

## МЕТОДИКА ОЦІНКИ РЕСУРСУ УЩІЛЬНЮВАЧІВ І ГЕРМЕТИКІВ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Матченко Т.І.,  
Шаміс Л.Б.,  
Первушова Л.Ф.**

*ВАТ «Київський науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «ЕНЕРГОПРОЕКТ»*

**Матченко П.Т.**

*ЗАТ «Науково-технічний центр «Ресурс»*

---

### Вступ

Ресурс або довговічність будівельних конструкцій визначається здатністю усіх елементів виконувати свої функції в межах допустимих відхилень від проектних значень. У тих випадках, коли головною функцією конструкції є її щільність, волого- і газонепроникність, ресурс конструкції визначається ресурсом всіх елементів, включаючи і ущільнювачі.

### Основний зміст

У деформаційних швах огорожувальних конструкцій повинні бути передбачені [1] компенсатори (ущільнювачі) з оцинкованої неіржавкої або гумованої сталі, поліізобутилену або інших матеріалів і установка їх на хімічно стійкій мастиці з щільним закріпленням. Конструкція деформаційних швів повинна виключати можливість проникнення крізь нього агресивного середовища. Герметизація стиків і швів огорожувальних конструкцій повинна бути передбачена шляхом заповнення проміжків герметиками. При хімічній агресивності ґрунтових або поверхневих вод підземна частина та її фундаменти повинні мати антикорозійний захист, який проектується у відповідності з вказівками [1] і виконується при перевищенні наступних норм агресивності – вода-середовище:

- при лужній агресії – місткість бікарбонату більше 1,5 мг-екв/л при вільному омиванні бетону водою;
- при загально кислотній агресії – водневий показник  $pH < 5,5$ ;
- при вуглекислій агресії – місткість вільної вуглекислоти більше 50 мг/л і  $pH < 5,5$ ;
- при магnezіальній агресії – місткість іонів магнію більше від 1000 мг/л;
- при сульфатній агресії – місткість іонів сульфатів більше 300 мг/л при місткості іонів хлоридів більше 1000 мг/л;
- при електрохімічній агресії – напруження блукальних струмів вище 3В.

Зони (З) впливу зовнішнього середовища можна визначити наступним чином:

- 3.1** – горизонтальні поверхні споруд, що знаходяться під впливом сонячного опромінення і атмосферних опадів;
- 3.2** – горизонтальні поверхні споруд під козирком;
- 3.3** – вертикальні зовнішні поверхні споруд, що знаходяться під впливом сонячного опромінення і атмосферних опадів;

- 3.4 – вертикальні зовнішні поверхні споруд, що знаходяться в тіні під впливом атмосферних опадів;
- 3.5 – поверхні, що знаходяться в приміщенні;
- 3.6 – поверхні над землею в зоні дії капілярної вологи;
- 3.7 – поверхні під землею в зоні промерзання;
- 3.8 – поверхні під землею нижче зони промерзання, але вище зони дії капілярної вологи підземних вод;
- 3.9 – поверхні під землею зони дії капілярних вод;
- 3.10 – поверхні під землею в зоні коливання рівня ґрунтових вод;
- 3.11 – поверхні під землею завжди нижче рівня ґрунтових вод;
- 3.12 – поверхні під високим гідростатичним тиском.

Для поверхонь, відкритих сонячному опроміненню, радіаційний баланс поверхні ущільнювача повинен перевищувати  $R$ , Вт/м<sup>2</sup>, який визначається залежністю

$$R = f(Q_c),$$

де  $Q_c$  – середньомісячна сумарна радіація, яка визначається за кліматичним довідником, Вт/м<sup>2</sup>. У першому наближенні

$$R_E = 0,61 \cdot Q_c - 20 \quad (1)$$

Радіаційна стійкість ущільнювача  $E_R$  за  $\tau$  місяців експлуатації повинна перевищувати величину

$$E_R = R_E \cdot \tau, \text{ Вт} \cdot \text{міс} / \text{м}^2 \quad (2)$$

Морозостійкість ущільнювача  $M_p$  на поверхнях, відкритих для промерзання (зони 1, ..., 4, 6, 7), за період експлуатації  $\tau$  років повинна перевищувати величину

$$M_p = n \cdot \tau, \quad (3)$$

де  $n$  – кількість замерзань до температури мінус 10 °С і нижче строком більше одного тижня за один рік для відповідної кліматичної зони.

У відповідності з [1] для ущільнювачів доцільно застосувати індекс, який характеризує його стійкість: **а** – ущільнювачі, стійкі на відкритому повітрі; **ан** – те саме під навісом; **п** – те саме в приміщенні; **х**, **тр** – хімічностійкі і тріщиностійкі; **х** – хімічностійкі; **т** – термостійкі; **м** – маслостійкі; **в** – водостійкі; **хк** – кислотостійкі; **хщ** – лужностійкі; **б** – бензостійкі.

Відповідно до індексу стійкості ущільнювача, герметику або мастики необхідно визначити довговічність і швидкість деградації у відповідних та протилежних умовах експлуатації.

У тих випадках, коли до складу ущільнювача входять полімери або еластомери (каучук, латекс тощо), не захищені від сонячного опромінення або дії агресивного середовища, то їх ресурс, як правило, значно менший від ресурсу скла, бетону, сталі.

Таким чином, для визначення ресурсу конструкцій, які повинні забезпечувати непроникність [1–3], необхідні методики попередньої оцінки довговічності ущільнювачів.

Критичні значення параметрів, що характеризують працездатність ущільнювачів на весь період експлуатації, приведено в табл. 1 для відкритих горизонтальних поверхонь, у табл. 2 – для вертикальних поверхонь на повітрі, у табл. 3 – для поверхонь конструкцій у ґрунті.

**Таблиця 1** – Критичні значення параметрів для відкритих горизонтальних поверхонь

Характеристики для визначення ресурсу для зон 1, 2	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	0,8	1	2	5	10	25
$K_b$ – водостійкість, частки	0,5	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$K_a$ – водостійкість за адгезією, частки	0,6	0,8	0,8	0,8	0,9	0,95
Водопоглинання, % маси, не більше	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	2,0
Набухання об'єму, %, не більше	1,75	1,5	1,25	1,0	0,75	0,5
Теплостійкість, + °C	+70	+70	+70	+70	+70	+70
Температура крижкості, – °C	–50	–50	–50	–50	–50	–50
Тріщиностійкість [ $a_{cr}$ ]:	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
• у моноліті, мм						
• у збірних конструкціях	5,0	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0
Розтягненість [ $\epsilon$ ], %	100	150	150	200	200	250
Межа міцності $R_p$ , МПа, при розтягненні	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Межа міцності $R_t$ , МПа, при стисканні	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$R_E$ – стійкість сонячному опроміненню, Вт·міс/м <sup>2</sup> (тільки для зони 1)	30	50	70	90	120	180
$M_p$ – морозостійкість, цикл	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D

**Таблиця 2** – Критичні значення параметрів для вертикальних поверхонь на повітрі

Характеристики для визначення ресурсу для зон 3, 4, 6	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	5,0	7,5	10	15	20	25
$K_b$ – водостійкість, частки	0,6	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9
$K_a$ – водостійкість за адгезією, частки	0,7	0,75	0,8	0,85	0,9	0,95
Водопоглинання, % маси, не більше	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
Набухання об'єму, %, не більше	1,5	1,25	1,0	0,9	0,8	0,7
Теплостійкість, + °C	+60	+60	+60	+60	+60	+60
Температура крижкості, – °C	–40	–40	–40	–40	–40	–40

Кінець табл. 2

Характеристики для визначення ресурсу для зон 3, 4, 6	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Тріщиностійкість [ $a_{cr}$ ]:	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
• у моноліті, мм	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
• у збірних констр.						
Розтягненість [ $\epsilon$ ], %	50	75	100	125	150	200
Межа міцності $R_p$ , МПа, при розтягненні	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2
Межа міцності $R_t$ , МПа, при стисканні	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,5
$R_E$ – стійкість сонячному опроміненню, Вт·міс/м <sup>2</sup> (тільки для зон 3, 6)	30	50	70	90	120	180
$M_p$ – морозостійкість, цикл	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	3000	4000	5000	6000	7000	8000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D

Таблиця 3 – Критичні значення параметрів для поверхонь конструкцій у ґрунті

Характеристики для визначення ресурсу для зон 7–11	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
Водонепроникність при напорі, м	25	30	35	40	50	70
$K_b$ – водостійкість, не менше	0,6	0,7	0,75	0,8	0,9	0,95
$K_a$ – водостійкість по адгезії, не менше	0,7	0,75	0,8	0,9	0,95	0,97
Водопоглинання, % маси, не більше	6,0	5,0	4,0	3,0	2,5	2,0
Набухання, % об'єму	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6
Теплостійкість, + °С	+40	+40	+40	+40	+40	+40
Температура крихкості, – °С	–5	–5	–5	–5	–10	–15
Тріщиностійкість [ $a_{cr}$ ]:	0,25	0,2	0,15	0,1	0,1	0,1
• у моноліті, мм	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,4
• у збірних конструкціях						
Розтягненість [ $\epsilon$ ], %	35	40	45	50	60	70
Межа міцності $R$ , МПа, при розтягненні	0,35	0,4	0,45	0,5	0,6	0,8
Межа міцності $R$ , МПа, при стисканні	0,6	0,8	0,9	1,0	1,2	1,5

Кінець табл. 3

Характеристики для визначення ресурсу для зон 7–11	Проектний ресурс, рік					
	0–5	5–25	25–50	50–75	75–100	100–150
	Механічні характеристики повинні перевищувати значення					
$M_p$ – морозостійкість, цикл (тільки для зони 7)	50	250	500	750	1000	1500
Сульфатостійкість, мг/л	10000	20000	40000	50000	60000	70000
Кислотостійкість, рН	12	10	8	6	4	2
Лужностійкість, рН	2	4	6	8	10	12
Стійкість до агресивних газів за групами концентрації [1]	A	B	C	C	D	D
Стійкість до амонійних солей, мг/л, в перерахунку на $NH_4^+$	100	500	800	1000	1500	
Стійкість до їдких лугів, мг/л, в перерахунку $Na^+$ і $K^+$	50000	60000	80000	100000	150000	

### Вимоги до гідроізоляції

На гідроізоляцію будівельних конструкцій підземних споруд від просочення і ґрунтових вод мають вплив різні агресивні фактори, до яких відносяться такі як коливання температури і вологості середовища, дія біосфери (грибки, мікроорганізми і гризуни), хімічно агресивне середовище (в умовах агресивних ґрунтових вод), а також силові впливи від опору ґрунту і переміщення конструктивних елементів.

Тому матеріали, які застосовуються для гідроізоляції, повинні мати наступні властивості: водонепроникність і мінімальні водопоглинання, водонасичення і гідростатичність; пружність деформацій, які виникають при нерівномірних осіданнях споруди, і твердість, необхідну для сприйняття місцевого тиску від включень каміння у ґрунті, а також гнучкість і технологічність; водо-, тепло- і біостійкість, а також стійкість до хімічних впливів; адгезію до поверхні, яка ізолюється.

Вимоги до герметизувальних матеріалів залежать від кліматичних умов і типів споруд. Наприклад, у IV кліматичній зоні на автодорожніх мостах потрібна розтягненість герметику до 57 %, на лотках і акведуках у надводній частині – до 30 %, у підводній частині – до 22 %, а в підземних спорудах – не більше 7,5 %. У підводній і підземній частинах споруд від герметику вимагається висока водостійкість: водопоглинання – не більше 3 %; набрякання – 1 %; коефіцієнт водостійкості при тривалих навантаженнях у воді – не нижче 0,8.

Конструкція ущільнювача деформаційного шва як в тонкостінних спорудах, так і в масивних, визначається, у першу чергу, максимальною розрахунковою деформацією у шві. При незначних деформаціях (до 5 мм) в підземних спорудах шви ущільнюють, підсилюючи гідроізоляцію прокладкою металевих або пластмасових листів, при деформаціях до 50 мм – ущільнення підсилюють вже листами-компенсаторами, а при значних деформаціях – асфальтовими шпонками і гумовими діафрагмами.

В тонкостінних конструкціях усі ущільнювачі у надземній і надводній зонах знаходяться під впливом змінної температури зовнішнього середовища, а тому матеріали таких ущільнювачів повинні бути морозостійкі: наприклад, в цих умовах слід застосовувати світло- та морозостійкі

гуми або стабілізований поліетилен (з температурою крихкості – 70 °С), у тих зонах, де відсутнє промерзання, можна використовувати прокладки і діафрагми з пластифікованого полівінілхлориду, температура склоутворення якого не нижче –23 °С.

Шпонки, що знаходяться на поверхні, не можна заповнювати асфальтовими мастиками, які мають температуру крихкості вище –10 °С, використовуючи для цього гумобітумні мастики з температурою крихкості –17 °С або полімеробітумні мастики з температурою крихкості від –25 °С до –50 °С.

Проектний строк служби ущільнювачів повинен бути не менше періоду капітальних ремонтів споруд, у випадку неможливості виконання ремонтних робіт строк служби ущільнювачів повинен бути не менше проектного ресурсу споруди.

Строки служби і капітальних ремонтів будівель і споруд [6] наведено у табл. 4.

**Таблиця 4** – Строки служби і капітальних ремонтів будівель і споруд

Будівлі	Строк служби, рік	Строк капітального ремонту, рік	
		норма	у складних умовах
<b>БУДІВЛІ</b>			
Одноповерхові	40	25	16
Двоповерхові	83	30	25
Багатоповерхові	100	60	25
Промислових підприємств	59	30	25
ГЕС, АЕС	100	20	15
<b>ПРОМИСЛОВІ СПОРУДИ</b>			
Резервуари:			
– залізобетонні	50	15	12
– металеві	36	10	8
– для хімічних продуктів	28	8	6
Відстійники	50	6	5
Пруди-охолоджувачі	40	12	6
Градирні:			
– залізобетонні	30	4	3
– металеві	10	4	3
Трубопроводи:			
– залізобетонні	50	30	20
– металеві	20	15	10
Мости:			
– залізобетонні	100	40	35
– металеві	100	10	8
Аеродроми:			
– з бетонним покриттям	50	8	2
– з асфальтобетонним покриттям	31	10	4

Довговічність полімерів можна прогнозувати за формулою [4]

$$\tau = \tau_0 \cdot \exp \frac{(u_0 - \gamma \cdot \sigma)(1 - t/\theta)}{k \cdot T}, \quad (4)$$

де  $\tau$  – розрахункова довговічність полімеру з урахуванням статичної втоми, рік;

$\tau_0$  – флуктуаційна характеристика;

$u_0$  – енергія активізації руйнування;

$\sigma$  – розрахункове напруження;

$k$  – постійна Больцмана;

$T$  – абсолютна температура за шкалою Кельвіна.

В табл. 5 приведено розрахункові значення коефіцієнтів для деяких полімерів.

**Таблиця 5** – Розрахункові значення коефіцієнтів для полімерів

Матеріал	$u_0$ , кДж/моль	$\lg \tau_0$	$\frac{10^3}{T_0 K}$	$\gamma$ , кДж/моль·МПа
Поліетилен ПНП (розрив)	260	-12	1,5	$4,2 \cdot 10^3$
Те саме, при деформуванні	1176	-3; -4	2,6	$6,3 \cdot 10^4$
Поліметилметанрилат	218	-12	1,5	$2,1 \cdot 10^3$
Те саме, при деформуванні	630	-5	2,4	$8,4 \cdot 10^3$
Поліпропілен (розрив)	235	-12	1,3...1,5	$1,6 \cdot 10^3$
Те саме, при деформуванні	1050	-2	2,4	$6,3 \cdot 10^4$
ПВХ-пластикат	500	-5	2,9	$4,2 \cdot 10^3$
Те саме, при деформуванні	840	-13	2,5	$8,4 \cdot 10^3$
Полістирол (розрив)	235	-12	1,3	$6,3 \cdot 10^3$
Те саме, при деформуванні	800	-1; -2	2,7	$1,6 \cdot 10^4$

Значення будь-якого параметру ( $T_{m\tau}$ ,  $T_{g\tau}$ ,  $\sigma_\tau$ ,  $T_\tau$ ,  $E_p$ ), що характеризує працездатність матеріалу ущільнювача після  $\tau$  років експлуатації, можна моделювати залежністю

$$P_\tau = P_0(1 - \omega) = P_0 - \nu_0 \cdot \tau \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (5)$$

$$\omega = \nu_0 \cdot \tau, \quad (6)$$

де  $P_0, P_\tau$  – значення параметру на початку експлуатації і після  $\tau$  років;

$\omega$  – параметр пошкодження ( $0 \leq \omega < 1$ );

$\nu_0$  – швидкість старіння, рік<sup>-1</sup>;

$\tau$  – час експлуатації;

$\prod_{i=1}^n$  – знак добутку параметрів впливу на швидкість деградації;

$K_i$  – коефіцієнти впливу на швидкість деградації.

Ресурс можна визначати за формулою

$$[\tau] = \tau_0 - \nu_0 \cdot \tau \cdot \prod_{i=1}^n K_i, \quad (7)$$

де  $\tau_0$  і  $\nu_0$  – приймаємо за даними табл. 6 для мастичних і профільних герметиків і з табл. 7 для полімерних плівок.

**Таблиця 6** – Значення  $\tau_0$  і  $\nu_0$  для мастичних і профільних герметиків

Назва герметику	R, МПа	A, %	$\tau_0$ , рік			$\nu_0$ , рік <sup>-1</sup>		
			на повітрі	замерзання відтавання	під водою постійно	на повітрі	замерзання відтавання	під водою постійно
Поліізобутіловий УМС-50	<0,1	200...250	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Поліізобутіловий УМ-40	0,01	250...300	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Бутилкаучуковий БГМ-1, БГМ-2	0,6...1,0	200...350	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Тіоколовий КБ-0,5 ГС-1, У-30М	1,0...4,5	150...200	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Гідром (тіокол+кам'яновугільна смола)	0,4	350	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Еластосил 11-06 (бутилкаучук)	0,3	80	15	7	100	0,3	0,5	0,2
УТ-38 (тіокол + кам'яновугільна смола)	0,25	250	30	15	100	0,3	0,5	0,2
МБ БГ (бітум+БК латекс)	0,15	135	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бітум + термоеласто-пласт ДСТ	0,1	120	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бітеп (бітум+СКЕПт-30)	0,5	200	15	7	50	0,3	0,5	0,2
Бутепрол-1 (бутіл-каучук + СКЕП)	0,05...0,15	30...50	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Гумова стрічка	15...20	500...600	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Поліізобутілова стрічка УГС	0,3...0,5	200	30	15	100	0,3	0,5	0,2
Герметик круглий	0,25	50	20	10	50	0,3	0,5	0,2
Пороізол марки П	1,5...2,0	150...300	20	10	50	0,3	0,5	0,2
Пороізол марки М	0,05...0,16	50...75	15	7	40	0,3	0,5	0,2



**Таблиця 7** – Значення  $\tau_0$  і  $\nu_0$  для полімерних плівок

Назва	R, МПа	A, %	[-T], tg °C	Наземні	Підземні	Наземні	Підземні
				$\tau_0$ , рік		$\nu_0$ , рік <sup>-1</sup>	
Поліетиленова рукавна	10...17	300...400	-70	70	135	0,5	0,2
Засилена ПНП із П-2006В	15...23	480...670	-70	70	135	0,5	0,2
Сицален, фертен, аккартен	15...20	300...400	-40	40	120	0,5	0,2
Хуноні-темі, токален, ХИ-зекс	8,5...15	300...400	-50	50	125	0,5	0,3
Стафлен, траполен, еполен	10...18	300...500	-50	50	125	0,5	0,3
Ніколон, кельтан	6,0...12	80...500	-40	40	120	0,5	0,4
Вестален, ірратен, дельта	7,0...15	120...600	-40	40	120	0,5	0,4
Полівінілхлоридні	11	140	-25	13	12	0,5	0,5
Упаковочна В-118							
Еластична	10...15	130...750	-50	15	25	0,5	0,3
Ізоляційна ДВИ-45	10	180...220	-40	14	20	0,5	0,4
Віні план-хеммінг (армована)	15	25	-30	13	15	0,5	0,5
Пластизол, липка (для труб)	10	150	-20	13	15	0,5	0,5
Ізофол А, В, АВ, ВВ, ВС	15	250	-30	13	15	0,5	0,5
Бекофол, вукофлекс, екопласт	10...15	200...250	-17	12	10	0,5	0,5
Тиратрон, федлацета	3...16	20...220	-25	13	12	0,5	0,5
Віннол, вілкопласт, ірецпласт	10...15	100...150	-20	13	10	0,5	0,5

Значення коефіцієнтів впливу факторів середовища на швидкість старіння полімерів.

**Таблиця 8** – Значення коефіцієнту впливу сонячного опромінення  $K_1$

Режим сонячного освітлення	Постійно на сонці	На сонці під склом	Періодичне освітлення	Періодичне освітлення під склом	Постійно в тіні
$K_1$	5	4	3	2	1

**Таблиця 9** – Значення коефіцієнту впливу температури середовища  $K_2$

Межі коливання температури $T$	$T < T_g$	$T < T_g < T_g + 10^\circ\text{C}$	$T_g + 10^\circ\text{C} < T < T_g + 50^\circ\text{C}$	$T_g + 50^\circ\text{C} < T < T_m$	$T \geq T_m$
$K_2$	$\infty$	$1 + \frac{T}{T - T_g}$	1	$1 + \frac{T}{T_m - T}$	$\infty$

**Таблиця 10** – Значення коефіцієнту впливу рівня напружень або деформацій  $K_3$

Відношення $\sigma/R$ або $\varepsilon/A$	0	0,01...0,99	1
$K_3$	1	$1 + \frac{\varepsilon}{A - \varepsilon}$ або $1 + \frac{\sigma}{R - \sigma}$	$\infty$

**Таблиця 11** – Значення коефіцієнту впливу рівня агресивності середовища по відношенню до полімеру

Ступінь агресивності середовища	Не агресивне	Слабо агресивне	Середньо агресивне	Сильно агресивне
$K_4$	1	1,5	5	17

### Термічне старіння ущільнювачів

В залежності від температури середовища існує п'ять станів, при яких можуть існувати полімери: кристалічний, аморфний (склоподібний) нижче температури  $T_g$ ; кристалічний і аморфний (каучукоподібний) між температурами  $T_g$  і  $T_m$  і рідкий стан, вище температури  $T_m$ .

Кристалічні домени (з яких складається полімер) нижче температури плавлення  $T_m$  і щільні аморфні вище температури склоутворення  $T_g$  визначають модуль пружності, міцність і накопичення енергії при високих рівнях напружень. Втрата енергії (дисипація) обумовлена більш рухливими аморфними станами, які існують в області приблизно від  $T_g + 10^\circ\text{C}$  до  $T_g + 50^\circ\text{C}$ .

Процес накопичення незворотних деформацій, релаксації напружень і дисипації більшою мірою відбувається в інтервалі між  $T_g + 50^\circ\text{C}$  і  $T_m$ . При температурах вище  $T_m$  пружно працюють тільки волокна композитів.

Таким чином, одним із механізмів старіння полімерів є зміна в часі  $T_g$  і  $T_m$ . А критеріями старіння є

$$T_{m\tau} \geq [T_m], \quad T_{g\tau} \geq [T_g]. \quad (8)$$

Водостійкість є найважливішою властивістю гідроізоляційних покриттів і ущільнювачів, за якою визначається довговічність. Випробування свідчать, що при насиченні гідроізоляційного матеріалу водою вище 5 %, він втрачає до 15 % початкової міцності (коефіцієнт водостійкості  $k_b = 0,85$ ) і стає електропровідним (електроопір менше  $10^7$  Ом·см), а далі настає його каскадне руйнування.

Друга визначальна властивість довговічності ущільнювачів – це тріщиностійкість при миттєвих коливаннях температури або при виникненні тріщин в конструкціях, або при розширенні чи звууженні деформаційного шва.

Тріщиностійкість полімерів залежить від накопичених незворотних деформацій, які визначаються для пружнов'язкопластичних матеріалів такою залежністю

$$\varepsilon_t = \frac{\sigma_t}{E_y} + \frac{\sigma_t}{E_e(1 - e^{-t/\tau})} + \frac{(\sigma_t - \sigma_0)^\beta}{\eta_0} \cdot t \cdot e^{-t/\tau}, \quad (9)$$

де  $\varepsilon_t$  – відносна деформація від напруження  $\sigma_t$ ;

$E_y$  – модуль пружності матеріалу;

$E_e$  – модуль пластичності;

$\tau$  – час релаксації напружень з часом дії  $t$ ;

$\sigma_0$  – межа текучості або межа довготривалої міцності;

$\beta$  – міра аномальності в'язкості для аномально в'язких матеріалів;

$\eta_0$  – найбільша структурна в'язкість незруйнованої структури.

Усі перелічені структурно-реологічні характеристики матеріалів можуть бути визначені експериментально при постійних напруженнях і температурі ( $\sigma = const$ ;  $t^o = const$ ) з кривих повзучості за залежностями

$$E_y = \frac{\sigma}{\varepsilon_y}; \quad E_e = \frac{\sigma}{\varepsilon_e}; \quad \eta_0 = \frac{\sigma}{d\varepsilon_T/dt}; \quad \eta_e = \frac{\sigma}{d\varepsilon_e/dt}; \quad \tau = \frac{\eta_e}{E_e}; \quad (10)$$

$$\beta = \frac{\lg(d\varepsilon'_T/dt) - \lg(d\varepsilon''_T/dt)}{\lg \sigma'' - \lg \sigma'} = const. \quad (11)$$

Для ідеально в'язких рідин  $\beta = 1$ , а для бітумів  $\beta > 1$ , для жорстких асфальтів  $\beta \gg 1$ .

### Релаксація напружень ущільнювача

Ущільнювачі, як правило, працюють в умовах довготривалої деформації, для якої характерна релаксація напружень.

Якщо на початку експлуатації ущільнювач має деформацію  $\varepsilon_0$ , яка відповідає напруженням  $\sigma_0$ , то після  $\tau$  років експлуатації напруження визначається залежністю [5]

$$\sigma_1 = \left[ 1 + \left( \frac{m_g}{m_e} - 1 \right) \cdot e^{(-t/\tau) \cdot M} \right] \cdot m_e \cdot \varepsilon_0 \quad \text{при } t > 0, \quad (12)$$

$$M = M_0 \cdot (T/273 \text{ } ^\circ K), \quad (13)$$

де  $\tau$  – час в роках, при якому  $\sigma = \sigma_\tau$ ;

$t$  – час у роках;

$\sigma$  – напруження;

$\varepsilon$  – деформації;

$m_g$  – модуль деформації ущільнювача на початку експлуатації;

$m_e$  – модуль деформації ущільнювача на час релаксації напружень до рівня  $\sigma_\tau$ ;

$M_0$  – модуль релаксації матеріалу при 20 °С.

Значення модуля деформації полімеру можна визначити за формулою

$$m_e/m_g = 1 \pm V_T \quad (\lg \tau_p - \lg \tau_0), \quad (14)$$

де  $V_T$  – швидкість зміни модуля деформації матеріалу в часі, рік<sup>-1</sup>;

$\tau_p$  – розрахунковий час, рік;

$\tau_0$  – деякий початковий проміжок інкубаційного періоду старіння, коли властивості матеріалу майже не змінюються; знак «+» або «-» у рівнянні залежать від умов експлуатації в атмосфері (+) або під водою (-).

У свою чергу, напруження в ущільнювачі можуть змінюватися в залежності від температури навколишнього середовища. Якщо  $T_0$  і  $V_0$  – початкова температура і об'єм ущільнювача, то одновісне адіабатичне напруження дорівнює

$$\sigma_2 = \frac{T \cdot V_0}{T_0 \cdot V} \cdot G_0 \left( 2 - \frac{1}{\lambda^2} \right), \quad (15)$$

де  $V$  – об'єм при  $T$  у відсутності напружень;

$G_0$  – модуль зсуву при  $T_0$ ;

$\lambda$  – ступінь розтягнення (стиску)  $(L/L_0)$  полімеру.

В той час, як деформація  $\epsilon$  дорівнює  $(L/L_0) - 1$ .

В свою чергу, для будь-якого полімеру зберігається залежність

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left(\frac{V_0 \cdot W_0}{C_\lambda \cdot T_0}\right), \quad (16)$$

де  $C_\lambda$  – теплоємність полімеру для даного ступеня витягнутості ( $\lambda$ );

$W_0$  – функція енергії деформації, яку сприймав би полімер, доведений до тієї самої деформації адіабатично;

$T$  – температура зовнішнього середовища.

Тоді напруження в ущільнювачі дорівнюють сумі значень

$$\sigma_\tau = \sigma_1 + \sigma_2. \quad (17)$$

Одним із критеріїв втрати працездатності ущільнювача є релаксація напружень до рівня, нижче якого ущільнювач експлуатувати не можна. Значення технічних станів ущільнювачів за відношенням  $\sigma_\tau/\sigma_0$  приведено в табл. 12.

В першому приближенні для інженерних розрахунків значення  $m_g$  можна знайти за відношенням

$$m_g = R/A \quad (18)$$

де  $R$  – межа міцності матеріалу при розриві зразка;

$A$  – відносне подовження при розриві зразка.

**Таблиця 12** – Значення технічних станів ущільнювачів за відношенням  $\sigma_\tau/\sigma_0$

Технічний стан	$\sigma_\tau / \sigma_0$	$m_g / m_e$
Добрий	1...0,9	1...1,1
Задовільний	0,9...0,5	1,1...2,0
Незадовільний	0,5...0,1	2,0...10,0
Непридатний до експлуатації	0,1...0,0	10,0...∞

Для нормальних умов експлуатації ущільнювача  $\varepsilon_0 = 7 \dots 12 \%$  (0,07...0,12 в долях). Для деяких еластомерів, з яких виготовляються ущільнювачі, значення  $R$  і  $A$  приведені в табл. 13.

**Таблиця 13** – значення  $R$  і  $A$  для деяких еластомерів

Назва еластомеру	Межа міцності $R$ , МПа		Видовження при розриві $A$ , %	
	чистий	із сажею	чистий	із сажею
Каучук із гевеї	20,6	27,47	800	600
Високомолекулярний цис-поліізопрен	20,6	27,47	800	600
Високомолекулярний цис-полібутадієн	5,49	20,6	800	550
Стіролбутадієновий каучук	1,72	20,6	500	500
Акрилонітрилбутадієновий каучук	4,81	27,47	600	500
Хлоропреновий каучук	24,03	24,03	800	600
Бутіл-каучук	17,17	20,60	800	700
Етиленпропиленовий каучук	3,43	20,60	400	500
Поліалкіленосульфідний каучук	6,867	–	500	–
Поліакриловий каучук	2,06	17,16	600	300
Поліуретановий каучук	41,20	–	700	–
Полісилоксановий каучук	6,87	–	400	–
Фтор каучук Viton	24,0	–	400	–
Поліфторсіліконовий каучук	6,86	–	200	–
Nuralon	27,47	24,03	600	500

Температурні напруження  $\sigma_t$  і міцнісні характеристики ущільнювачів (герметиків) можна визначити за формулами

$$\sigma_t = R_z \frac{E_y \cdot b^2}{\pi^2 \cdot \delta (f \cdot E_y + A_b \cdot \delta)}, \quad (19)$$

$$\frac{E_y}{R_z} \leq \left( \frac{l^2}{\delta^2 \cdot \pi^2 \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta t^o} - 1 \right) \cdot \frac{\delta}{f}, \quad (20)$$

де  $E_y$  – модуль пружності армоеластика;

$b$  – половина ширини ущільнювача;

$R_z$  – межа міцності при розтягу;

$f$  – половина висоти вигину ущільнювача;

$\Delta\alpha = \alpha_n - \alpha_0$  – різниця коефіцієнтів лінійного термічного розширення покриття і основи;

$\Delta t^o$  – амплітуда коливання температури;

$A_b$  – адгезія до основи (клебемаси). Ці формули справедливі, якщо герметик наклеєно на основу;

$\delta$  – товщина листа ущільнювача.

Максимальні напруження в петлевому ущільнювачі

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\left(\frac{E_y \cdot \Delta\delta}{2} \beta\right)^2 + 3\left(\frac{G \cdot \Delta z}{\beta}\right)^2} = \sqrt{\frac{E^2 y \cdot \Delta x^2 \cdot \delta^2 \cdot \beta^4 + 12G^2 \cdot \Delta z^2}{4\beta^2}}, \quad (21)$$

де  $G$  – модуль зсуву матеріалу ущільнювача;

$G = \rho \cdot \cos\varphi + b + \pi \cdot r$  – половина довжини листа-ущільнювача в шві;

$\Delta x, \Delta y$  – розходження сусідніх секцій споруди в шві по осі  $x$  та осі  $y$  відповідно.

Розрахунок листів і смуг герметиків на виникнення тріщин у шві рекомендується визначати за величиною збільшення довжини  $a_T$  листа на його ширині 1 м.п.

$$a_T = 2k_u \cdot E_u \cdot \delta \cdot \varepsilon_u^2 / (R_M + q \cdot f_u), \text{ см}, \quad (22)$$

$$a_T \leq [a_T], \quad (23)$$

де  $k_u = f(\delta \cdot R_u / R_M) = 0,67 \dots 1,4$ ,  $E_u$  – модуль деформації гідроізоляційного матеріалу, МПа;

$\delta$  – товщина покриття, см;

$\varepsilon_u$  – відносне подовження гідроізоляційного матеріалу;

$R_u$  – розрахунковий опір матеріалу розтягненню, МПа;

$R_M$  – розрахунковий опір мастики на зсув, МПа;

$q$  – розрахункове навантаження на гідроізоляційний шар, МПа;

$f_u$  – коефіцієнти тертя привантажувального ґрунту або покриття на ізоляцію.

Таким чином, довговічність листових герметиків за критерієм виникнення тріщин залежить від змінювання в часі параметрів в  $R_M(\tau)$ ,  $R_u(\tau)$ ,  $f_u(\tau)$  за формулою (1).

Механічні характеристики для розрахунку тріщиностійкості плівок та листів гідроізоляції приведено в табл. 14.

### Витривалість ущільнювачів

Для полімерних матеріалів є справедливою залежність

$$\sum_i^n \left( \frac{t_i}{t_{Vi}} \right)^m \leq 1, \quad t_{повн} = \sum_i^n t_i \quad (24)$$

де  $t_i$  – час циклу, протягом якого зразок піддається деформуванню зі швидкістю  $V_i$ ;

$t_V$  – час до відмови з цією швидкістю;

$t_{повн}$  – час до руйнування при множині циклів навантаження;

$n$  – кількість циклів навантаження.

**Таблиця 14** – Механічні характеристики для розрахунку тріщиностійкості плівок та листів гідроізоляції

Назва покриття	Модуль деформації $E_{и}$ , МПа	Розтяжми мість $\epsilon_{и}$ , %	Міцність $R_u$ , МПа	Товщина $\delta$ , см	Міцність зсуву для мастиці $R_{иs}$ , МПа	$k_u$	Критичне видовження $[\alpha_T]$ , см
1	2	3	4	5	6	7	8
У приміщенні							
Обклеювальна гідроізоляція для ПВХ	60	20	12,0	0,2	0,52	1,4	2,0
Те саме, із ПВХ-пласти- ката на мастиці БКС	20,5	10	21,5	0,2	0,52	1,4	0,2
Поліетиленовий лист на мастиці БКС	54	20	10,7	0,2	0,52	1,4	1,7
Із ізолу на бітумі БН 70/30:							
у 3 шари	28	10	2,4	1,8	0,40	2,0	3,5
у 4 шари	45	8	3,6	2,4	0,40	2,0	3,5
у 5 шарів	54	8	4,5	2,8	0,40	2,0	4,8
Із брізела на мастиці БРМ:							
у 3 шари	32	8	3,1	2,0	0,48	2,0	2,5
у 4 шари	51	8	4,1	2,4	0,48	2,0	4,7
у 5 шарів	61	8	5,1	2,8	0,48	2,0	10,3
З урахуванням термостатичності при +10 °С (в ґрунті)							
Обклеювальна гідроізоляція з ізолу	15	20	5,0	2,4	1,2	2,0	3,3
Те саме, при наклеюванні на полімерні бітуми	15	20	6,0	2,4	1,8	2,0	3,3
Еластобіт у 2 шари	1	40	0,15	1,0	0,11	1,0	11,0
Фарбувальна гідроізоляція із бітепів:							
бітум БН 70/30 +10% бутилкаучуку	140	14	0,13	0,2	0,13	0,5	1,9
бітум БН 70/30 +10% ДСТ-30	5,8	69	0,12	0,2	0,12	0,5	1,8
бітум БН 70/30 +10% СКЕПт-70	45,6	19	0,11	0,2	0,11	0,5	1,1
Те саме, при армуванні склосіткою СС-1А	1200	15	5,6	0,4	0,13	0,5	3,8
Епоксидно-каучукова емаль ЕКК-100	1900	10	11,0	0,1	7,04	0,67	0,35
Те саме, при армуванні склосіткою СС-1А	1560	10	12,6	0,25	7,04	0,5	0,54
Те саме, при армуванні склотканиною СТС	1560	10	20,0	0,35	7,04	0,67	1,0
Штукатурна гідроізоляція із БАЕМ	30,4	25	5,5	1,0	0,88	2,0	3,2
Те саме, при армуванні склосіткою	1200	6	8,7	1,5	0,88	2,0	7,05

Кінець табл. 14

1	2	3	4	5	6	7	8
З урахуванням термостатичності при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (взимку на поверхнях, відкритих впливу атмосфери)							
Обклеювальна гідроізоляція з ізоу	225	1	3,0	2,4	3,00	1,0	0,06
Те саме, при наклеюванні на полімерні бітуми	223	3	4,0	2,4	2,00	0,67	1,6
Еластобіт, наплавляємий у 2 шари	68	34	4,0	1,0	2,00	0,67	1,6
Фарбувальна гідроізоляція із бітепів:							
бітум БН 70/30 +10% бутилкаучуку	4000	4	1,2	0,2	1,22	0,5	0,90
бітум БН 70/30 +10% ДСТ-30	360	14	1,8	0,2	1,82	0,5	0,70
бітум БН 70/30 +10% СКЕПт-70	440	14	1,38	0,2	1,40	0,5	1,10
Те саме, при армуванні склосіткою	1600	3	8,7	0,4	1,40	1,0	0,83
Штукатурна гідроізоляція з БАЕМ	120	5	2,0	1,0	2,2	0,67	1,70
Те саме, при армуванні склосіткою	1600	3	8,5	1,5	2,2	1,4	2,50

Циклічна тріщиностійкість ущільнювачів визначається залежністю

$$n = \frac{B^2}{[2 \cdot W \cdot f(\lambda)]^2} \left( \frac{1}{c_1} - \frac{1}{c_2} \right), \quad (25)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  – відповідно довжина початкового надрізу та після  $n$  циклів навантаження;

$B$  – константа зростання надрізу, яка дорівнює  $B = T / \sqrt{dc/dn}$  ;

$T$  – питома енергія розриву;

$dc/dn$  – швидкість зростання надрізу;

$f(\lambda)$  – повільно змінювальна функція деформацій, приблизно дорівнює 2;

$W$  – енергія деформації на одиницю об'єму зразка за один цикл.

Повна робота на одиницю об'єму дорівнює

$$W = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot t^2 \cdot E_{\text{пруж}}}{2} + \dot{\varepsilon}^2 \int_{-\infty}^{+\infty} H_L \cdot \tau \cdot [t - \tau(1 - e^{-t/\tau})] d \ln \tau, \quad (26)$$

причому накопичена енергія є сумою незалежної і залежної від часу складової:

$$W_s = W_{\text{пруж}} + W(t) = \frac{\dot{\varepsilon} \cdot t^2 \cdot E_{\text{пруж}}}{2} + \frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} H_L \cdot \tau^2 \cdot (1 - e^{-t/\tau})^2 d \ln \tau. \quad (27)$$

Повна розсіяна енергія при циклічному навантаженні дорівнює

$$Wd = \left( \frac{\dot{\varepsilon}^2}{2} \right) \cdot \int_{t_1}^{t_b} H_L \cdot \tau / t \cdot d \cdot \ln \tau, \quad (28)$$

де  $H_L$  – релаксаційний спектр при розтягненні;



$t$  – повний час, що плинув;

$\tau$  – повний час релаксації до руйнування.

Значення кількості циклів до руйнування від розсіяної енергії  $W_d$  за цикл навантаження для натурального каучуку приведено в табл. 15

**Таблиця 15** – Значення кількості циклів до руйнування від розсіяної енергії  $W_d$  за цикл навантаження для натурального каучуку

$W, \text{ кг}\cdot\text{см}/\text{см}^3$	2	5	10	20	50	100
$N$	$10^6$	$0,2\cdot 10^6$	$0,8\cdot 10^5$	$10^4$	$10^3$	$10^2$

Повна енергія руйнування ( $E_p$ ) полімеру за  $N$  циклів дорівнює

$$E_p = \sum_{i=1}^N \int_0^{V_0} W_{d_i} \cdot dV . \quad (29)$$

### Висновки

1. Виконана класифікація поверхонь будівель і споруд за комбінаціями впливів зовнішнього середовища.
2. Визначені критичні значення механічних характеристик матеріалів ущільнювачів деформаційних швів будівель і споруд за класифікацією поверхонь та їх проектним ресурсом.
3. Запропоновано методику попередньої оцінки довговічності матеріалів ущільнювачів і методика оцінки значення параметрів матеріалів, що змінюються в часі.

### Література

1. СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии. Государственный комитет СССР по делам строительства, Москва, 1986. – 46 с.
2. Баглай А.П., Карапузов Е.К., Омельченко А.А. Герметизация стыков сборных зданий и сооружений. Справочник. К.: Будівельник, 1989. – 144 с.
3. Бойко В.В., Маплянян Р.Л. Гидроизоляция подземных сооружений полимерными материалами. – К.: Будівельник, 1989. – 144 с.
4. Попченко С.Н. Справочник по гидроизоляции сооружений. – Л.: Стройиздат, 1975.
5. Разрушение. Под редакцией Г. Либовица, том 7. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Част II. Органические материалы. «Мир», М.: 1976. – 470 с.
6. Агаджанов В.И. Экономика повышения долговечности и коррозионной стойкости строительных конструкций. Стройиздат, 1976.
7. Сулейманов З.Г. Полимерные материалы в борьбе с коррозией. Азгосиздат, Баку, 1975.
8. Хасин Б.Ф. Полимерные герметики в гидротехническом строительстве, Энергия, 1976.
9. Шевелев Н.Ф. Деформационные швы гидросооружений, Энергия, 1970.
10. Покровский В.М. Исследование долговечности, структурно-механических и защитных свойств битума, стабилизированного материалами органического и кремний-органического происхождения, ДИСИ, Днепропетровск, 1972.