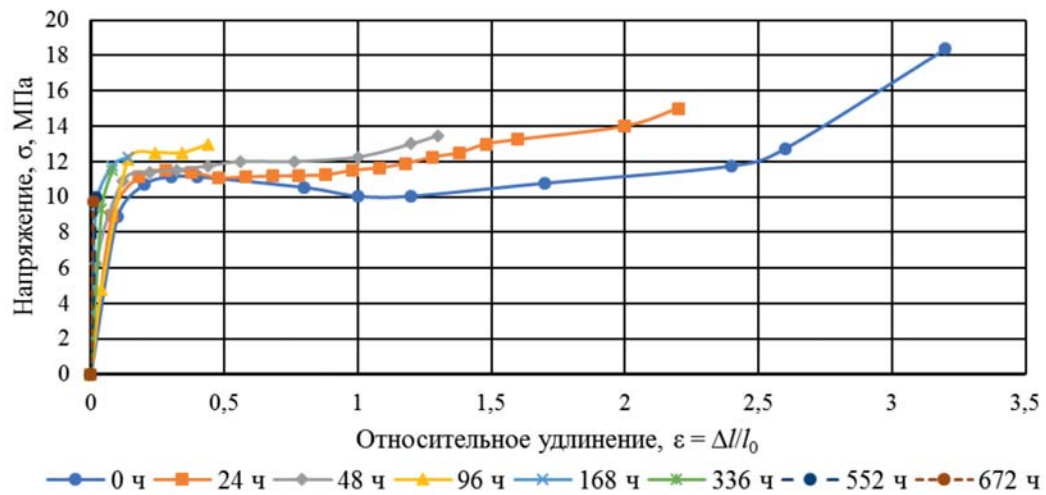


Рис. 9. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №10, подвергнутого УФ-излучению  
 Fig. 9. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 10 exposed to UV radiation

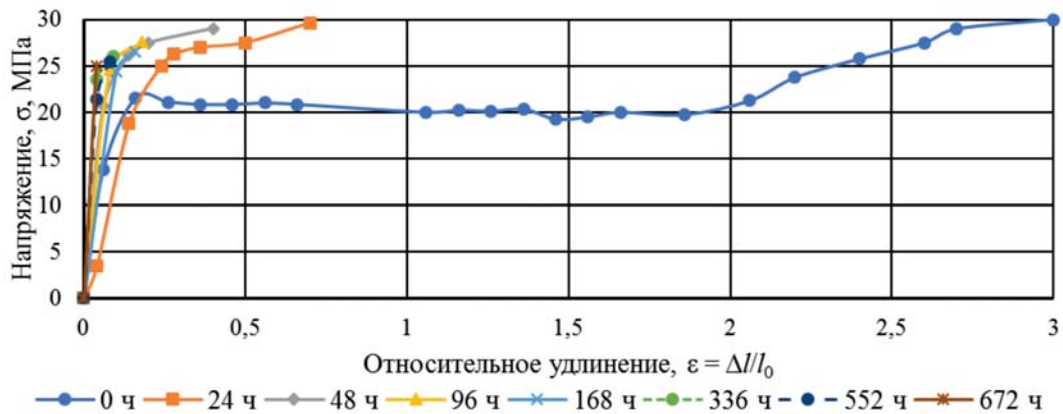


Рис. 10. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №11, подвергнутого УФ-излучению  
 Fig. 10. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 11 exposed to UV radiation

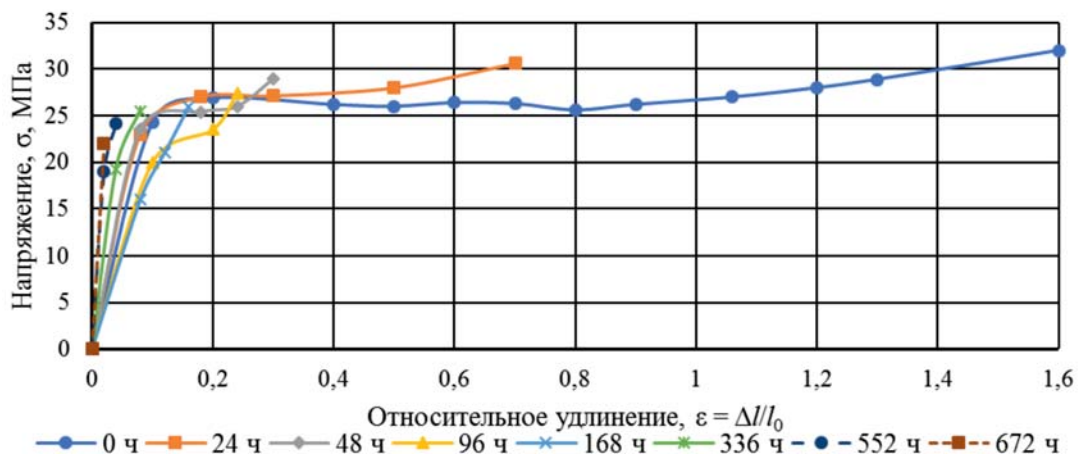


Рис. 11. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №12, подвергнутого УФ-излучению  
 Fig. 11. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 12 exposed to UV radiation

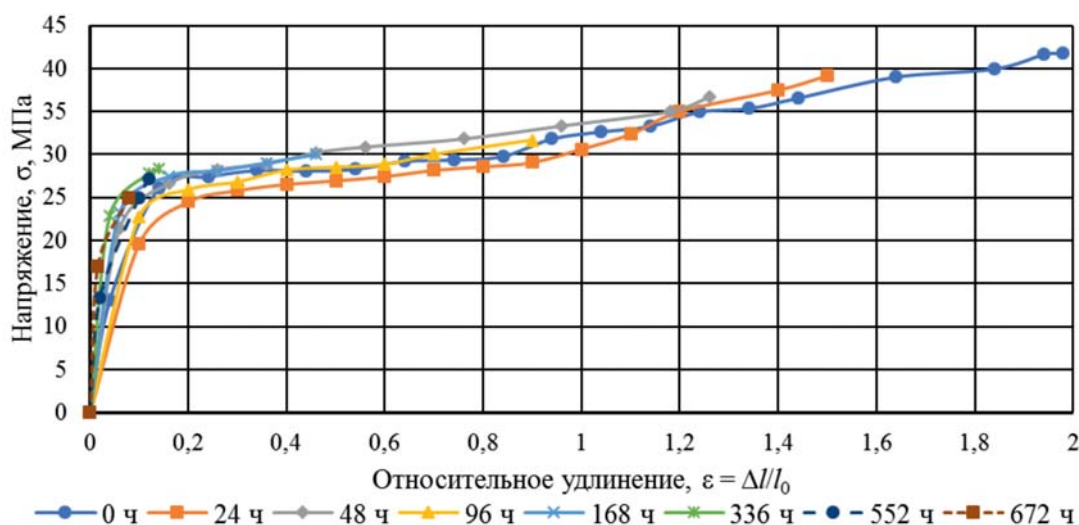


Рис. 12. Зависимости изменения напряжения от относительного удлинения при растяжении обр. №13, подверженного УФ-излучению  
 Fig. 12. Stress variation versus tensile elongation mod. No. 13 exposed to UV radiation

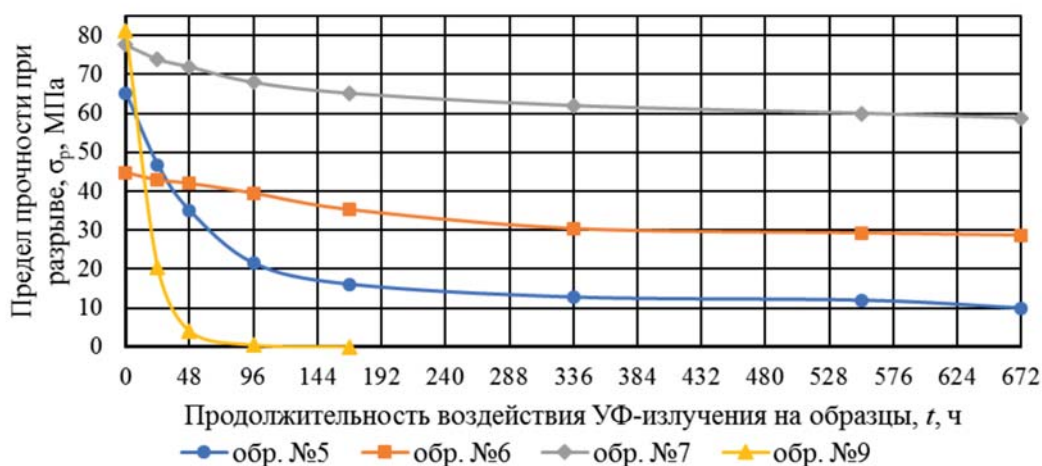


Рис. 13. Динамика изменения предела прочности при разрыве образцов упаковочных материалов, подверженных УФ-излучению  
 Fig. 13. Variation in tensile strength during rupture of samples of packaging materials exposed to UV radiation

Из рис. 13 видно, что на протяжении  $\sim 140$  ч воздействия УФ-излучения на образцы, их предел прочности при разрыве снижается по обратной пропорциональной зависимости, в последующем воздействии практически не изменяется.

Подставив известные значения в формулу (3), определили модуль упругости упаковочных материалов, обладающих относительным удлинением (рис. 14).

Модуль упругости показывает критическое напряжение, которое может иметь структура материала при максимальной ее деформации до разрушения. Невысокие значения модуля упругости полимеров способствуют постепенному увеличению необратимых деформаций при постоянной нагрузке.

Следует отметить, что сам по себе модуль упругости полимеров не дает полного представления об их возможностях, поскольку при  $\epsilon \rightarrow 0$  величина  $E$  может достигать больших значений даже для материалов с незначительной прочностью. Такой эффект наблюдается, например, для хрупких материалов (керамика, чугун, пластмассы при температурах ниже температуры морозостойкости) [14].

Полученные значения модуля упругости при растяжении для большинства испытуемых образцов схожи с табличными значениями [15–18].

Изменение коэффициента сохранения свойств испытуемых образцов от продолжительности воздействия УФ-излучения представлено в виде зависимостей на рис. 15.

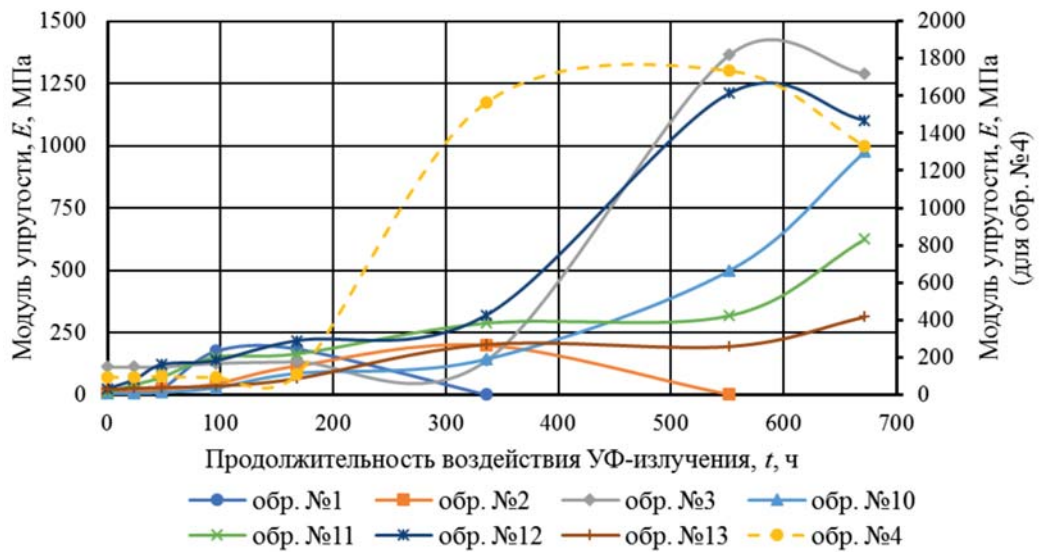


Рис. 14. Изменение модуля упругости испытуемых образцов в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения  
 Fig. 14. Change in the modulus of elasticity of the test samples depending on the duration of exposure to UV radiation

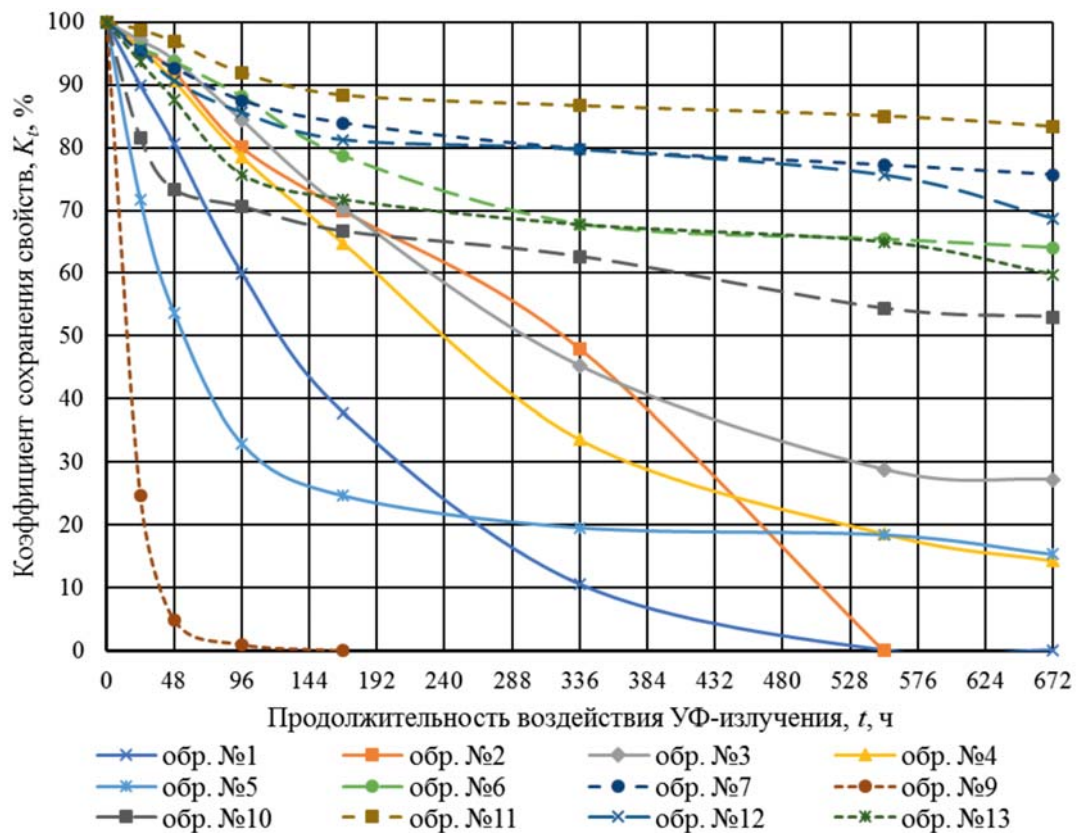


Рис. 15. Изменение коэффициента сохранения свойств в зависимости от продолжительности воздействия УФ-излучения  
 Fig. 15. Change in the retention factor depending on the duration of UV radiation

Полученные зависимости (рис. 15) отражают изменения свойств испытуемых образцов под воздействием УФ-излучения. Лучше всего механические свойства сохранились спустя 672 ч УФ-излучения у образца №11 с  $K_f = 83,3 \%$ , хуже — у обр. №4 с  $K_f = 14,3 \%$  и №5 с  $K_f = 15,3 \%$ . Образцы №1, 2 и 9 полностью потеряли свои свойства ( $K_f = 0$ ) после воздействия УФ-излучения в течение 552 ч, 552 ч и 168 ч соответственно.

**Заключение.** Полученные результаты исследований позволяют сделать следующие выводы:

1. На протяжении всего периода испытаний масса и геометрические размеры образцов не изменялись, за исключением опытного образца биоразлагаемой пленки на основе полимолочной кислоты (обр. №9). Его масса после воздействия УФ-излучения в течение 672 ч увеличилась практически на 25 % по сравнению к исходной из-за разрыва макромолекулярной цепи по радикальному механизму. Деструкция цепи приводит к изменению физико-химических характеристик и к ухудшению эксплуатационных свойств.

2. Визуальная оценка состояния поверхности образцов показала, что внешний вид испытуемых образцов изменяется: биаксиально-ориентированная полипропиленовая пленка (обр. №3) спустя сутки приобретает желтоватый оттенок со стороны воздействия УФ-излучения, подпергамент (обр. №7) становится более желтым по сравнению с контрольным образцом, напоминая цвет старых книг. Цвет биоразлагаемых компостируемых пленок на основе полимолочной кислоты (обр. №12 и №13) стал светлее по сравнению с контрольными образцами, а опытный образец биоразлагаемой пленки на основе полимолочной кислоты (обр. №9) на 7 сутки стал очень хрупким и при малейшем механическом воздействии разрушался. Упаковочная пленка из полиэтилена низкого давления (обр. №1) и упаковочная пленка для заморозки из полиэтилена низкого давления (обр. №2) на протяжении 14 сут еще сохраняли свои свойства, но при дальнейшем воздействии УФ-излучения становились хрупкими. Также установлено, что уже на 14 сут внешний вид испытуемых образцов не соответствовал первоначальному виду: образцы сжались, края свернулись. На образцах из целлюлозной пищевой бумаги (обр. №5) и пергаменте (обр. №6) изменений не обнаружено.

3. Получены эмпирические зависимости для описания изменения прочностных и деформационных свойств материалов: изменение прочности в зависимости от продолжительности УФ-облучения испытуемых образцов и зависимость изменения относительного удлинения при разрыве от продолжительности УФ-облучения испытуемых образцов.

4. Определен предел прочности при растяжении, относительное удлинение при разрыве и модуль упругости испытуемых образцов.

5. Получены зависимости изменения коэффициента сохранения свойств образцов от продолжительности воздействия УФ-излучения. Зависимости показывают на сколько изменяются свойства испытуемых образцов с учетом воздействия УФ-излучения. Лучше всего механические свойства сохранились после 672 часов воздействия УФ-излучения в биоразлагаемой компостируемой пленке на основе полимолочной кислоты (обр. №11) с  $K_f = 83,3 \%$ , хуже — в целлофановой пленке (обр. №4) с  $K_f = 14,3 \%$  и целлюлозной пищевой бумаге (обр. №5) с  $K_f = 15,3 \%$ . Упаковочная пленка из полиэтилена низкого давления (обр. №1), упаковочная пленка для заморозки из полиэтилена низкого давления (обр. №2) и опытный образец биоразлагаемой упаковки на основе полимолочной кислоты (обр. №9) полностью потеряли свои свойства ( $K_f = 0$ ) уже при продолжительности воздействия УФ-излучения, соответственно 552 ч, 552 ч и 168 ч.

Таким образом, по результатам проведенных исследований для продолжительного хранения пищевых продуктов в поле воздействия УФ-излучения рекомендуются следующие упаковочные материалы: пергамент (обр. №6), биоразлагаемая компостируемая пленка на основе полимолочной кислоты (обр. 11), биоразлагаемая компостируемая пленка на основе полимолочной кислоты (обр. 10) и подпергамент (обр. №7).

#### Список использованных источников

1. Харитонов, В. Д. Влияние ультрафиолета на состав и свойства молока / В. Д. Харитонов, Е. А. Юрова // Молочная промышленность. — 2006. — №7. — С. 32–33.
2. Федотова, О. Б. О старении и сроке годности упаковки / О. Б. Федотова // Молочная промышленность. — 2019. — №6. — С. 12–13.
3. Бутко, М. П. Обеззараживание поверхностей ультрафиолетовым излучением / М. П. Бутко, В. С. Тиганов // Проблемы ветеринарной санитарии и экологии. — 1993. — Ч. 1. — С. 105–114.
4. Матвеева, Е. Н. Тезисы докладов на совещании по старению и стабилизации полимеров / Е. Н. Матвеева, А. А. Козодой, А. Л. Гольдберг. — М.: АН СССР, 1961. — 368 с.

5. *Нейман, М. Б.* Старение и светостабилизация полимеров / М. Б. Нейман. — М. : Наука, 1964. — 332 с.
6. *Кестельман, В. Н.* Физические методы модификации полимерных материалов / В. Н. Кестельман. — М.: Химия, 1980. — 224 с.
7. *Фойгт, И.* Стабилизация синтетических полимеров против действия света и тепла / И. Фойгт ; под ред. Б. М. Коварской. — Пер. с немец. — Л. : Химия, 1972. — 544 с.
8. *Павлов, Н. Н.* Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях / Н. Н. Павлов. — М. : Химия, 1982. — 224 с.
9. *Корзан, С. И.* Разработка лабораторного стенда для изучения сохранности пищевых продуктов в биоразлагаемой упаковке / С. И. Корзан, З. В. Ловкис // Аграрная наука — сельскохозяйственному производству Сибири, Казахстана, Монголии, Беларуси и Болгарии : сборник докладов XXIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 1 октября 2020 г. / Нац. акад. наук Беларуси [и др.] ; редкол.: П. П. Казакевич [и др.]. — Минск, 2020. — С. 377–378.
10. *Карякина, М. И.* Лабораторный практикум по испытанию лакокрасочных материалов и покрытий / М. И. Карякина. — М. : Химия, 1977. — 240 с.
11. *Санжаровский, А. Т.* Физико-механические свойства полимерных и лакокрасочных покрытий / А. Т. Санжаровский. — М. : Химия, 1978. — 184 с.
12. Пленки полимерные. Метод испытания на растяжение = Пленкі полімерныя. Метад выпрабавання на расцяжэнне : ГОСТ 14236-81. — Введ. РБ 27.02.12. — М. : Госстандарт, 2012. — 12 с.
13. Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов : ГОСТ 9.708-83. — Взамен ГОСТ 17170-71, ГОСТ 17171-71 ; введ. 17.12.92. — М. : Издательство стандартов, 1992. — 12 с.
14. Производство изделий из полимерных материалов : учеб. пособие / В. К. Крыжановский [и др.]. — СПб. : Профессия, 2004. — 464 с.
15. *Ван Кревелен, Д. В.* Свойства и химическое строение полимеров / Д. В. Ван Кревелен ; под ред. А. Я. Малкина. — Пер. с англ. — М. : Химия, 1976. — 416 с.
16. *Гуль, В. Е.* Пленочные полимерные материалы для упаковки пищевых продуктов / В. Е. Гуль, О. Н. Беляцкая. — М. : Пищевая промышленность, 1968. — 280 с.
17. *Соломенко, М. Г.* Тара из полимерных материалов : справ. издание / М. Г. Соломенко, В. Л. Шредер, В. Н. Кривошей . — М. : Химия, 1990. — 400 с.
18. *Лушейкин, Г. А.* Расчет свойств полимеров по химическому строению и составу. Часть 1 / Г. А. Лушейкин, С. А. Тюрина // Пластические массы. — 2021. — № 3-4. — С. 27–31.

#### Информация об авторах

*Ловкис Зенон Валентинович*, заслуженный деятель науки Республики Беларусь, академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь).

E-mail: Lovkis.zv@mail.ru

*Корзан Сергей Иванович*, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела новых технологий и техники РУП «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по продовольствию» (ул. Козлова, 29, 220037, г. Минск, Республика Беларусь).

E-mail: seroga.korzanmc@mail.ru

#### Information about authors

*Lovkis Zenon Valentinovich*, Honored Science Worker of the Republic of Belarus, Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Engineering sciences, Professor, Chief Researcher of RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29 Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: Lovkis.zv@mail.ru

*Korzan Sergey Ivanovich*, PhD (Engineering), Senior Researcher of the Department of New Technologies and Technology of RUE “Scientific and Practical Centre for Foodstuffs of the National Academy of Sciences of Belarus” (29 Kozlova str., 220037, Minsk, Republic of Belarus).

E-mail: seroga.korzanmc@mail.ru