

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАТУРНОГО ЭКСПОНИРОВАНИЯ И ИНТЕНСИВНОСТИ АКТИНОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ЭПОКСИДНЫХ ПОЛИМЕРОВ С УЧЕТОМ ИХ ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ**

<sup>1,2</sup>Низина Т.А.\*, <sup>1,2</sup>Низин Д.Р., <sup>1,2</sup>Селяев В.П., <sup>1</sup>Канаева Н.С.

<sup>1</sup>*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва*

<sup>2</sup>*Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН*

\*nizinata@yandex.ru

*Представлены результаты анализа климатической стойкости эпоксидных полимеров, получаемых на основе модифицированной смолы Этал-247, отверждаемой Этал-45М, под действием натуральных климатических факторов в условиях умеренно-континентального климата. Выявлено влияние влажностного состояния, длительности климатического старения и интенсивности актинометрических параметров на изменение предела прочности и модуля упругости при растяжении, относительного удлинения при максимальной нагрузке и разрыве. Предложены математические модели и определены их числовые коэффициенты, позволяющие с высокой степенью достоверности описать изменение упруго-прочностных показателей исследуемого полимера в зависимости от влагосодержания образцов, длительности натурального экспонирования и интенсивности актинометрических показателей.*

**Ключевые слова:** эпоксидные полимеры, климатическое старение, влагосодержание, упруго-прочностные характеристики, актинометрические показатели, математические модели.

**SIMULATION OF THE EFFECT OF FULL-SCALE EXPOSURE DURATION AND INTENSITY OF ACTINOMETRIC PARAMETERS ON CHANGE OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY POLYMERS TAKING INTO ACCOUNT THEIR MOISTURE CONTENT**

<sup>1,2</sup>Nizina T.A., <sup>1,2</sup>Nizin D.R., <sup>1,2</sup>Selyaev V.P., <sup>1</sup>Kanaeva N.S.

<sup>1</sup>*National Research Mordovia State University*

<sup>2</sup>*Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Science*

*The article presents the results of the analysis of the climatic resistance of epoxy polymers based on the modified Etal-247 resin cured by Etal-45M exposed to natural climatic factors in a temperate continental climate. We reveal the influence of the moisture state, duration of climatic aging and intensity of actinometric parameters on the change in the tensile strength and modulus of elasticity in tension, elongation at maximum load and rupture. We proposed mathematical models and determined their numerical coefficients, which make it possible to describe with a high degree of reliability the change in the elastic-strength parameters of the polymer under study depending on moisture content of the samples, duration of full-scale exposure, and intensity of actinometric parameters.*

**Keywords:** epoxy polymers, climatic aging, moisture content, elastic-strength characteristics, actinometric parameters, mathematical models.

Полимерные материалы нашли широкое применение практически во всех существующих областях промышленности. По аналогии с другими материалами основное требование, предъявляемое к изделиям и конструкциям на полимерной основе, заключается в обеспечении бесперебойной работы на протяжении всего срока эксплуатации. Однако решение поставленной задачи крайне осложнено в условиях действия натуральных климатических факторов, влиянию которых подвержены практически все изделия и конструкции вне зависимости от своего функционального назначения. Это обусловлено высокой сложностью климатического воздействия как для анализа, так и для воспроизведения в лабораторных условиях с достаточной точностью и полнотой [1–5].

Поскольку полное воспроизведение действия окружающей среды в искусственных условиях в силу значительной вариативности действующих факторов и их комбинаций не представляется возможным, основным источником получения достоверной информации о феноменах, возникающих в структуре полимеров в процессе климатического старения, являются натурные климатические исследования [6–13]. Один из

таких феноменов заключается в обратимости изменения физико-механических свойств полимерных материалов в зависимости от содержания сорбированной влаги. Согласно данным, представленным в научной литературе, а также авторским исследованиям, разброс прочностных показателей в предельных влажностных состояниях (влагонасыщенном и высушенном) может достигать 30 % для полимерных композитов и 50 % для ненаполненных полимеров на основе эпоксидных смол [12, 14–17]. Как следствие, в процессе эксплуатации изделий и конструкций на полимерной основе необходимо учитывать не только необратимые изменения свойств, вызванные деградацией поверхностных слоёв изделия, фотодеструкцией и химическими превращениями полимерной матрицы, но и обратимые изменения, обусловленные процессами сорбции и десорбции атмосферной влаги.

Цель работы заключается в моделировании изменения физико-механических показателей эпоксидных полимеров на основе количественных значений интенсивности актинометрических параметров окружающей среды, а также влагосодержания образцов. Объект исследования представляет собой образцы ненаполненного полимера на основе эпоксидной смолы Этал-247 и отвердителя Этал-45М (производитель – АО «ЭНПЦ ЭПИ-ТАЛ»). Смола Этал-247 характеризуется массовой долей эпоксидных групп не менее 21,4–22,8 % и вязкостью по Брукфильду (при 25 °С) в диапазоне 650÷750 СПз. Отвердитель Этал-45М представляет собой смесь ароматических и алифатических ди- или полиаминов, модифицированную салициловой кислотой.

Экспонирование образцов проводилось на испытательных стендах научно-исследовательской лаборатории эколого-метеорологического мониторинга, строительных технологий и экспертиз Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (г. Саранск, умеренно континентальный климат) с 05.01.2019 г. в течение 765 суток. В ходе натурального экспонирования производилась фиксация основных метеорологических факторов (температура и относительная влажность воздуха, давление, осадки, скорость и направление ветра и др.) с частотой 20 минут, актинометрических показателей – 10 минут в круглосуточном режиме.

Кондиционирование образцов осуществлялось в соответствии с ГОСТ 12423-2013 «Пластмассы. Условия кондиционирования и испытания образцов». Для установления влияния влажностного состояния на изменение физико-механических показателей эпоксидных полимеров под действием природных климатических факторов, серия из 36 параллельно экспонированных образцов делилась на 3 равные партии, которые испытывались: сразу после снятия с испытательной площадки (серия «без кондиционирования»); после увлажнения до постоянной массы при относительной влажности  $98 \pm 2$  % (серия «влагонасыщенные») и после сушки до постоянной массы при 60 °С (серия «высушенные») в соответствии с ГОСТ Р 56762-2015 «Композиты полимерные. Метод определения влагопоглощения и равновесного состояния».

Изменение значений влагосодержания образцов эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-45М в зависимости от длительности натурального экспонирования и влажностного состояния серий образцов приведены в табл. 1. Результаты изменения свойств образцов эпоксидного полимера (предел прочности и модуль упругости при растяжении, относительное удлинение при максимальной нагрузке, относительное удлинение при разрыве) состава Этал-247/Этал-45М в процессе натурального экспонирования с учетом их влажностного состояния представлены на рис. 1, 2. Установлено (рис. 1), что повышение влажности контрольных образцов с 0,79 до 2,72 % (влагонасыщенное состояние) приводит к снижению предела прочности при растяжении с 37,3 до 26,7 МПа, что соответствует остаточной прочности 71,5 % (от контрольных значений в равновесно-влажностном состоянии). Натурное экспонирование полимерных образцов исследуемого состава без дополнительной сушки и увлажнения сопровождается снижением прочностных показателей за всё время экспонирования (765 суток) не более чем на 15 %. При этом влагонасыщение образцов способствует дополнительному уменьшению предела прочности при растяжении, достигающему 24–35 % от исходного значения (до начала натурального экспонирования).

Таблица 1

Влагосодержание образцов эпоксидных полимеров в момент испытания

Длительность натурального экспонирования, сутки	Влагосодержание образцов (%) в момент испытания:		
	без кондиционирования	влагонасыщенные	высушенные
0	0,79	2,72	0,00
67	0,67	2,09	0,00
151	0,69	2,44	0,00
306	1,09	2,18	0,00
531	0,79	2,19	0,00
765	1,35	2,23	0,00

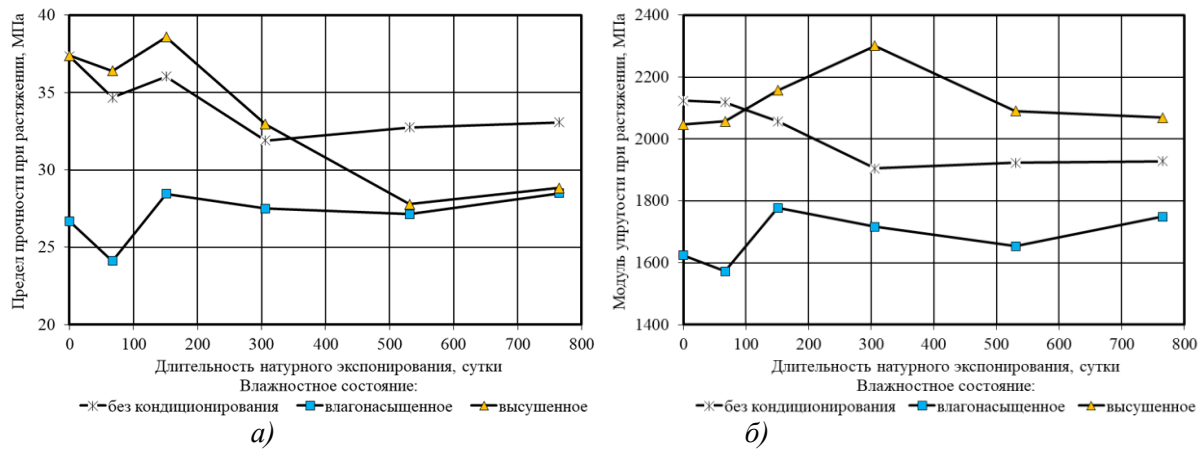


Рис. 1. Изменение упруго-прочностных характеристик при растяжении (а – предел прочности; б – модуль упругости) полимерных образцов состава Этал-247/Этал-45М в процессе натурального климатического старения в различных влажностных состояниях (без кондиционирования, влагонасыщенное, высушенное)

Прочностные показатели высушенных образцов, длительность натурального климатического воздействия которых не превышает 306 суток, выше аналогичных показателей для образцов, не подвергнутых дополнительному высушиванию. Подобное восстановление свойств относят к обратимому изменению прочностных показателей вследствие удаления свободной влаги. Помимо этого, с увеличением длительности натурального экспонирования наблюдается постепенное сужение диапазона варьирования прочностных показателей полимерных образцов во влагонасыщенном и высушенном состояниях. Для временных интервалов 531 и 765 суток различие составляет всего 0,3–0,65 МПа (рис. 1а). При этом предел прочности при растяжении для образцов, не подвергнутых дополнительному кондиционированию, выше аналогичного показателя в предельных влажностных состояниях на 15–18 %.

Очевидно для данной длительности натурального климатического воздействия наличие в структуре полимерной матрицы сорбированной влаги выступает в качестве механизма, компенсирующего необратимые изменения. При этом для образцов в возрасте более 531 суток очевидно наличие некоторой точки оптимума влагосодержания, которой соответствует наибольшее значение предела прочности при растяжении. По аналогии с пластифицирующим действием влаги можно предположить постепенное снижение вклада синергетического эффекта, проанализированного в работе [18], от максимального значения в точке, соответствующей влагонасыщенному состоянию, до нуля в точке, соответствующей высушенному состоянию.

Также выявлено резкое снижение деформативных характеристик высушенных образцов при достижении сроков натурального экспонирования 306 суток и более (рис. 2). Климатическое воздействие на временном интервале от 151 до 306 суток характеризуется двукратным снижением относительных удлинений при растяжении и разрыве высушенных образцов, что, предположительно, связано с их дополнительным охрупчиванием вследствие удаления сорбированной влаги, играющей в данном случае роль компенсатора необратимых изменений, происходящих в структуре полимерной матрицы в процессе натурального климатического старения.

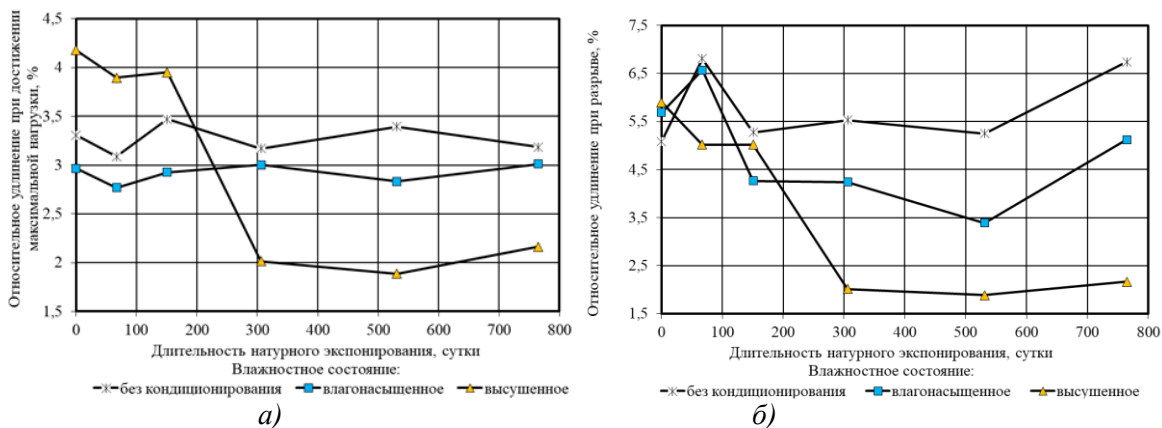


Рис. 2. Изменение деформативных характеристик (а – относительное удлинение при максимальной нагрузке; б – относительное удлинение при разрыве) серий полимерных образцов состава Этал-247/Этал-45М в процессе натурального климатического старения в различных влажностных состояниях (без кондиционирования, влагонасыщенное, высушенное)

На рис. 3 приведены кривые кинетики накопления суммарной солнечной радиации, а также ультрафиолетовых излучений диапазонов А и В в процессе натурального экспонирования. Из анализа представленных данных видно, что скорость накопления актинометрических показателей существенно меняется от времени года, снижаясь практически до нуля в зимние и поздние осенние месяцы и существенно возрастая в весенние и летние календарные месяцы.

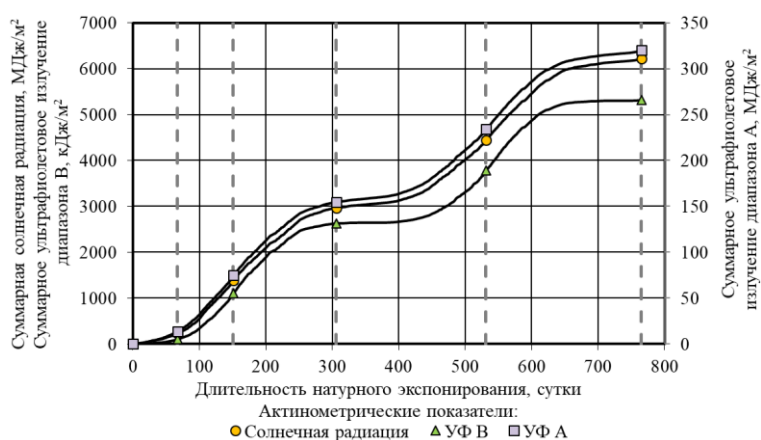


Рис. 3. Изменение актинометрических показателей (суммарная солнечная радиация, суммарные ультрафиолетовые излучения диапазонов А и В) в процессе натурального экспонирования (вертикальными штриховыми линиями серого цвета показаны временные точки съема образцов и проведения их механических испытаний)

Без сомнений, фиксируемые в определенные сроки упруго-прочностные показатели представляют собой функции, зависящие от длительности и интенсивности агрессивного воздействия факторов окружающей среды, а также влажностного состояния образцов. Произведем моделирование свойств полимерного композита с помощью полинома вида:

$$Y(W, X) = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot W + \alpha_2 \cdot X + \alpha_{12} \cdot W \cdot X + \alpha_{11} \cdot W^2 + \alpha_{22} \cdot X^2, \quad (1)$$

где  $Y$  – исследуемые упруго-прочностные показатели (предел прочности и модуль упругости при растяжении (МПа), относительное удлинение при максимальной нагрузке (%), относительное удлинение при разрыве (%));  $W$  – влагосодержание образцов, %;  $X$  – переменный фактор, отождествляемый в зависимости от вида анализируемых кривых с длительностью экспонирования ( $T$ , сутки), суммарной солнечной радиацией ( $Q$ , МДж/м<sup>2</sup>) или суммарным ультрафиолетовым излучением диапазона А ( $U_A$ , МДж/м<sup>2</sup>), В ( $U_B$ , кДж/м<sup>2</sup>);  $a_0, a_1, a_2, a_{12}, a_{11}, a_{22}$  – коэффициенты полиномиального уравнения, описывающие степень агрессивного воздействия переменных факторов на изменение упруго-прочностных характеристик эпоксидного полимера.

Данное полиномиальное уравнение описывает влияние влагосодержания образцов и одного из климатических факторов ( $T, Q, U_A, U_B$ ) на изменение свойств эпоксидного полимера в ходе натурального экспонирования. Числовые значения коэффициентов полинома (1) и коэффициентов детерминации ( $R^2$ ) приведены в табл. 2. В целом, уровни коэффициентов детерминации мало меняются в зависимости от варьируемого климатического фактора. При этом наихудшая достоверность получена при описании математической моделью изменения относительного удлинения полимера при максимальной нагрузке ( $R^2$  не превышает 0,583–0,597). Коэффициенты детерминации для других исследуемых характеристик варьируются от 0,717 до 0,831.

Таблица 2

Значения коэффициентов полиномиального уравнения (1), описывающего влияние влагосодержания образцов, длительности экспонирования ( $T$ ), интенсивности суммарной солнечной радиации ( $Q$ ) и ультрафиолетовых излучений диапазона А ( $U_A$ ) и В ( $U_B$ ) на изменение упруго-прочностных показателей эпоксидного полимера в процессе натурального экспонирования

Коэффициенты полиномиального уравнения (1)	Климатический фактор			
	$T$ , сутки	$Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	$U_A$ , МДж/м <sup>2</sup>	$U_B$ , кДж/м <sup>2</sup>
Предел прочности при растяжении, МПа				
$\alpha_0$	38,39	37,93	37,97	37,80
$\alpha_1$	-3,34	-4,22	-4,28	-4,23

1	2	3	4	5
$\alpha_2$	-7,71	-5,84	-5,73	-5,59
$\alpha_{12}$	5,91	6,16	6,13	6,19
$\alpha_{11}$	-10,35	-9,49	-9,48	-9,39
$\alpha_{22}$	1,55	0,68	0,62	0,57
$R^2$	<b>0,801</b>	<b>0,781</b>	<b>0,782</b>	<b>0,781</b>
Модуль упругости при растяжении, МПа				
$\alpha_0$	2151,5	2141,1	2140,4	2140,0
$\alpha_1$	-433,2	-439,4	-439,0	-436,8
$\alpha_2$	-18,0	22,6	26,8	26,2
$\alpha_{12}$	30,8	28,7	28,0	27,0
$\alpha_{11}$	-123,4	-114,0	-114,1	-115,1
$\alpha_{22}$	-4,3	-23,0	-25,1	-24,6
$R^2$	<b>0,830</b>	<b>0,830</b>	<b>0,831</b>	<b>0,830</b>
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %				
$\alpha_0$	3,90	3,85	3,86	3,83
$\alpha_1$	-0,26	-0,43	-0,45	-0,44
$\alpha_2$	-1,53	-1,32	-1,30	-1,29
$\alpha_{12}$	1,18	1,26	1,25	1,27
$\alpha_{11}$	-0,88	-0,74	-0,73	-0,71
$\alpha_{22}$	0,32	0,21	0,20	0,20
$R^2$	<b>0,583</b>	<b>0,588</b>	<b>0,587</b>	<b>0,597</b>
Относительное удлинение при разрыве, %				
$\alpha_0$	5,51	5,38	5,40	5,31
$\alpha_1$	8,50	8,32	8,34	8,27
$\alpha_2$	-4,56	-4,27	-4,23	-4,23
$\alpha_{12}$	0,91	0,90	0,89	0,91
$\alpha_{11}$	-8,96	-8,72	-8,75	-8,65
$\alpha_{22}$	1,56	1,48	1,46	1,49
$R^2$	<b>0,717</b>	<b>0,730</b>	<b>0,726</b>	<b>0,736</b>

С целью повышения достоверности математических моделей была предпринята попытка по включению в полином трех варьируемых факторов: влагосодержание образцов ( $W$ ); длительность натурального экспонирования ( $T$ ) и одного из контролируемых актинометрических показателей ( $Q, U_A, U_B$ ). Общий вид полиномиального уравнения, числовые значения коэффициентов которого приведены в табл. 3, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 Y(W, T, X) = & \beta_0 + \beta_1 \cdot W + \beta_2 \cdot T + \beta_3 \cdot X + \beta_{12} \cdot W \cdot T + \\
 & + \beta_{13} \cdot W \cdot X + \beta_{23} \cdot T \cdot X + \beta_{11} \cdot W^2 + \beta_{22} \cdot T^2 + \beta_{33} \cdot X^2,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $Y, X$  – то же, что и для (1);  $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_{12}, \beta_{13}, \beta_{23}, \beta_{11}, \beta_{22}, \beta_{33}$  – коэффициенты полиномиального уравнения, описывающие степень агрессивного воздействия переменных факторов на изменение упруго-прочностных характеристик эпоксидного полимера.

Значения коэффициентов полиномиального уравнения (2), описывающего влияние влагосодержания образцов, длительности экспонирования ( $T$ ) и актинометрических показателей (интенсивность суммарной солнечной радиации ( $Q$ ) и ультрафиолетовых излучений диапазона А ( $U_A$ ) и В ( $U_B$ )) на изменение упруго-прочностных показателей эпоксидного полимера в процессе натурального экспонирования

Коэффициенты полиномиального уравнения (2)	Актинометрические показатели		
	$Q$ , МДж/м <sup>2</sup>	$U_A$ , МДж/м <sup>2</sup>	$U_B$ , кДж/м <sup>2</sup>
Предел прочности при растяжении, МПа			
$\beta_0$	39,04	39,10	38,94
$\beta_1$	-1,12	-1,35	-0,84
$\beta_2$	-41,03	-36,03	-49,29
$\beta_3$	36,85	30,92	47,54
$\beta_{12}$	-12,02	-9,43	-10,43
$\beta_{13}$	18,07	15,40	16,45
$\beta_{23}$	-22,21	131,03	-215,91
$\beta_{11}$	-13,15	-13,06	-13,20
$\beta_{22}$	41,48	-44,45	148,85
$\beta_{33}$	-21,04	-87,15	62,77
$R^2$	<b>0,916</b>	<b>0,914</b>	<b>0,918</b>
Модуль упругости при растяжении, МПа			
$\beta_0$	2161,5	2159,5	2163,5
$\beta_1$	-391,0	-385,1	-396,6
$\beta_2$	-1577,7	-1293,0	-1971,8
$\beta_3$	1613,4	1282,9	2117,6
$\beta_{12}$	353,3	397,8	362,0
$\beta_{13}$	-332,9	-376,9	-341,5
$\beta_{23}$	-9019,1	-4277,4	-13350,2
$\beta_{11}$	-171,8	-173,3	-170,6
$\beta_{22}$	5432,3	2745,1	8078,1
$\beta_{33}$	3509,9	1500,5	5088,3
$R^2$	<b>0,877</b>	<b>0,878</b>	<b>0,878</b>
Относительное удлинение при максимальной нагрузке, %			
$\beta_0$	3,93	3,95	3,89
$\beta_1$	-0,02	-0,11	0,08
$\beta_2$	-2,20	-1,64	-3,10
$\beta_3$	1,53	1,00	2,52
$\beta_{12}$	-5,18	-4,62	-4,66
$\beta_{13}$	6,45	5,86	5,91
$\beta_{23}$	11,13	32,86	-13,22
$\beta_{11}$	-1,21	-1,18	-1,23
$\beta_{22}$	-1,80	-13,84	11,03
$\beta_{33}$	-9,65	-19,26	1,71
$R^2$	<b>0,722</b>	<b>0,715</b>	<b>0,738</b>

Относительное удлинение при разрыве, %			
$\beta_0$	5,12	5,09	5,12
$\beta_1$	8,22	8,27	8,22
$\beta_2$	-4,42	-1,66	-6,28
$\beta_3$	1,94	-0,44	3,60
$\beta_{12}$	2,55	4,08	0,32
$\beta_{13}$	-1,70	-3,24	0,56
$\beta_{23}$	-78,52	-37,75	-80,16
$\beta_{11}$	-8,56	-8,56	-8,58
$\beta_{22}$	45,45	22,90	47,11
$\beta_{33}$	33,30	15,04	33,25
$R^2$	<b>0,747</b>	<b>0,749</b>	<b>0,746</b>

Установлено, что переход к полиному, в котором помимо влагосодержания образцов и длительности натурального экспонирования, учитывается еще и интенсивность воздействия одного из актинометрических показателей, позволяет повысить коэффициент детерминации до: 0,914–0,918 для предела прочности; 0,877–0,878 для модуля упругости при растяжении; 0,715–0,738 для относительного удлинения при максимальной нагрузке; 0,746–0,749 для относительного удлинения при растяжении. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности комплексного учета при разработке математических моделей, описывающих изменение свойств полимеров в процессе натурального климатического воздействия, как длительности натурального экспонирования, так и количественных значений актинометрических показателей.

### Выводы

На основе проведенных исследований установлено, что содержание сорбированной влаги представляет собой основной источник обратимых изменений упруго-прочностных показателей образцов полимерных материалов. Удаление из структуры полимера состава Этал-247/Этал-45М сорбированной влаги на начальных этапах натурального экспонирования сопровождается повышением как его прочностных, так и деформативных характеристик. При этом, начиная с 306 суток, для высушенных образцов наблюдается практически двукратное снижение деформативных характеристик, что, очевидно, связано с их охрупчиванием. Повышение длительности натурального климатического воздействия до 531 суток и выше приводит к изменению характера воздействия сорбированной влаги и на прочностные показатели исследуемого полимера. В частности, предел прочности при растяжении образцов, испытываемых сразу после снятия образцов с испытательных стендов (без дополнительного кондиционирования), на 15–18 % выше прочностных показателей в предельных (влагонасыщенном и высушенном) влажностных состояниях. Сделано предположение, что, начиная с определенной длительности натурального климатического старения, наличие в структуре полимерной матрицы сорбированной влаги выступает в качестве механизма, компенсирующего необратимые изменения.

Предложены математические модели, позволяющие с высокой степенью достоверности описать изменение упруго-прочностных показателей эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-45М в зависимости от влагосодержания образцов, длительности натурального экспонирования и интенсивности актинометрических показателей. Доказано, что наилучшие результаты достигаются при включении в полиномиальное уравнение трех вышеперечисленных показателей.

### Библиография

1. Kablov E.N., Startsev V.O. Climatic aging of aviation polymer composite materials: I. influence of significant factors // Russian Metallurgy (Metally). 2020. V. 4. P. 364–372.
2. Ефимов В.А., Кириллов В.Н., Добрянская О.А., Николаев Е.В., Шведкова А.К. Методические вопросы проведения натуральных климатических испытаний полимерных композиционных материалов // Авиационные материалы и технологии. М., 2010. № 4 (17). С. 25–31.
3. Lettieri M., Frigione M. Natural and artificial weathering effects on cold-cured epoxy resins // Journal of Applied Polymer Science. 2011. V. 119, N 3. P. 1635–1645.

4. Marouani S., Curtil L., Hamelin P. Ageing of carbon/epoxy and carbon/vinyl ester composites used in the reinforcement and/or the repair of civil engineering structures // *Composites Part B: Engineering*. 2012. V. 43, N 4. P. 2020–2030.

5. Старцев В.О. Методы исследования старения полимерных связующих // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 9. С. 16–26.

6. Бабенко Ф.И., Герасимов А.А. Механизмы разрушения и прочность конструкционных пластмасс в холодном климате с учетом старения // *Наука и образование*. 2006. № 1. С. 84–87.

7. Павлов Н.Н. Старение пластмасс в естественных и искусственных условиях. М.: Химия, 1982. 224 с.

8. Филатов И.С. Климатическая устойчивость полимерных материалов. М.: Наука, 1983. 214 с.

9. Kong E.S.-W. Physical Aging in Epoxy Matrices and Composites // *Advances in Polymer Science*. 1980. V. 80. P. 125–171.

10. Низин Д.Р. Климатическая стойкость защитно-декоративных покрытий на основе модифицированных эпоксидных связующих: дисс. ... канд. техн. наук. Казань, 2017. 216 с.

11. Nizin D.R., Nizina T.A., Selyaev V.P., Chernov A.N., Gorenkova A.I. Natural Climatic Aging of Epoxy Polymers Taking into Account the Seasonality Impact // *Key engineering materials*. 2019. V. 799. P. 159–165.

12. Низина Т.А., Селяев В.П., Низин Д.Р. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. 188 с.

13. Климатические испытания строительных материалов / под общ. ред. д-ра техн. наук проф. О.В. Старцева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.Т. Ерофеева, акад. РААСН д-ра техн. наук проф. В.П. Селяева. М.: Издательство АСВ, 2017. 558 с.

14. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A., Molokov M.V., Frolov A.S., Nizina T.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers // *Polymer testing*. 2018. V. 65. P. 281–296.

15. Старцев В.О., Плотников В.И., Антипов Ю.В. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // *Труды ВИАМ*. 2018. № 5. С. 110–118.

16. Селяев В.П., Старцев В.О., Низина Т.А., Старцев О.В., Низин Д.Р., Молоков М.В. Анализ пластифицирующего воздействия влаги на климатическую стойкость эпоксидных полимеров, модифицированных алифатическим разбавителем Этал-1 // *Вестник Приволжского территориального отделения РААСН*. Вып. 21. Нижний Новгород: ННГАСУ, 2018. С. 200–205.

17. Nizina T.A., Nizin D.R., Selyaev V.P., Kanaeva N.S., Orlova Y.A. Analysis of the moisture content effect on the specific index and damage accumulation kinetics in the structure of polymeric materials during natural climatic aging // *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022. V. 18 (1). P. 99–108.

18. Nizina T.A., Kanaeva N.S., Nizin D.R. The effect of moisture state on kinetics of damage accumulation in the structure of epoxy polymer samples under tensile stresses // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. V. 151. P. 208–214.