

# ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЛИТЕЛЬНОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ КАЧЕСТВА (ПОЛЗУЧЕСТЬ ПРИ СДВИГЕ) ТЕПЛОИЗОЛЯЦИИ В ТОНКОЛИСТОВЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ С УЧЕТОМ ВЕРОЯТНОСТНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ИХ ПРОЧНОСТИ ПРИ СДВИГЕ

## EVALUATION OF THE EFFECT OF DURATION OF LOADING ON THE QUALITY PARAMETERS (CREEP SHEAR) THERMAL INSULATION IN SHEET METAL ENCLOSURES WITH CONSIDERATION OF PROBABILITY DISTRIBUTIONS OF STRENGTH WHEN SHIFTING

В. М. БОБРЯШОВ, д-р. техн. наук

В. Е. БАТРАК, канд. техн. наук

В. В. БОБРЯШОВ

Н. И. БУШУЕВ, канд. техн. наук

*В статье впервые предлагаются нормы на деформации ползучести, а также на характеристику ползучести, среднюю скорость ползучести, податливость при длительности нагружения пенополиуретана при сдвиге в течение 216 сут и уровне воздействия  $\tau/\tau_{кр}$  от 0,1 до 0,75 и температуре 20, 40 и 60 °С*

*The article for the first time proposes the norms on creep deformation as well as on the creep characteristic, average creep rate, flexibility at the duration of loading of polyurethane foam during the shift for 216 days and the level of impact  $\tau/\tau_{кр}$  from 0.1 to 0.75 and a temperature of 20, 40 and 60 °С and humidity of 40*

и влажности 40 и 80 %. Приводятся значения изменений показателей качества при различной нагруженности и ее длительности. Важные сведения даны по статистическому исследованию прочности при сдвиге пенополиуретана по вероятностным схемам Гаусса, Грамма-Шарлье, Пирсона, Пуассона, не имеющему аналогов в РФ и зарубежной специальной литературе.

### Ключевые слова:

Вероятностные схемы, законы распределения, пенополиуретан, прочность при сдвиге, показатели качества при ползучести, ползучесть при сдвиге

and 80 %. The values of changes in quality indicators at different loading and its duration are given. Important information is given on the statistical study of the shear strength of polyurethane foam on the probabilistic schemes of Gauss, Gram-Charles, Pearson, Poisson, which have no analogues in Russia and foreign literature.

### Key words:

Creep shear, distribution laws, probabilistic schema, quality factors in creep, shear strength of the polyurethane foam

Под ограждающими конструкциями будем понимать изделия с тонколистовыми облицовками и средним слоем с эффективным утеплителем (теплоизоляцией). Они состоят из двух металлических поверхностей, между которыми расположен средний слой из конструкционного утеплителя (теплоизоляции), который прочно соединен с металлическими поверхностями и способен воспринимать внешние воздействующие факторы (нагрузки, температуру, влажность, солнечную радиацию, коррозионное изнашивание и иное).

Металлические поверхности могут быть плоскими, слабо- или сильно профилированными. Слабопрофилированные металлические облицовки – это такие, в которых высота профилирования металлических поверхностей не превышает 5 мм. Металлические поверхности защищены покрытиями, сопротивляющимися воздействию слабо-, среднеагрессивных сред.

В качестве теплоизоляции используют конструкционный утеплитель – средний слой, воспринимающий воздействия, в том числе нагрузки, обладающий пределами кратковременной, длительной прочности, пределами выносливости, упругими механическими характеристиками, в частности, длительными. Главные особенности утеплителя среднего слоя панелей – термовязкоупругость и релаксационные свойства.

Для соединения облицовок применяют клеящие материалы – полимерные клеи, связывающие металлические поверхности с утеплителем (средним слоем теплоизоляции).

По виду облицовок различают:

- конструкции со стальными облицовками, в том числе из нержавеющей стали, и эффективным утеплителем (теплоизоляцией);
- конструкции с алюминиевыми облицовками и эффективным утеплителем (теплоизоляцией);
- конструкции с медными облицовками и эффективным утеплителем (теплоизоляцией).

В качестве основных эффективных утеплителей (теплоизоляции) используют:

- утеплители (теплоизоляцию) на основе пенополиуретана (PUR);
- утеплители (теплоизоляцию) на основе пенополиизоцианурата (PIR);
- утеплители (теплоизоляцию) на основе минераловатных плит (MW);
- утеплители (теплоизоляцию) на основе плит из блочного пенополистирола (EPS);
- утеплители (теплоизоляцию) на основе экструзионного пенополистирола (XPS);
- утеплители (теплоизоляцию) на основе феноло-формальдегидных смол;
- утеплители (теплоизоляцию) на основе высоконаполненных перлитом новолачных феноло-формальдегидных смол (порошковых PF).

В строительном комплексе используют и другие утеплители, например, пеностекло, пеноизол, применение которого является некорректным и вызывает значительные санитарно-гигиенические ограничения.

На развитие деформаций и усилий в трехслойных панелях, работающих на поперечный изгиб, существенное влияние оказывает ползучесть среднего слоя при сдвиге. Для исследования процесса деформирования при сдвиге были проведены испытания на ползучесть при постоянной нагрузке образцов PUR марки Сиспур 4055 с плотностью 46,2 кг/м<sup>3</sup>.

Образцы для испытаний изготовили в виде прямоугольных параллелепипедов размером 10 × 15 × 50 мм. Их вырезали из средней по толщине части теплоизоляции панелей, где плотность материала составляла 36,6 кг/м<sup>3</sup>. Испытания на ползучесть проводили по односрезной схеме в диапазоне сдвигающих напряжений 0,10 ... 0,75 от кратковременной прочности пенопласта ( $\tau_{кр}=0,2$  МПа). Деформации измеряли индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм и базой измерения 10 мм. Время испытаний составляло 200 сут. При каждом уровне нагрузки было испытано по пять образцов. Методика испытаний, обоснование размеров образцов разработана авторами в [1], ГОСТ 22695-77 «Панели стен и покрытий зданий слоистые с утеплителем из пенопластов. Пенопласты. Методы испытаний на прочность», ГОСТ 23486-79 «Панели металлические трехслойные стеновые с утеплителем из пенополиуретана. Технические условия».

Перед началом длительных испытаний проводили оценку прочности при сдвиге на образцах в количестве 960 единиц, что позволило провести вероятностную оценку результатов испытаний, используя [2, 3, 4, 5]. Основные экспериментальные статистики распределения прочности при сдвиге приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Статистики распределения прочности при сдвиге PUR

Среднее значение, $\tau, \text{Па} \cdot 10^5$	Начальные моменты	Центральные моменты	Основное отклонение	Основные моменты	Асимметрия	Эксцесс
2,1195	$m_1 = -0,425$ $m_2 = 1,515$ $m_3 = -1,138$ $m_4 = 8,190$	$\mu_2 = 0,334$ $\mu_3 = 0,640$ $\mu_4 = 7,799$	1,155	$r_3 = 0,415$ $r_4 = 4,383$	0,415	1,383

Анализируя статистики (оценки), приведенные в табл. 1, замечаем, что асимметрия и эксцесс имеют минимальные значения. Изменчивость  $S_{\tau} = 0,194$  не противоречит условиям для восстановления результатов по закону Гаусса-Лапласа, хотя прочность при сдвиге  $\tau$  является положительной величиной (предельные значения для  $S_{\tau} \approx 0,33$ ) [3, 5].

В табл. 2 дана сводка теоретических частот распределений по Грамму-Шарлье (А, В), по Пирсону типа IV, по Пуассону, Гауссу-Лапласу.

Таблица 2

## Сводка распределений вероятностей прочности при сдвиге PUR

Значения $\tau$ в середине интервала	Экспери- ментальные частоты	Теоретические частоты				
		по Грамму- Шарлье, тип А	по Грамму- Шарлье, тип В	по Пирсону тип IV	по Гауссу- Лапласу	по Пуассону
0,713333	0	0	0	2,459169	0	0
1,106667	30	15,849851	13,462541	19,861983	27,621653	73,107669
1,5	117	109,51087	160,728524	120,74130	130,85906	188,25225
1,893333	318	347,31619	303,561917	331,49877	292,94741	242,374771
2,286667	315	326,66520	278,872316	310,43099	309,88980	208,038346
2.68	144	101,28090	151,915908	126,83909	154,90187	133,924685
3,073333	25	35,610945	48,7285048	34,915415	36,587924	68,9712128
3,466667	7	15,429460	5,49212239	8,6842773	4,0836699	29,6001455
3,86	1	2,5009338	-2,65600315	2,2357047	0,2153749	10,8886249
4,253333	3	0,1491872	-1,19589072	0,6260072	0,0053675	3,50477616
Сумма	960	954,31354	958,909939	958,29272	957,11213	958,66248

На рис. 1 приведены кривые распределения вероятностей (экспериментальные, теоретические) для указанных выше распределений.

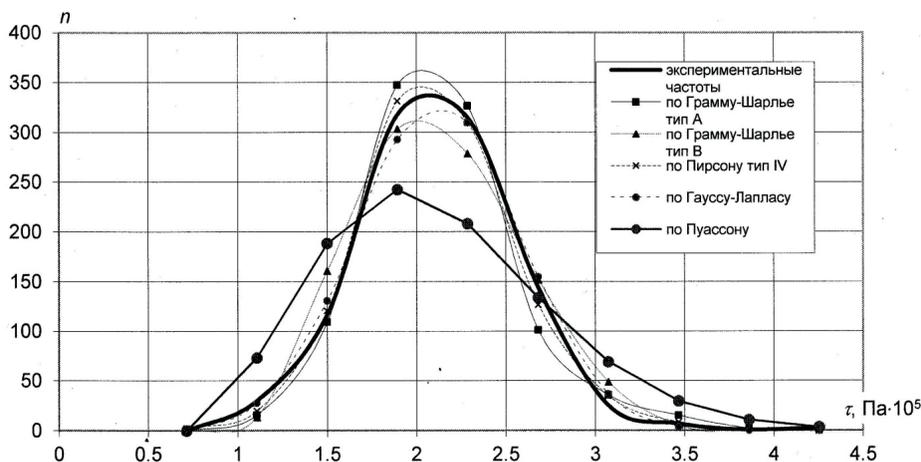


Рис.1. Кривые распределения вероятностей прочности при сдвиге PUR

Выполнена оценка сходимости экспериментальных и теоретических результатов по критериям согласия Пирсона  $\chi^2$  и Колмогорова  $1-K(\lambda)$  [5] (табл. 3):

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(n_j - \bar{n}_j)^2}{n_j}, \tag{1}$$

где  $n_j$  – экспериментальные частоты распределения;  
 $\bar{n}_j$  – теоретические частоты распределения;  
 $\lambda$  – максимальное отклонение между экспериментальными и теоретическими результатами.

Для этого значения  $\lambda$  по [5] определяют параметр Колмогорова  $1 - K(\lambda)$ : чем больше это значение, тем выше сходимость между экспериментальными и теоретическими результатами.

Таблица 3

**Оценка сходимости экспериментальных и теоретических результатов**

Критерий	по Грамму-Шарлье, тип А	по Грамму-Шарлье, тип В	по Пирсону, тип IV	по Гауссу-Лапласу	по Пуассону
$1-K(\lambda)$	0,627	0,420	0,979	0,864	-
$\chi^2$	97,198	30,205	21,05	1684	186

Далее даны определения и формулы расчета для показателей качества, связанных с длительностью воздействия нагрузки, температуры, влажности [6, 7].

Полная деформация ползучести при сдвиге с учетом упругой (мгновенной) деформации  $\gamma_0$ :

$$\gamma^{\text{полз}} = \gamma_0 + \gamma^{\text{полз}}, \quad (2)$$

где  $\gamma^{\text{полз}}$  – деформация ползучести при сдвиге за вычетом упругой деформации,

$$\gamma^{\text{полз}} = \gamma^{\text{полн}} - \gamma_0 \quad (3)$$

Характеристика ползучести:

$$\varphi(t) = \frac{\gamma(t)}{\gamma_0}, \quad (4)$$

где  $\gamma(t)$  – относительная деформация ползучести к моменту времени  $t$ ;

$\gamma_0$  – относительная упругая (мгновенная) деформация в момент приложения нагрузки;

$t$  – время нагружения.

Средняя скорость ползучести (функция влияния), ядро ползучести  $K(t)$ :

$$K(t) = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{t_2 - t_1} \cdot 100, \quad (5)$$

где  $\gamma_2 - \gamma_1$  – относительные деформации ползучести в моменты нагружения  $t_2 - t_1$ .

Показатель ползучести

$$\beta(t) = \frac{\gamma_2 - \gamma_1}{\gamma_1}. \quad (6)$$

Податливость

$$\Pi(t) = \frac{1}{G(t)}, \quad (7)$$

где  $G(t)$  – модуль ползучести при сдвиге, равный

$$G(t) = \frac{\tau}{\gamma(t)}. \quad (8)$$

Мера ползучести

$$C(t) = \frac{\gamma^{\text{полн}}(t)}{\tau} = \frac{\varphi(t)}{G_0}, \quad (9)$$

где  $G_0$  – начальный (мгновенный) модуль упругости в момент загрузки.

В табл. 4 приведены значения деформаций ползучести пенополиуретана при сдвиге  $\gamma^{\text{полз}} = \gamma^{\text{полн}} - \gamma_0$  при температуре 20, 40 и 60 °С и влажности 40 и 80 % при нагрузке  $\tau/\tau_{\text{кр}}$  от 0,1 до 0,75 и изменении деформаций ползучести в течение 200 сут. Эти значения являлись достоверной основой для вычисления параметров качества (табл. 5) по расчетным формулам (2 - 9).

**Значения полных деформаций ползучести пенополиуретана при сдвиге  
и влажности при различных уровнях**

<i>Длительность воздействия, t, сутки</i>	<i>Значения полных деформаций ползучести ППУ, <math>\gamma</math>, % при нормальных условиях, повышенной температуре T, °C и влажности W, % при соотношении <math>\tau/\tau_{кр}</math></i>									
	<i>0,1</i>					<i>0,2</i>				
	<i>T, °C</i>			<i>W, %</i>		<i>T, °C</i>			<i>W, %</i>	
	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>40</i>	<i>80</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>60</i>	<i>40</i>	<i>80</i>
0,00139	0,046	0,072	0,49	0,036	0,076	0,149	0,166	0,27	0,099	0,37
0,00694	0,061	0,096	0,199	0,056	0,096	0,169	0,229	0,36	0,15	0,39
0,0209	0,077	0,144	0,262	0,58	0,136	0,209	0,319	0,49	0,16	0,48
0,0833	0,101	0,214	0,374	0,076	0,186	0,300	0,489	0,75	0,20	0,64
0,4167	0,16	0,307	0,598	0,106	0,266	0,429	0,719	1,22	0,28	0,84
1,0	0,186	0,377	0,743	0,126	0,326	0,509	0,859	1,55	0,35	1,05
3,0	0,236	0,487	0,888	0,166	0,436	0,689	1,10	1,98	0,49	1,36
9,0	0,327	0,890	1,106	0,206	0,566	0,889	1,48	2,62	0,67	1,74
27,0	0,427					1,16				
100,0	0,487					1,47				
200,0	0,507					1,64				

Таблица 4

**при нормальных условиях, повышенной температуре  
длительного воздействия нагрузки**

<i>Значения полных деформаций ползучести ППУ, <math>\gamma</math>, % при нормальных условиях, повышенной температуре <math>T</math>, °C и влажности <math>W</math>, % при соотношении <math>\tau/\tau_{кр}</math></i>														
0,3			0,4					0,5				0,6	0,75	
$T$ , °C			$T$ , °C			$W$ , %		$T$ , °C			$W$ , %		$T$ , °C	$T$ , °C
20	40	60	20	40	60	40	80	20	40	60	40	80	20	20
0,23	0,32	0,59	0,46	0,64	1,06	0,28	1,05	1,01	1,59	2,26	0,45	2,75	1,80	3,21
0,32	0,47	0,82	0,64	0,95	1,77	0,38	1,38	1,39	2,40	3,67	0,79	3,67	2,63	5,06
0,45	0,66	1,17	0,88	1,33	2,46	0,57	1,62	2,14	3,39	5,30	1,20	4,29	3,73	7,17
0,62	1,01	1,69	1,16	2,06	3,57	0,72	2,14	2,79	4,80	8,38	1,60	5,65	5,11	10,95
0,91	1,62	3,12	2,11	3,48	6,13	1,03	3,64	4,20	6,98	12,42	2,59	9,12	6,96	15,54
1,17	2,07	4,01	2,56	4,34	7,62	1,50	4,78	5,26	8,84	14,59	3,43	11,35	8,58	18,76
1,58	2,89	5,35	3,31	5,82	10,26	2,11	8,18	7,34	10,84	17,96	4,80	15,4	11,68	-
2,36	3,92	6,9	4,81	7,73	12,76	2,82	9,89	9,32	13,8	22,12	6,47	21,0	18,68	-
3,26			7,34					11,3						
3,98			7,87					14,6						
4,38			8,81					16,8						

Таблица 5

**Показатели качества PUR при сдвиге при различных уровнях длительного  
воздействия нагрузки при температуре 20 °С**

Уровень нагрузки $\tau/\tau_{кр}$	$t, ч$	$G_{(t)}$	$\Phi_{(t)} \cdot 10^2$	$\gamma_{полн}$	$\gamma_{полз}$	$K_{(t)} \cdot 10^2$	$\Pi_{(t)} \cdot 10^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,1	0	49,50495	0	0,404	0		0,0202
	0,033333	44,44444	0,11386139	0,45	0,046	138	0,0225
	0,166667	43,01075	0,1509901	0,465	0,061	11,25	0,02325
	0,5	41,58004	0,19059406	0,481	0,077	4,8	0,02405
	2	39,60396	0,25	0,505	0,101	1,6	0,02525
	10	35,46099	0,3960396	0,564	0,16	0,7375	0,0282
	24	33,89831	0,46039604	0,59	0,186	0,185714	0,0295
	72	31,25	0,58415842	0,64	0,236	0,104167	0,032
	216	27,35978	0,80940594	0,731	0,327	0,063194	0,03655
	648	24,06739	1,05693069	0,831	0,427	0,023148	0,04155
	2400	22,24669	1,20544554	0,891	0,487	0,003425	0,04455
4800	21,9539	1,2549505	0,911	0,507	0,000833	0,04555	
0,2	0	44,94382	0	0,89	0		0,02225
	0,033333	38,46154	0,16853933	1,04	0,15	450	0,026
	0,166667	37,73585	0,19101124	1,06	0,17	15	0,0265
	0,5	36,36364	0,23595506	1,1	0,21	12	0,0275
	2	33,61345	0,33707865	1,19	0,3	6	0,02975
	10	30,30303	0,48314607	1,32	0,43	1,625	0,033
	24	28,57143	0,57303371	1,4	0,51	0,571429	0,035
	72	25,31646	0,7752809	1,58	0,69	0,375	0,0395
	216	22,47191	1	1,78	0,89	0,138889	0,0445
	648	19,5122	1,30337079	2,05	1,16	0,0625	0,05125
	2400	16,94915	1,65168539	2,36	1,47	0,017694	0,059
4800	15,81028	1,84269663	2,53	1,64	0,007083	0,06325	
0,3	0	40,26846	0	1,49	0		0,024833
	0,033333	34,88372	0,15436242	1,72	0,23	690	0,028667
	0,166667	33,14917	0,2147651	1,81	0,32	67,5	0,030167
	0,5	30,92784	0,30201342	1,94	0,45	39	0,032333
	2	28,43602	0,41610738	2,11	0,62	11,33333	0,035167
	10	25	0,61073826	2,4	0,91	3,625	0,04
	24	22,55639	0,7852349	2,66	1,17	1,857143	0,044333
	72	19,54397	1,06040268	3,07	1,58	0,854167	0,051167
	216	15,58442	1,58389262	3,85	2,36	0,541667	0,064167
	648	12,63158	2,18791946	4,75	3,26	0,208333	0,079167
	2400	10,96892	2,67114094	5,47	3,98	0,041096	0,091167
4800	10,22147	2,93959732	5,87	4,38	0,016667	0,097833	

Уровень нагрузки $\tau/\tau_{кр}$	$t, ч$	$G(t)$	$\varphi(t) \cdot 10^2$	$\gamma_{полн}$	$\gamma_{полз}$	$K(t) \cdot 10^2$	$\Pi(t) \cdot 10^2$
1	2	3	4	5	6	7	8
0,4	0	35,71429	0	2,24	0		0,028
	0,033333	29,62963	0,20535714	2,7	0,46	1380	0,03375
	0,166667	27,77778	0,28571429	2,88	0,64	135	0,036
	0,5	25,64103	0,39285714	3,12	0,88	72	0,039
	2	23,52941	0,51785714	3,4	1,16	18,66667	0,0425
	10	18,3908	0,94196429	4,35	2,11	11,875	0,054375
	24	16,66667	1,14285714	4,8	2,56	3,214286	0,06
	72	14,41441	1,47767857	5,55	3,31	1,5625	0,069375
	216	11,34752	2,14732143	7,05	4,81	1,041667	0,088125
	648	8,333333	3,28571429	9,6	7,36	0,590278	0,12
	2400	7,912957	3,51339286	10,11	7,87	0,02911	0,126375
4800	7,239819	3,93303571	11,05	8,81	0,039167	0,138125	
0,5	0	31,15265	0	3,21	0		0,0321
	0,033333	23,69668	0,31464174	4,22	1,01	3030	0,0422
	0,166667	22,72727	0,37071651	4,4	1,19	135	0,044
	0,5	18,69159	0,66666667	5,35	2,14	285	0,0535
	2	16,66667	0,86915888	6	2,79	43,33333	0,06
	10	13,49528	1,30841121	7,41	4,2	17,625	0,0741
	24	11,80638	1,63862928	8,47	5,26	7,571429	0,0847
	72	9,478673	2,28660436	10,55	7,34	4,333333	0,1055
	216	7,980846	2,90342679	12,53	9,32	1,375	0,1253
	648	6,891799	3,52024922	14,51	11,3	0,458333	0,1451
	2400	5,602241	4,56074766	17,85	14,64	0,190639	0,1785
4800	5	5,2305296	20	16,79	0,089583	0,2	
0,6	0	26,54867	0	4,52	0		0,037667
	0,033333	18,98734	0,39823009	6,32	1,8	5400	0,052667
	0,166667	16,78322	0,58185841	7,15	2,63	622,5	0,59583
	0,5	14,54545	0,82522124	8,25	3,73	330	0,06875
	2	12,46106	1,13053097	9,63	5,11	92	0,08025
	10	10,45296	1,53982301	11,48	6,96	23,125	0,095667
	24	9,160305	1,89823009	13,1	8,58	11,57143	0,109167
	72	7,407407	2,5840708	16,2	11,68	6,458333	0,135
	216	5,172414	4,13274336	23,2	18,68	4,86111	0,193333
0,75	0	19,68504	0	7,62	0		0,0508
	0,033333	13,85042	0,42125984	10,83	3,21	9630	0,0722
	0,166667	11,82965	0,66404199	12,68	5,06	1387,5	0,084533
	0,5	10,14199	0,94094488	14,79	7,17	633	0,0986
	2	8,077544	1,43700787	18,57	10,95	252	0,1238
	10	6,476684	2,03937008	23,16	15,54	57,375	0,1544
	24	5,686126	2,46194226	26,38	18,76	23	0,175867

В табл. 5 даны значения показателей качества, предложенные впервые в значительном объеме, в зависимости от длительности воздействия до 200 сут (4800 ч) и напряжений сдвига  $\tau/\tau_{кр} = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,75$ . Они установлены при испытаниях образцов пенополиуретана при  $T = (20 \dots 23)^\circ\text{C}$ , влажности  $W = 50 \dots 55\%$ .

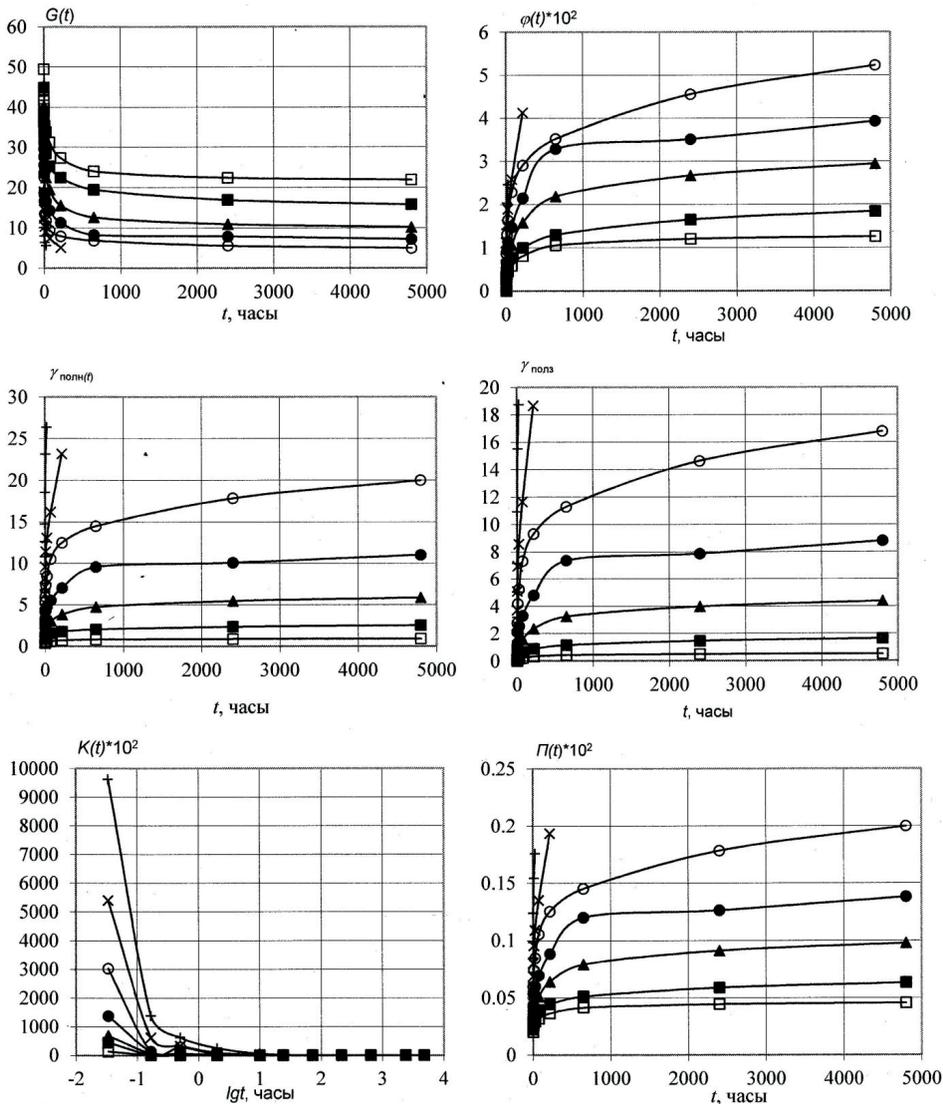
Результаты определения параметров качества исключительно важны для оценки в дальнейшем напряженно-деформированного состояния ограждающих конструкций с металлическими облицовками. Они являются приоритетными, и часть из них уже использованы в Своде правил «Конструкции ограждающие с тонколистовыми облицовками и эффективной теплоизоляцией» 2017 г. и ранее – в стандарте СТ СЭВ 5060-85 «Надежность строительных конструкций и оснований. Конструкции пластмассовые. Основные положения по расчету», в ГОСТ 23486-79.

Данные таблицы свидетельствуют о том, что в процессе длительного нагружения напряжениями сдвига  $\tau/\tau_{кр} = 0,1 \dots 0,75$  начальный модуль сдвига  $G_0$  уменьшается до  $G_t = 5,686 \text{ Па} \cdot 105$ . Значения полных деформаций ползучести  $\gamma_{полн}$  возрастают с 0,404 до 26,38. Обращает на себя внимание значительная средняя скорость ползучести  $K(t)$  при длительности воздействия, равном от  $t = 1,033 \dots 1,16$  мин до  $t = 2$  мин, что предполагает использование слабосингулярных функций влияния (ядер ползучести) при теоретических расчетах типа Ржаницына, Колтунова, Абея, Дюффинга и др. [8, 9]. Эта статистика  $K(t)$ , обоснованная экспериментально, была реализована авторами в работе [6]. Она оказалась весьма обнадеживающим, перспективным и необходимым, устойчивым для данного объекта исследования. В специальной литературе, посвященной термовязкоупругости конструкционной композитной теплоизоляции, сегодня отсутствуют сведения о значениях  $K(t)$ , поэтому сравнивать (строго) приведенные результаты по развитию  $K(t)$  во времени с другими авторами не представляется возможным. Можно высказать научное предположение о том, что еще не осознаны предельные состояния (III предельное состояние) для ограждающих слоистых конструкций с эффективной теплоизоляцией, и нормы по II предельному состоянию в соответствии с СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\*» подлежат глубокому научному осмыслению, корректировке, и эти данные должны быть включены в Свод правил «Нагрузки и воздействия» хотя бы в первом приближении.

Исключительно важными являются результаты изменения деформаций ползучести при сдвиге в зависимости от напряжений  $\tau/\tau_{кр}$  и температуры, так как перепад температур внутри (снаружи) помещений в эксплуатационных условиях может быть до  $60^\circ\text{C}$ . В многопролетных панелях одновременно с воздействием ветра и температурой возникает значительное напряженное состояние.

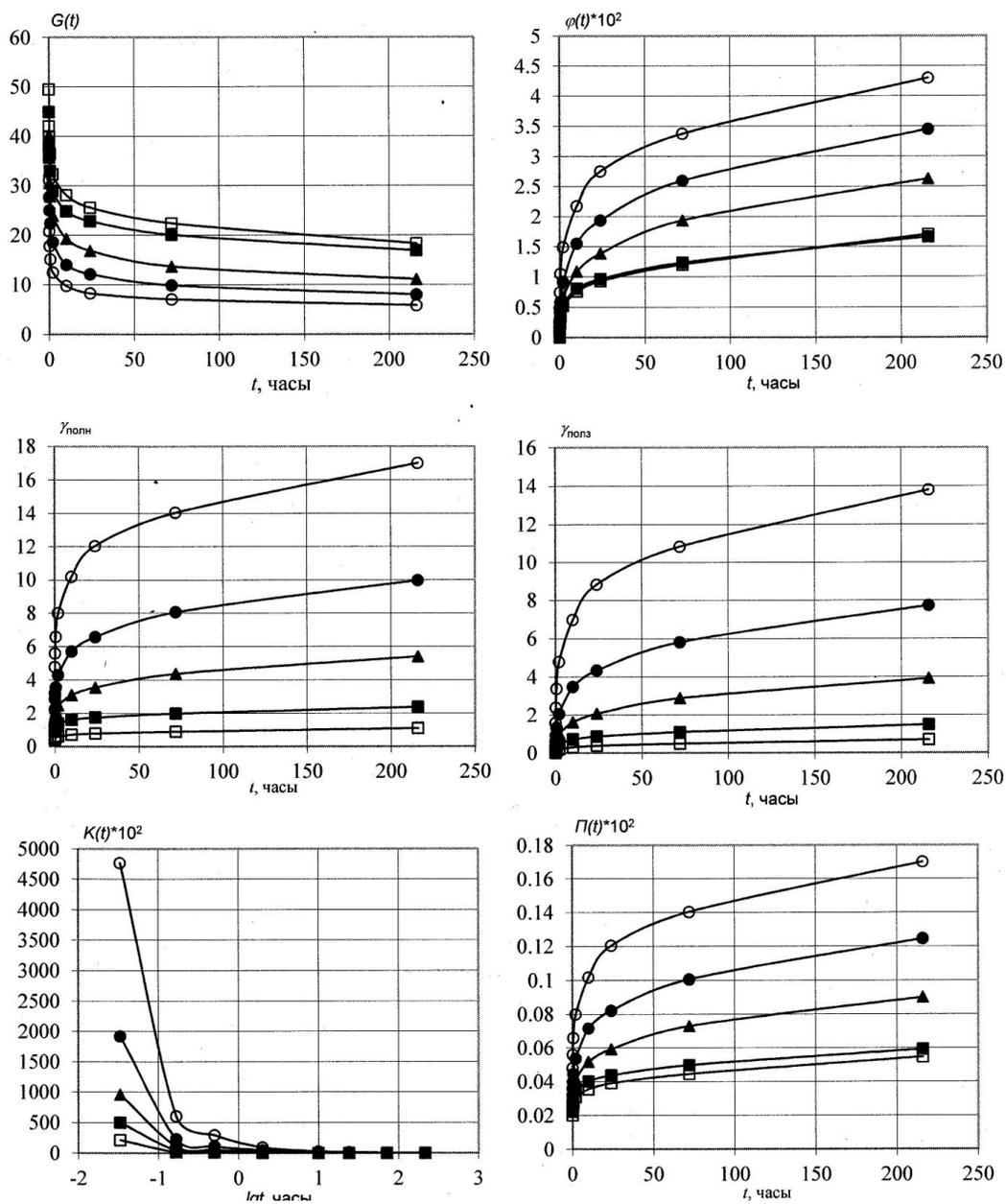
В таблицах 4 и 5 и для большей наглядности – на рис. 2–6 приведено изменение показателей качества PUR при сдвиге в зависимости от времени нагружения  $t$ , температуры и влажности, при отношении напряжений при сдвиге  $\tau/\tau_{кр} = 0,1 \dots 0,75$ . Результаты исследований свидетельствуют о том, что при напряжениях  $\tau/\tau_{кр} = 0,4$  и температуре  $40^\circ\text{C}$ , времени их воздействия, равном  $t = 72$  ч, практически имеем затуха-

ющую ползучесть. При этом при  $t = 216$  ч средняя скорость ползучести  $k(t) = 0,000982\%$  в час, и податливость  $\Pi(t)$ ,  $\text{см}^2/\text{кгс}$ , была минимальной  $\Pi(E) = 0,099$  при ее начальном значении  $\Pi(t) = 0,0227$ . Иное положение наблюдается при  $T = 60^\circ\text{C}$ . Учитывая, что коэффициент размягчения PUR, связанный с химическим течением при воздействии длительных нагрузок, находится в области значений  $120 \dots 150^\circ\text{C}$ . Здесь отмечаем, что только лишь при напряжениях сдвига  $\tau/\tau_{\text{кр}} = 0,1 \dots 0,2$  наблюдается уменьшение деформаций ползучести  $\gamma_{\text{полз}}$ , происходит их значительное затухание.

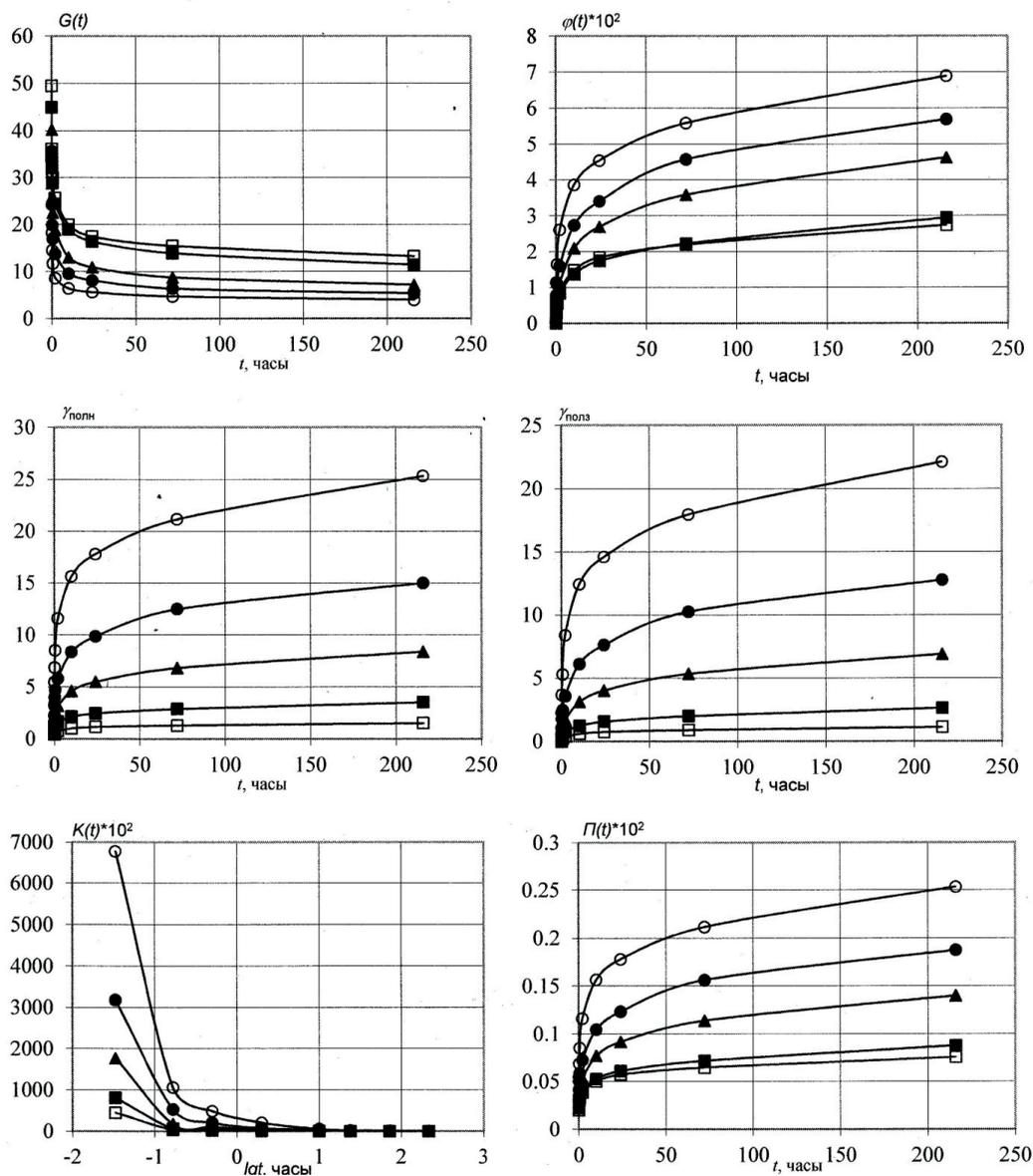


**Рис. 2.** Изменение показателей качества PUR при сдвиге при длительном воздействии нагрузки и температуре  $20^\circ\text{C}$ , при отношении  $\tau/\tau_{\text{кр}}$ , равном:

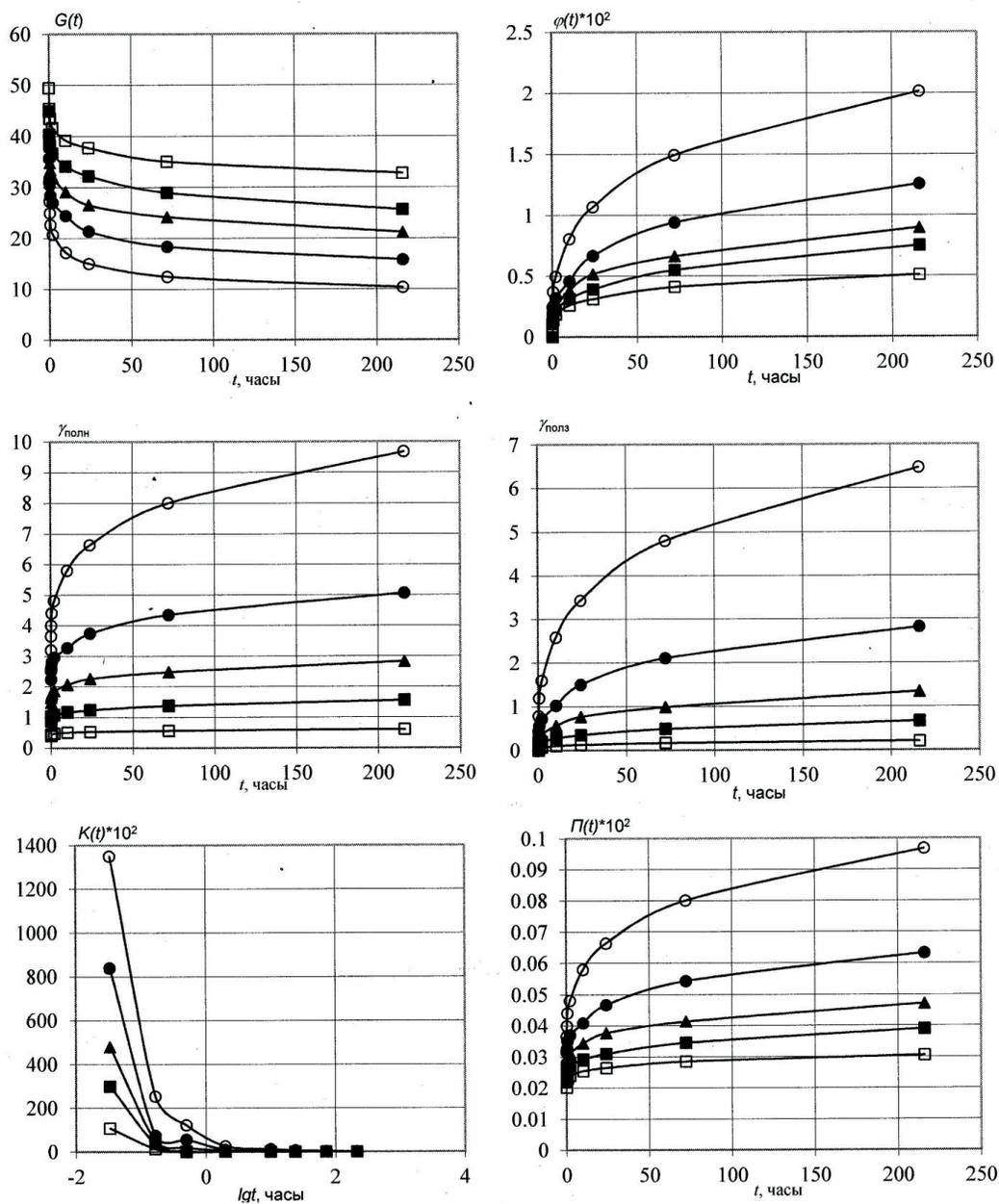
—□ --- 0,1; —■ --- 0,2; —▲ --- 0,3; —● --- 0,4; —○ --- 0,5; —× --- 0,6; —+ --- 0,75



**Рис. 3.** Изменение показателей качества PUR при сдвиге при длительном воздействии нагрузки и температуре 40 °С, при отношении  $\tau/\tau_{кр}$ , равном:  
 $\square$  --- 0,1;  $\blacksquare$  --- 0,2;  $\blacktriangle$  --- 0,3;  $\bullet$  --- 0,4;  $\circ$  --- 0,5;  $\times$  --- 0,6;  $+$  --- 0,75

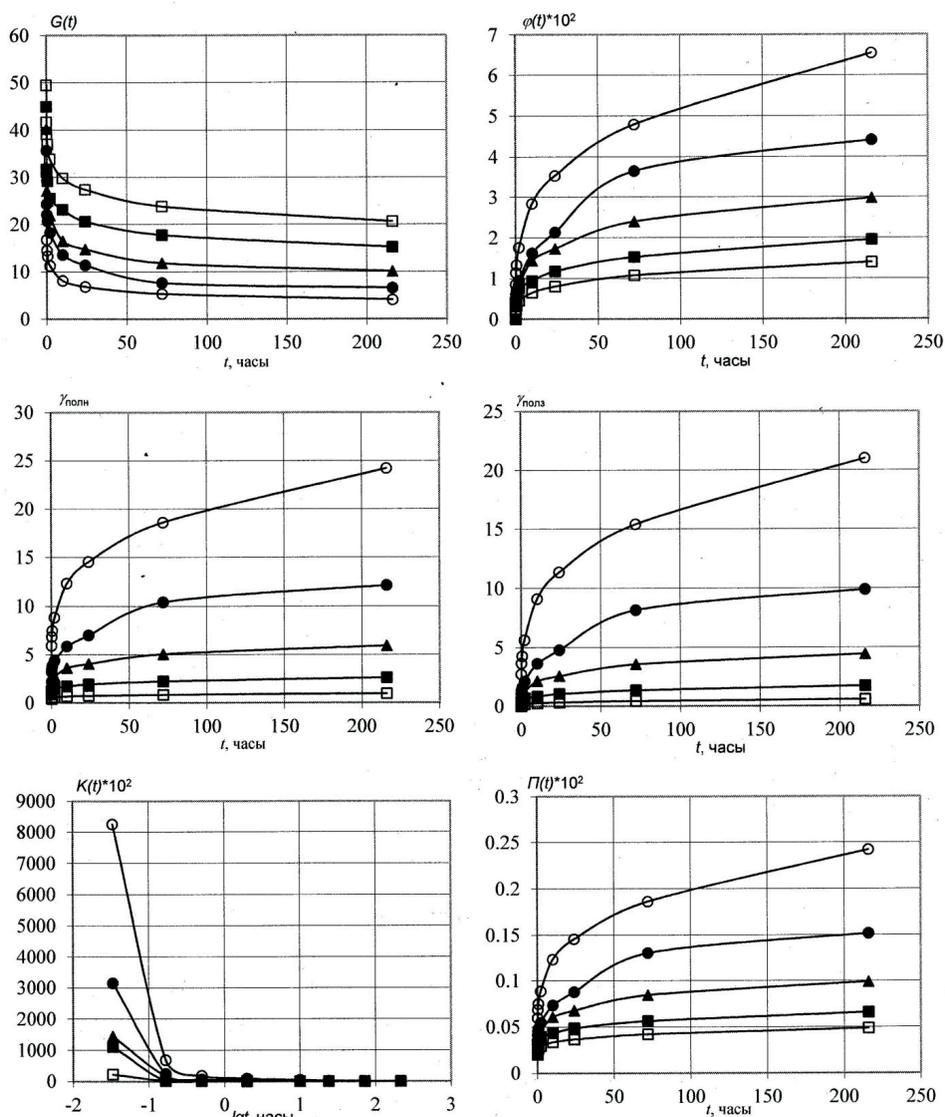


**Рис. 4.** Изменение показателей качества PUR при сдвиге при длительном воздействии нагрузки и температуре 60 °С, при отношении  $\tau/\tau_{кр}$ , равном:  
 - □ --- 0,1; - ■ --- 0,2; - ▲ --- 0,3; - ● --- 0,4; - ○ --- 0,5; - × --- 0,6; - + --- 0,75



**Рис. 5.** Изменение показателей качества PUR при сдвиге при длительном воздействии нагрузки и влажности 40 %, при отношении  $\tau/\tau_{кр}$ , равном:

—  $\square$  --- 0,1; —  $\blacksquare$  --- 0,2; —  $\blacktriangle$  --- 0,3; —  $\bullet$  --- 0,4; —  $\circ$  --- 0,5; —  $\times$  --- 0,6; —  $+$  --- 0,75



**Рис. 6.** Изменение показателей качества PUR при сдвиге при длительном воздействии нагрузки и влажности 80 %, при отношении  $\tau/\tau_{кр}$ , равном:  
 -□--0,1; -■--0,2; -▲--0,3; -●--0,4; -○--0,5; -×--0,6; -+--0,75

Изменения параметров качества, приведенные на рис. 2–6, наглядно свидетельствуют о процессах ползучести пенополиуретана при стационарных воздействиях (широкополосных, узкополосных, эргодических), по которым даны предложения авторами в работе [10], в том числе по процессам, связанным с повреждаемостью, длительной прочностью, выносливостью.

### **Заключение**

1. Исследованы показатели качества конструкционного пенополиуретана, используемого в среднем слое для теплоизоляции ограждающих конструкций с тонколистовыми металлическими облицовками – прочность, упругость, жесткость, ползучесть при температуре 20, 40 и 60 °С и влажности 40 и 80 % при нагрузке  $\tau/\tau_{кр}$  от 0,1 до 0,75.

2. Дана вероятностная оценка показателей качества прочности при сдвиге по схемам Гаусса, Грамма-Шарлье, Пирсона. Показана высокая сходимость экспериментальных и теоретических результатов.

3. Представлено развитие показателей качества в широком временном интервале.

## **Библиографический список**

1. Бобряшов В.М., Батрак В.Е., Уваров А.С. Напряженное состояние элементов трехслойных панелей с эффективным утеплителем при сдвиге // *Промышленное и гражданское строительство*. 1995. № 4. С. 46 – 48.

2. Болотин В.В. Применение методов теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971.

3. Вульфсон С.З., Бобряшов В.М. К теории длительной прочности наследственных сред / *Исследования по строительной механике*. Сб. научн. тр. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1985.

4. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977.

5. Митропольский А.К. Техника статистических вычислений. М.: Наука, 1971.

6. Бондарь С.В., Панферов К.В., Потапов Ю.Н., Бобряшов В.М. Экспериментальные исследования ползучести пенополиуретана при сдвиге / *Тр. ЦНИИСК: Научные исследования в области повышения качества ограждающих слоистых конструкций*. М.: Стройиздат, 1982. С. 131-137.

7. Улицкий И.И. Теория и расчет железобетонных стержневых конструкций с учетом длительных процессов. Киев: Будивельник, 1967.

8. Ржаницын А.Р. Теория ползучести. М.: Стройиздат, 1968.

9. Колтунов М. А. Ползучесть и релаксация. М.: Высшая школа, 1976.

10. Бобряшов В.М., Бобряшов В.В., Бушуев Н.И. Вероятностная оценка случайной нагруженности материалознергосберегающих ограждающих строительных конструкций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. Исследования по теории сооружений: Сб. статей. Вып.3(14) / Под ред. А.И. Звездова. М.: АО «НИЦ «Строительство». 2017.

## Авторы:

Виктор Михайлович БОБРЯШОВ, д-р техн. наук, академик Российской Инженерной академии, главный научный сотрудник лаборатории легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Victor BOBRYASHOV, Doctor of Engineering, Academician of the Russian Engineering Academy, Senior scientist researcher of Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: bobryashoff@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-28

Владимир Евгеньевич БАТРАК, канд. техн. наук, заведующий лабораторией легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Vladimir BATRAK, Ph.D. in Engineering, Head of the Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: batrakve@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-42

Виктор Викторович БОБРЯШОВ, ведущий научный сотрудник лаборатории легких конструкций и теплоизоляционных материалов ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Victor BOBRYASHOV, Leading researcher of the Laboratory of Lightweight Constructions and Heat Insulation Materials, TSNIISK named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: bobryashoff@yandex.ru

тел.: +7 (499) 174-73-42

Николай Иванович БУШУЕВ, канд. техн. наук, проф., кафедра «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики» «НИУ МГСУ», Москва

Nikolay BUSHUEV, Ph.D. in Engineering, Prof., Construction of thermal and nuclear energy facilities Department, National Research University – Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: SOTAE@mgsu.ru