

УДК 678.182

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ КИНЕТИКИ СЖАТИЯ
ОБЪЕМНОГО НЕСВЯЗНОГО УТЕПЛИТЕЛЯ**

И.Ю. БРИНК, С.Н. СЕРГЕЕНКО, А.С. РУКАВИШНИКОВА

(Ростовский институт сервиса Южно-Российского государственного
университета экономики и сервиса)

Исследования проводили в специально разработанном устройстве, обеспечивающем одноосное сжатие. В качестве исследуемого материала использовали гусиный пух (пух – 96%, мелкое перо – 4%) [1].

Нагружение осуществляли заданными усилиями (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 10; 20; 25Н).

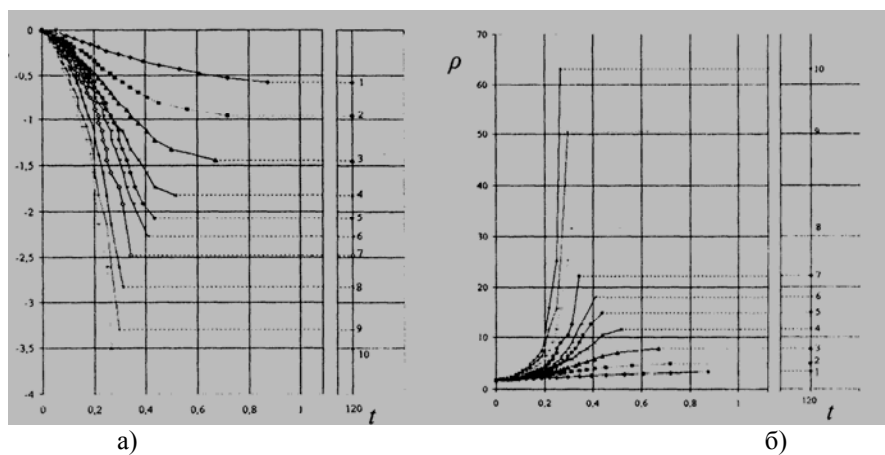


Рис. 1

Результаты исследования влияния времени нагружения, t на объемную деформацию ε_v и плотность ρ представлены на рис. 1-а, б – экспериментальные зависимости объемной деформации ε_v (а) и плотности ρ (б) от времени t при различных значениях $\sigma_{сж}$, Па; кривая 1 – 41, 2 – 83, 3 – 124, 4 – 165, 5 – 248, 6 – 330, 7 – 413, 8 –

826, 9 – 1652, 10 – 2064.

Анализ зависимостей $\varepsilon_v(t, \sigma_{сж})$ и $\rho(t, \sigma_{сж})$ (рис. 1) показал, что существует предельное состояние образца, характеризующееся предельным значением времени $t_{пред}$, объемной деформации $\varepsilon_{vпред}$, плотности $\rho_{пред}$ для различных $\sigma_{сж}$ (табл. 1).

Таблица 1

Давление $\sigma_{сж}$, Па	Время предельное $t_{пред}$	Объемная деформация $\varepsilon_{v пред}$ (предельная)	Плотность $\rho_{пред}$ (предельная)
-41	0,875	-0,582	3,323
-83	0,719	-0,961	4,856
-124	0,671	-1,447	7,891
-165	0,516	-1,822	11,478
-248	0,436	-2,140	15,783
-330	0,407	-2,428	21,044
-413	0,343	-2,428	21,044
-826	0,312	-2,833	31,566
-1652	0,297	-3,526	63,131
-2064	0,265	-3,526	63,131

Увеличение нагрузки снижает предельные значения времени объемной деформации и увеличивает $\rho_{\text{пред}}$. Предельные нелинейные зависимости могут быть описаны сигмоидальным $t_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$, $\varepsilon_{\text{впред}}(\sigma_{\text{сж}})$, $\rho_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$ уравнением:

$$\varepsilon_{\text{впред}}, \rho_{\text{пред}}, t_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}}) = a + \frac{b}{1 + \exp\left(\frac{-(\sigma_{\text{сж}} - c)}{d}\right)}. \quad (1)$$

Значения параметров уравнений (1) $\varepsilon_{\text{впред}}(\sigma_{\text{сж}})$, $\rho_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$ и $t_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$ представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимость	a	b	c	d	Коэффициент корреляции r^2
$\varepsilon_{\text{впред}}(\sigma_{\text{сж}})$	-3,38	34,29	665,49	285,258	0,96
$\rho_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$	-217,22	302,24	1187,61	-1214,514	0,98
$t_{\text{пред}}(\sigma_{\text{сж}})$	0,29	11,04	-394,9	-150,46	0,99

Нелинейные зависимости $\varepsilon_v(t)$ (рис. 1) при $\sigma_{\text{сж}} = \text{const}$ могут быть описаны логистическим уравнением:

$$\varepsilon_v = a + \frac{b}{1 + \left(\frac{t}{c}\right)^d}. \quad (2)$$

При этом параметры логистического уравнения a, b, c, d зависят от сжимающего напряжения $\sigma_{\text{сж}}$ (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Давление $\sigma_{\text{сж}}$, Па	a	b	c	d	Коэффициент корреляции, r^2
-41	-0,587	0,580	0,312	2,198	0,99
-83	-0,968	0,948	0,258	2,502	
-124	-1,458	1,424	0,268	2,661	
-165	-1,837	1,784	0,253	2,989	
-248	-2,095	2,005	0,271	3,963	
-330	-2,287	2,201	0,259	3,328	
-413	-2,492	2,378	0,238	3,814	
-826	-2,851	2,744	0,214	3,941	
-1652	-3,545	3,413	0,216	3,700	0,98
-2064	-3,546	3,395	0,198	3,873	

Значения "a" равны предельной деформации ($\varepsilon_{\text{впред}}$) для всех исследованных значений $\sigma_{\text{сж}}$; "b" – представляют собой разницу мгновенной и предельной деформаций ($\Delta\varepsilon_v = \varepsilon_{\text{вмгн}} - \varepsilon_{\text{впред}}$); "c" характеризует время перехода кривой ε_v от выпуклой к вогнутой его части (t_n); "d" определяет степень кривизны.

Тогда зависимость $\varepsilon_v(t)$ можно представить в виде:

$$\varepsilon_v = \varepsilon_{\text{впред}} + \frac{\Delta\varepsilon_v}{1 + \left(\frac{t}{t_n}\right)^d}. \quad (3)$$

Значения a, b, c, d определяются сжимающим напряжением и в исследуемом диапазоне t представляют собой нелинейные зависимости, которые могут быть описаны сигмоидальным уравнением:

$$a, b, c, d(\sigma_{\text{сж}}) = f + \frac{g}{1 + \exp\left(\frac{-(\sigma_{\text{сж}} - k)}{i}\right)}, \quad (4)$$

где f, g, k, i – коэффициенты уравнений, представленные в табл. 4.

Зависимость	Значения коэффициентов				Коэффициент корреляции r^2
	f	g	k	i	
$a(\sigma_{сж})$	-3,423	32,875	703,663	307,282	0,97
$b(\sigma_{сж})$	-63,409	66,709	1008,321	-325,471	
$c(\sigma_{сж})$	0,205	2,008	1305,782	428,793	0,82
$d(\sigma_{сж})$	2,303	1,471	-161,658	-27,780	0,91

Тогда с учетом полученных данных логистическую зависимость $\varepsilon_v(t)$ можно записать в виде:

$$\varepsilon_v(\sigma_{сж}, t) = a(\sigma_{сж}) + \frac{b(\sigma_{сж})}{1 + \left(\frac{t}{c(\sigma_{сж})}\right)^{d(\sigma_{сж})}}, \quad (5)$$

где

$$a(P) = -3,4 + \frac{32,9}{1 + \exp\left(\frac{-(P - 703,7)}{307,3}\right)};$$

$$b(P) = -63,4 + \frac{66,7}{1 + \exp\left(\frac{-(P - 1008,3)}{-325,5}\right)};$$

$$c(P) = 0,2 + \frac{2,0}{1 + \exp\left(\frac{-(\sigma_{сж} - 1305,8)}{428,8}\right)};$$

$$d(P) = 2,3 + \frac{1,5}{1 + \exp\left(\frac{-(\sigma_{сж} + 161,7)}{-27,8}\right)}.$$

Используя полученную зависимость (5), построили 3D модель зависимости

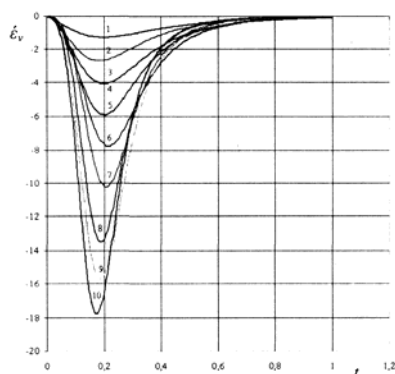


Рис. 3

Зависимости $\dot{\varepsilon}_v(t)$ (рис. 3) носят экстре-

$\varepsilon_v(\sigma_{сж}, t)$ в среде "Statistica" (рис. 2).

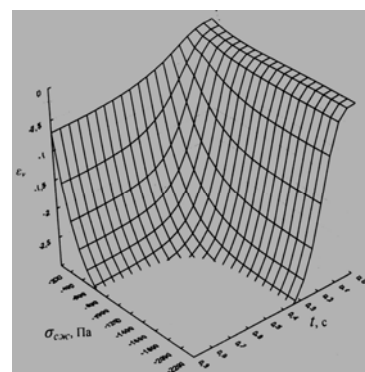


Рис. 2

Дифференцируя (2), получили зависимости $\dot{\varepsilon}_v(t)$ при фиксированных значениях $\sigma_{сж}, Pa$ (рис. 3: кривая 1 – 41, 2 – 83, 3 – 124, 4 – 165, 5 – 248, 6 – 330, 7 – 413, 8 – 826, 9 – 1652, 10 – 2064).

$$\dot{\varepsilon}_v = \frac{\varepsilon_v}{dt} = \frac{-b}{\left(1 + \left(\frac{t}{c}\right)^d\right)^2} \left(\frac{t}{c}\right)^d \frac{d}{t}. \quad (6)$$

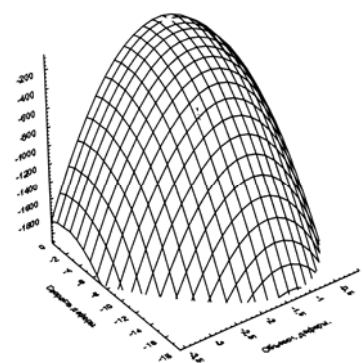


Рис. 4

мальный характер. Минимальные значения

$\dot{\varepsilon}_v(t)$ наблюдаются при критическом времени $t_{кр}=0,17-0,22$. Повышение давления приводит к увеличению абсолютного значения скорости деформации. С увеличением времени $t > t_{кр}$ значения функции $|\dot{\varepsilon}_v(t)|$ уменьшаются и стремятся к 0.

Зависимость $\sigma_{сж}(\dot{\varepsilon}_v, \varepsilon_v)$ можно представить в виде квадратичной 3D модели (рис. 4):

$$\sigma = a_0 + a_1 \varepsilon_v + a_2 \dot{\varepsilon}_v +$$

$$+ a_{11} \dot{\varepsilon}_v^2 + a_{12} \varepsilon_v \dot{\varepsilon}_v + a_{22} \dot{\varepsilon}_v^2. \quad (7)$$

Влияние ε_v на $\sigma_{сж}$ носит экстремальный характер. Максимальные значения $\sigma_{сж}$ наблюдаются при $\varepsilon_{v \text{ пред}} = -1,4$ (рис. 4).

Параметры уравнения уплотнения при $\varepsilon_v > \varepsilon_{v \text{ пред}}$, $\varepsilon_v < \varepsilon_{v \text{ пред}}$ и для всего исследуемого диапазона значений представлены в табл. 5.

Таблица 5

Исследуемый диапазон	a_0	a_1	a_2	a_{11}	a_{12}	a_{22}
$\varepsilon_v > \varepsilon_{v \text{ пред}}$	-746,55	-1504,86	47,51	-914,88	118,48	-11,65
$\varepsilon_v < \varepsilon_{v \text{ пред}}$	-597,78	-267,53	-208,56	-23,65	-103,33	-9,04
$\varepsilon_v = 0 \dots -3,6$	-739,99	-1085,35	-3,51	-385,59	-2,62	-7,37

В табл. 6 представлены расчетные значения коэффициента кажущейся объемной вязкости η_v^* и времени t при различных $\sigma_{сж}$.

Анализ полученных зависимостей $\eta_v^*(t)$ показывает, что на начальном этапе сжатия наблюдается резкое снижение η_v^* . Это объясняется особенностями деформационных свойств материала – при сжатии пушинки деформируются и переплетаются друг с другом, выдавливая воздух из перо-пуховой смеси. При дальнейшем увеличении времени t коэффициент кажущейся объемной вязкости η_v^* возрастает за счет повышения плотности ρ несвязного объемного утеплителя.

Зависимость влияния времени нагружения и деформации материала утеплителя на напряжение σ можно описать уравнениями изохронных кривых в виде [2]:

$$\sigma = \frac{\varphi(\varepsilon)}{1 + at^\beta}, \quad (8)$$

где $\varphi(\varepsilon)$ – кривая мгновенного деформирования.

Для описания зависимости $\sigma_{сж}(\varepsilon_v, t)$ для несвязного объемного утеплителя уравнение (8) представим в виде:

$$\sigma_{сж} = \frac{\varphi(\varepsilon_v)}{\psi(t)}, \quad (9)$$

где $\varphi(\varepsilon_v)$ – кривая мгновенного уплотнения; $\psi(t)$ – зависимость, учитывающая время $\psi(t) = 1 + \varepsilon_v(t)$.

Используя (2), строили графическую зависимость $\sigma(\varepsilon_v) = \varphi(\varepsilon_v)$ при $t=0$:

$$\begin{aligned} \varphi(\varepsilon_v) &= a_1 + b_1 \left(\frac{\varepsilon_v - c_1}{d_1} \right) \left(\left| \frac{\varepsilon_v - c_1}{d_1} \right| \right)^{-c_1} = \\ &= -125321 + 78898 \cdot \left(\frac{\varepsilon_v - 0,12}{0,02} \right) \left(\left| \frac{\varepsilon_v - 0,12}{0,02} \right| \right)^{-0,76}. \end{aligned} \quad (10)$$

Из уравнения (9) определим зависимости $\psi(t)$ и $\varepsilon_v(t)$:

$$\psi(t) = \frac{\varphi(\varepsilon_v)}{\sigma_{сж}}, \quad (11)$$

$$\varepsilon_v(t) = \psi(t) - 1 = \frac{\varphi(\varepsilon_v)}{\sigma_{сж}} - 1. \quad (12)$$

Таблица 6

41		83		124		165		248		330		413		826		1652		2064	
t	η	t	η	t	η	t	η	t	η	t	η	t	η	t	η	t	η	t	η
0	72,3	0	209,8	0	317,5	0	511,5	0	44814,8	0	7621,9	0	25889,5	0	133707,3	0	103598,2	0	150280,7
0,063	48,5	0,032	119,8	0,031	166,8	0,031	225,6	0,015	5217,1	0,016	1520,6	0,015	3359,7	0,01	15086,7	0,010	15951,4	0,010	20519,8
0,094	38,6	0,047	59,1	0,046	103,9	0,047	132,2	0,031	1522,6	0,032	624,4	0,031	3359,7	0,021	4802,7	0,021	5344,6	0,021	6408,9
0,125	34,1	0,079	48,0	0,062	73,3	0,062	132,2	0,047	672,7	0,047	624,4	0,031	1045,0	0,031	2114,7	0,031	2465,3	0,031	4067,0
0,156	32,5	0,094	40,6	0,078	57,1	0,062	86,2	0,062	343,6	0,047	319,3	0,047	483,0	0,041	1056,0	0,041	1357,3	0,036	2749,3
0,188	32,7	0,11	36,3	0,093	46,5	0,078	62,1	0,078	200,8	0,063	197,8	0,062	483,0	0,052	634,3	0,052	837,7	0,042	1950,6
0,219	34,1	0,125	31,6	0,109	39,8	0,094	48,8	0,094	132,6	0,078	132,1	0,062	257,3	0,062	413,5	0,062	675,1	0,047	1464,2
0,25	38,3	0,157	30,8	0,125	39,8	0,109	48,8	0,109	91,7	0,094	132,1	0,078	257,3	0,072	277,8	0,067	554,3	0,052	1130,2
0,297	44,8	0,172	30,7	0,125	35,8	0,109	40,0	0,125	91,7	0,094	95,9	0,078	161,1	0,083	204,1	0,073	462,6	0,057	893,1
0,344	53,5	0,188	31,1	0,14	33,0	0,125	34,5	0,125	67,8	0,11	75,4	0,093	107,7	0,093	177,9	0,078	395,8	0,062	710,4
0,391	68,6	0,204	32,0	0,156	31,4	0,141	34,5	0,141	53,7	0,125	75,4	0,109	107,7	0,098	152,8	0,083	342,6	0,067	576,6
0,453	94,4	0,219	33,3	0,171	30,5	0,141	31,3	0,156	44,2	0,125	61,6	0,109	78,2	0,104	136,1	0,088	299,8	0,073	476,5
0,531	128,9	0,235	37,3	0,187	30,4	0,156	29,2	0,172	38,4	0,141	52,9	0,125	61,8	0,109	113,0	0,093	262,9	0,078	344,3
0,609	194,8	0,266	40,0	0,203	30,7	0,172	29,2	0,187	38,4	0,157	52,9	0,14	61,8	0,118	94,9	0,098	233,1	0,088	261,9
0,719	330,7	0,282	46,4	0,218	31,6	0,172	28,2	0,187	34,6	0,157	47,7	0,14	51,2	0,128	83,4	0,104	208,7	0,099	208,6
0,875	482,9	0,313	54,7	0,234	33,0	0,187	27,9	0,203	34,6	0,172	44,5	0,156	45,0	0,137	77,6	0,109	173,2	0,109	188,6
-	-	0,344	64,8	0,25	34,7	0,203	28,4	0,203	32,5	0,188	42,9	0,172	45,0	0,143	72,2	0,119	148,6	0,114	172,3
-	-	0,375	77,6	0,265	36,9	0,219	29,4	0,219	31,8	0,203	42,9	0,172	41,8	0,15	68,7	0,130	131,4	0,120	159,1
-	-	0,407	101,0	0,281	39,4	0,234	29,4	0,234	32,0	0,203	42,6	0,187	40,5	0,156	65,6	0,14	124,8	0,125	148,9
-	-	0,454	181,0	0,296	46,1	0,234	31,0	0,25	32,0	0,219	43,5	0,203	40,5	0,163	63,4	0,145	119,4	0,130	140,6
-	-	0,563	379,1	0,328	49,9	0,25	33,1	0,25	33,3	0,235	43,5	0,203	40,8	0,17	62,0	0,151	115,0	0,135	133,8
-	-	0,719	1109,0	0,343	59,6	0,266	35,6	0,266	35,3	0,235	45,2	0,218	40,8	0,177	61,3	0,156	109,0	0,14	123,6
-	-	-	-	0,375	71,1	0,281	42,5	0,281	38,3	0,25	48,0	0,218	42,5	0,186	61,7	0,166	105,8	0,151	118,1
-	-	-	-	0,406	85,0	0,312	47,0	0,297	38,3	0,266	48,0	0,233	42,7	0,196	63,1	0,177	105,0	0,161	116,2
-	-	-	-	0,437	121,8	0,328	52,2	0,297	42,1	0,266	51,8	0,234	45,7	0,205	65,7	0,187	105,4	0,172	117,0
-	-	-	-	0,5	298,3	0,344	64,4	0,312	47,1	0,282	56,3	0,249	45,9	0,215	69,0	0,193	106,6	0,181	119,8
-	-	-	-	0,671	1154,4	0,375	79,8	0,328	53,3	0,297	62,2	0,25	50,3	0,224	73,7	0,199	108,3	0,189	124,3
-	-	-	-	-	-	0,406	98,9	0,344	60,2	0,313	67,3	0,265	64,3	0,234	79,6	0,205	115,1	0,198	129,0
-	-	-	-	-	-	0,437	168,2	0,359	79,4	0,325	80,3	0,297	64,3	0,244	87,6	0,220	125,4	0,205	134,8
-	-	-	-	-	-	0,516	1944,5	0,391	118,9	0,35	80,3	0,297	73,4	0,255	96,2	0,234	139,5	0,211	141,7
-	-	-	-	-	-	-	-	0,436	5576,5	0,35	123,3	0,312	98,1	0,265	113,1	0,249	159,5	0,218	162,3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,407	4129,4	0,343	10957,8	0,281	158,4	0,265	184,7	0,234	189,9
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,312	33405,8	0,281	215,9	0,249	225,3
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,297	38196,1	0,265	83459,6

С помощью (10) и (12) уравнение для $\varepsilon_v(t)$ запишем в виде

$$\varepsilon_v(t) = a_2 + b_2 \left(\frac{t - c_2}{d_2} \right) \left(\left| \frac{t - c_2}{d_2} \right| \right)^{-e_2}, \quad (13)$$

где a_2, b_2, c_2, d_2, e_2 – коэффициенты уравнения, зависящие от $\sigma_{сж}$ (табл. 7 – коэффициенты уравнения $\varepsilon_v(t)$).

Т а б л и ц а 7

Давление, Па	a_2	b_2	c_2	d_2	e_2	Коэффициент корреляции r^2
-41	30,138	27,176	0,155	0,079	0,804	0,99
-83	14,784	16,748	0,094	0,116	0,777	
-124	9,585	11,647	0,077	0,097	0,746	
-165	6,579	9,686	0,062	0,104	0,712	
-248	3,966	6,928	0,059	0,134	0,654	
-330	2,985	5,178	0,055	0,122	0,674	
-413	2,022	4,530	0,045	0,134	0,677	
-826	0,472	2,251	0,039	0,110	0,635	
-1652	-0,203	1,127	0,041	0,102	0,658	
-2064	-0,398	0,927	0,031	0,097	0,651	

С учетом (10) и (13) уравнение для описания ползучести объемного утеплителя представим в виде:

$$\sigma_{сж} = \frac{a_1 + b_1 \left(\frac{\varepsilon_v - c_1}{d_1} \right) \left(\left| \frac{\varepsilon_v - c_1}{d_1} \right| \right)^{-e_1}}{1 + \left[a_2 + b_2 \left(\frac{t - c_2}{d_2} \right) \left(\left| \frac{t - c_2}{d_2} \right| \right)^{-e_2} \right]}. \quad (14)$$

Заключительный этап анализа полученной модели предусматривает проверку ее адекватности. Уравнение (14) можно считать адекватным с 95%-ной вероятностью, учитывая что $F_p < F_{табл}$. Данное уравнение позволяет достоверно описать результаты экспериментальных исследований кинетики уплотнения несвязного объемного утеплителя.

ВЫВОДЫ

Установлена логистическая зависимость влияния давления и времени сжатия на величину объемной деформации. Построена нелинейная квадратичная реологическая модель влияния объемной деформации и скорости объемной деформации на давление сжатия.

Разработана методика определения и рассчитан коэффициент кажущейся объемной вязкости. Установлены экспериментальные зависимости влияния времени испытания на его значения для всех давлений сжатия. Выявлен двухэтапный характер уравнения. На первом этапе наблюдается снижение коэффициента кажущейся объемной вязкости за счет особенностей материала. Второй этап характеризуется повышением коэффициента связанным с повышением плотности.

Показана возможность описания процесса сжатия уравнения изохронных кривых и определены его параметры.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бринк И.Ю., Лебедева Е.О. Исследование воздействия ветра на пакеты теплозащитной одежды при ветровой нагрузке // Швейная промышленность. – 2005, №3. С.34...36.
2. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. Главн. ред. физ.-мат. лит.-ры, 1979.

Рекомендована кафедрой моделирования, конструирования и технологии швейных изделий. Поступила 30.05.07.