

УДК 624.04

## ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ ПРИЗМАТИЧЕСКИХ СТЕРЖНЕЙ ОТКРЫТОГО ПРОФИЛЯ С НАКЛОННЫМИ РЕБРАМИ ЖЕСТКОСТИ

И.А. ДАВЫДЕНКО

(Представлено: канд. техн. наук, доц. В.Н. КИСЕЛЕВ)

Рассматривается численный метод расчета тонкостенных призматических стержней открытого профиля с наклонными ребрами жесткости и без ребер на скручивающую нагрузку. Моделирование и расчет производится в программной системе конечно-элементного анализа ANSYS. Произведен анализ полученных данных и вычислены значения коэффициента крутильной жесткости стержней, подкрепленных противокрутильными связями по отношению к стержням не имеющих подкрепления.

Для исследования использовались балки из прокатного профиля 12Б1 по СТО АСЧМ 20-39 с пролетами в 600, 800, 900, 1000, 1200мм. Способ приложения нагрузки их значения, граничные условия, а также обоснование параметров рассматриваемых балок приняты на основании исследования [4–5] и запрограммированы в ANSYS (рис. 1).

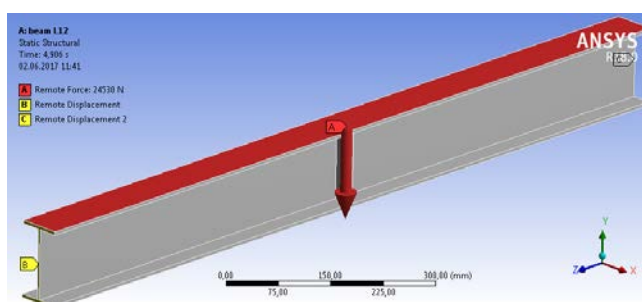


Рисунок 1. – Схема приложения нагрузки и граничных условий в ANSYS

Для описанных выше балок проведен численный расчет выполнен с использованием программной системой конечно-элементного анализа ANSYS решателем Static Structural с учетом геометрической и физической нелинейности.

Учет физической нелинейности был произведен при помощи задания реальных физико-механических свойств материала полученных в исследовании [6] на основании проведены там испытания плоских образцов на растяжение для определения предела текучести, модуля упругости и диаграммы работы материала испытываемых образцов, с последующим заданием этих параметров для испытываемых моделей через полилинейную диаграмму (рис. 2).

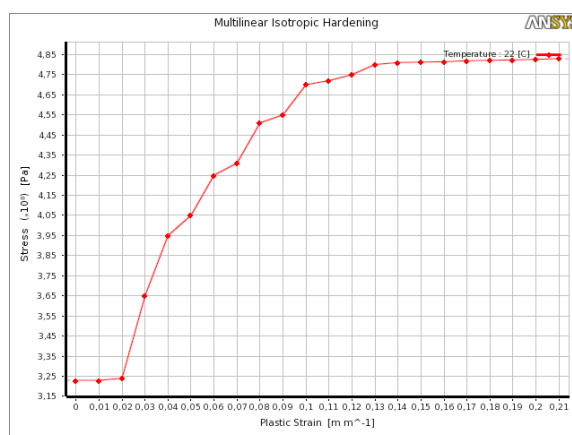


Рисунок 2. – Участок полилинейной диаграммы с пределом текучести

Стержень предварительно создавался в программе AutoCAD с последующим экспортированием в программную систему конечно-элементного анализа ANSYS.

Для расчета балки разбивались на систему конечных элементов типа тетраэдер, согласно рекомендациям для данного типа конструкции [7], с размером элемента 6,0 мм (рис. 3).

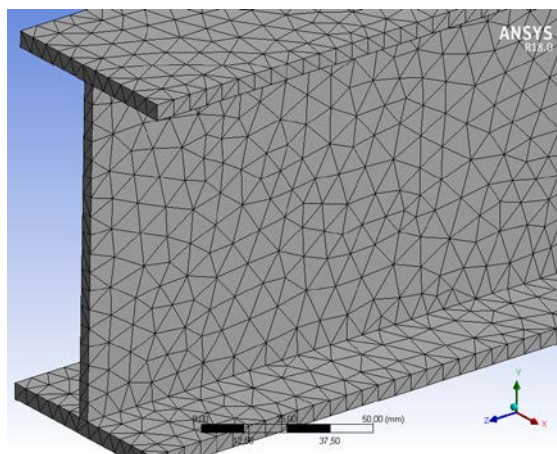


Рисунок 3. – Образец разбивочной сетки модели V12R

Далее проводилось моделирование граничных условий, нагружения и расчет балок, описанных в [1] а также балок с установленными ребрами жесткости (рис. 4,5). По полученным данным были определены углы закручивания балок при данном нагружении. Значения углов поворота и коэффициентов крутильной жесткости сведены в таблицы 1–6.

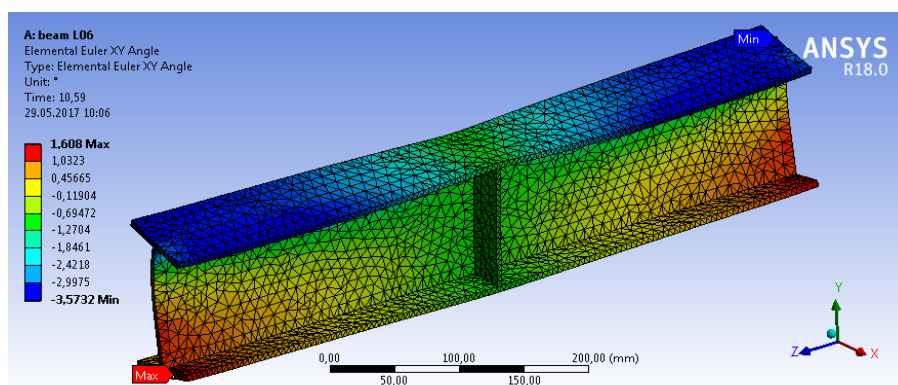


Рисунок 4. – Образец разбивки модели тонкостенного стержня V06

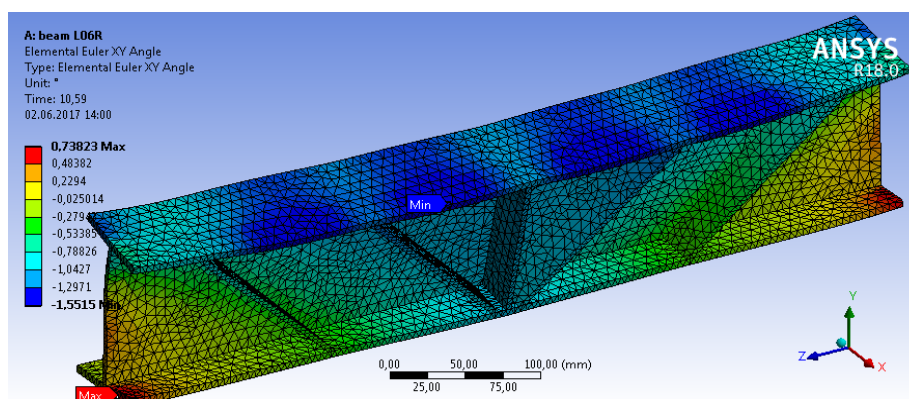


Рисунок 5. – Образец разбивки модели тонкостенного стержня V06R

Для удобства анализа значений изменения коэффициента крутильной жесткости в зависимости от величины нагрузки, а также размеров и формы расположения этих ребер – для шести образцов построена диаграмма изменения коэффициентов увеличения крутильной жесткости  $m$  от нагрузки, полученная на основании численного расчета и представленная на рисунке 6.

Таблица 1. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов B06 и B06R

Нагрузка, Н	B06 $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	B06R $\theta$ min(°)	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m=\theta_0/\theta_p$ ) B06 и B06R
1000	-0,05599	1000	-0,02825	0,2	1000,0	1,9822
2000	-0,11206	2000	-0,05653	0,4	2000,0	1,9822
2064,3	-0,11567	4133,35	-0,09902	1,0	5000	1,9827
2128,65	-0,11928	5000	-0,14159	1,2	6000	1,9828
2225,1	-0,12469	6000	-0,17001	1,4	7000	1,9829
2369,8	-0,13282	7000	-0,19847	1,7	8500	1,9831
2586,85	-0,14500	8500	-0,24122	2	10000	1,9833
2912,45	-0,16329	10000	-0,28405	2,2	11000	1,9835
3400,8	-0,19073	11000	-0,31265	2,4	12000	1,9836
4133,35	-0,23193	12000	-0,34128	2,7	13500	1,9838
5000	-0,28073	13500	-0,38429	3	15000	1,9840
6000	-0,33710	15000	-0,42739	3,2	16000	1,9842
7000	-0,39355	16000	-0,45616	3,4	17000	1,9843
8500	-0,47837	17000	-0,48497	3,7	18500	1,9844
10000	-0,56336	18500	-0,52826	4	20000	1,9847
11000	-0,62013	20000	-0,57162	4,2	21000	1,9847
12000	-0,67696	21000	-0,60060	4,4	22000	1,9848
13500	-0,76236	22000	-0,62957	4,7	23500	1,9851
15000	-0,84793	23500	-0,67312	5	25000	1,9852
16000	-0,90509	25000	-0,71675	5,2	26000	1,9853
17000	-0,96231	26000	-0,74593	5,4	27000	1,9855
18500	-1,04830	27000	-0,77507	5,7	28500	1,9857
20000	-1,13450	28500	-0,81889	6	30000	1,9860
21000	-1,19200	30000	-0,86281	6,2	31000	1,9864
22000	-1,24960	31000	-0,89218	6,4	32000	1,9873
23500	-1,33620	32000	-0,92149	6,7	33500	1,9889
25000	-1,42290	33500	-0,96561	7	35000	1,9913
26000	-1,48090	35000	-1,00980	7,2	36000	1,9929
27000	-1,53890	36000	-1,03940	7,4	37000	1,9950
28500	-1,62610	37000	-1,06890	7,7	38500	1,9987
30000	-1,71350	38500	-1,11340	8	40000	2,0049
31000	-1,77220	40000	-1,15790	8,2	41000	2,0108
32000	-1,83130	41000	-1,18770	8,4	42000	2,0192
33500	-1,92050	42000	-1,21750	8,7	43500	2,0349
35000	-2,01080	43500	-1,26240	9	45000	2,0572
36000	-2,07140	45000	-1,30750	9,2	46000	2,0756
37000	-2,13250	46000	-1,33760	9,4	47000	2,0980
38500	-2,22530	47000	-1,36790	9,7	48500	2,1372
40000	-2,32150	48500	-1,41360	10	50000	2,1840
41000	-2,38820	50000	-1,45960	10,118	50590	2,2050
42000	-2,45840	50590	-1,47770	10,236	51180	2,2280
43500	-2,56890	51180	-1,49600	10,413	52065	2,2640
45000	-2,68980	52065	-1,52360	10,59	52950	2,3031
46000	-2,77630	52950	-1,55150			
47000	-2,86990					
48500	-3,02110					
50000	-3,18770					
50590	-3,25830					
51180	-3,33310					
52065	-3,44940					
52950	-3,57320					

Таблица 2. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В07 и В07R

Нагрузка, Н	В07 $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	В07R $\theta$ min(°)	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m=\theta_0/\theta_p$ ) В07 и В07R
1000	-0,056289	1000	-0,037255	0,2	1000	
2000	-0,112700	2000	-0,074581	0,4	2000	1,51111
3500	-0,197530	3500	-0,130700	0,7	3500	1,51132
5000	-0,282640	5000	-0,186980	1	5000	1,51161
6000	-0,339530	6000	-0,224590	1,2	6000	1,51178
7000	-0,396540	7000	-0,262280	1,4	7000	1,51190
8500	-0,482280	8500	-0,318930	1,7	8500	1,51218
10000	-0,568290	10000	-0,375760	2	10000	1,51237
11000	-0,625800	11000	-0,413730	2,2	11000	1,51258
12000	-0,683420	12000	-0,451770	2,4	12000	1,51276
13500	-0,770080	13500	-0,508980	2,7	13500	1,51299
15000	-0,857020	15000	-0,566350	3	15000	1,51323
16000	-0,915140	16000	-0,604690	3,2	16000	1,51340
17000	-0,973380	17000	-0,643100	3,4	17000	1,51357
18500	-1,061000	18500	-0,700870	3,7	18500	1,51383
20000	-1,148900	20000	-0,758800	4	20000	1,51410
21000	-1,207600	21000	-0,797520	4,2	21000	1,51419
22000	-1,266500	22000	-0,836310	4,4	22000	1,51439
23500	-1,355000	23500	-0,894640	4,7	23500	1,51458
25000	-1,443900	25000	-0,953140	5	25000	1,51489
26000	-1,503300	26000	-0,992240	5,2	26000	1,51506
27000	-1,562800	27000	-1,031400	5,4	27000	1,51522
28500	-1,652400	28500	-1,090300	5,7	28500	1,51555
30000	-1,742200	30000	-1,149400	6	30000	1,51575
31000	-1,802400	31000	-1,188900	6,2	31000	1,51602
32000	-1,862700	32000	-1,228500	6,4	32000	1,51624
33500	-1,953600	33500	-1,288000	6,7	33500	1,51677
35000	-2,045000	35000	-1,347700	7	35000	1,51740
36000	-2,106300	36000	-1,387600	7,2	36000	1,51794
37000	-2,167900	37000	-1,427700	7,4	37000	1,51846
38500	-2,260700	38500	-1,488000	7,7	38500	1,51929
40000	-2,354300	40000	-1,548700	8	40000	1,52018
40968	-2,415300	40968	-1,588200	8,1936	40968	1,52078
41936	-2,476800	41936	-1,627900	8,3872	41936	1,52147
43388	-2,570200	43388	-1,687800	8,6776	43388	1,52281
44840	-2,665600	44840	-1,748200	8,968	44840	1,52477

Таблица 3. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В08 и В08R

Нагрузка, Н	В08 $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	В08R $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m=\theta_0/\theta_p$ ) В08 и В08R
1000	-0,06090	1000	-0,04730	1000	0,2	1,287677605
2000	-0,12196	2000	-0,09472	2000	0,4	1,287625242
3500	-0,21386	3500	-0,16608	3500	0,7	1,287692678
5000	-0,30611	5000	-0,23772	5000	1	1,287691402
6000	-0,36784	6000	-0,28565	6000	1,2	1,287729739
7000	-0,42971	7000	-0,33370	7000	1,4	1,287713515
8500	-0,52283	8500	-0,40602	8500	1,7	1,287695187
10000	-0,61632	10000	-0,47862	10000	2	1,287702144
11000	-0,67888	11000	-0,52719	11000	2,2	1,287733075
12000	-0,74158	12000	-0,57589	12000	2,4	1,287711195
13500	-0,83596	13500	-0,64918	13500	2,7	1,287716812

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7
15000	-0,93072	15000	-0,72276	15000	3	1,287730367
16000	-0,99413	16000	-0,77200	16000	3,2	1,287733161
17000	-1,05770	17000	-0,82135	17000	3,4	1,287757959
18500	-1,15330	18500	-0,89564	18500	3,7	1,287682551
20000	-1,24940	20000	-0,97024	20000	4	1,287722625
21000	-1,31370	21000	-1,02020	21000	4,2	1,287688688
22000	-1,37810	22000	-1,07020	22000	4,4	1,287703233
23500	-1,47510	23500	-1,14550	23500	4,7	1,287734614
25000	-1,57250	25000	-1,22110	25000	5	1,287773319
26000	-1,63770	26000	-1,27180	26000	5,2	1,287702469
27000	-1,70300	27000	-1,32250	27000	5,4	1,287712665
28500	-1,80140	28500	-1,39890	28500	5,7	1,28772607
30000	-1,90010	30000	-1,47560	30000	6	1,287679588
31000	-1,96620	31000	-1,52690	31000	6,2	1,287707119
32000	-2,03260	32000	-1,57840	32000	6,4	1,287759757
33500	-2,13260	33500	-1,65590	33500	6,7	1,287879703
35000	-2,23320	35000	-1,73370	35000	7	1,28811213
35782	-2,28590	35782	-1,77450	35782	7,1564	1,288193857
36564	-2,33880	36564	-1,81550	36564	7,3128	1,288240154
37737	-2,41860	37737	-1,87720	37737	7,5474	1,288408268
38910	-2,49880	38910	-1,93940	38910	7,782	1,288439724

Таблица 4. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В09 и В09R

Нагрузка, Н	В09 $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	В09R $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m = \theta_0/\theta_p$ ) В09 и В09R
1000	-0,06875	1000	-0,05839	1000	0,2	1,17747902
2000	-0,13774	2000	-0,11698	2000	0,4	1,177466234
3500	-0,24162	3500	-0,20523	3500	0,7	1,177313258
5000	-0,34603	5000	-0,29394	5000	1	1,177213037
6000	-0,41596	6000	-0,35336	6000	1,2	1,177156441
7000	-0,48609	7000	-0,41295	7000	1,4	1,177115874
8500	-0,59171	8500	-0,50273	8500	1,7	1,176993615
10000	-0,69788	10000	-0,59298	10000	2	1,1769031
11000	-0,76899	11000	-0,65344	11000	2,2	1,176833374
12000	-0,84031	12000	-0,71408	12000	2,4	1,176772911
13500	-0,94774	13500	-0,80544	13500	2,7	1,176673619
15000	-1,05570	15000	-0,89729	15000	3	1,176542701
16000	-1,12810	16000	-0,95883	16000	3,2	1,176538072
17000	-1,20060	17000	-1,02060	17000	3,4	1,176366843
18500	-1,30990	18500	-1,11350	18500	3,7	1,176380781
20000	-1,41980	20000	-1,20710	20000	4	1,176207439
21000	-1,49340	21000	-1,26970	21000	4,2	1,17618335
22000	-1,56720	22000	-1,33260	22000	4,4	1,176046826
23500	-1,67840	23500	-1,42720	23500	4,7	1,176008969
25000	-1,79020	25000	-1,52250	25000	5	1,175829228
26000	-1,86520	26000	-1,58630	26000	5,2	1,175817941
27000	-1,94030	27000	-1,65030	27000	5,4	1,175725626
28500	-2,05350	28500	-1,74670	28500	5,7	1,175645503
30000	-2,16740	30000	-1,84370	30000	6	1,175570863
30812	-2,22940	30812	-1,89650	30812	6,1624	1,175533878
31624	-2,29160	31624	-1,94940	31624	6,3248	1,175541192
32842	-2,38540	32842	-2,02910	32842	6,5684	1,175595091
34060	-2,47970	34060	-2,10920	34060	6,812	1,175659018

Таблица 5. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В10 и В10R

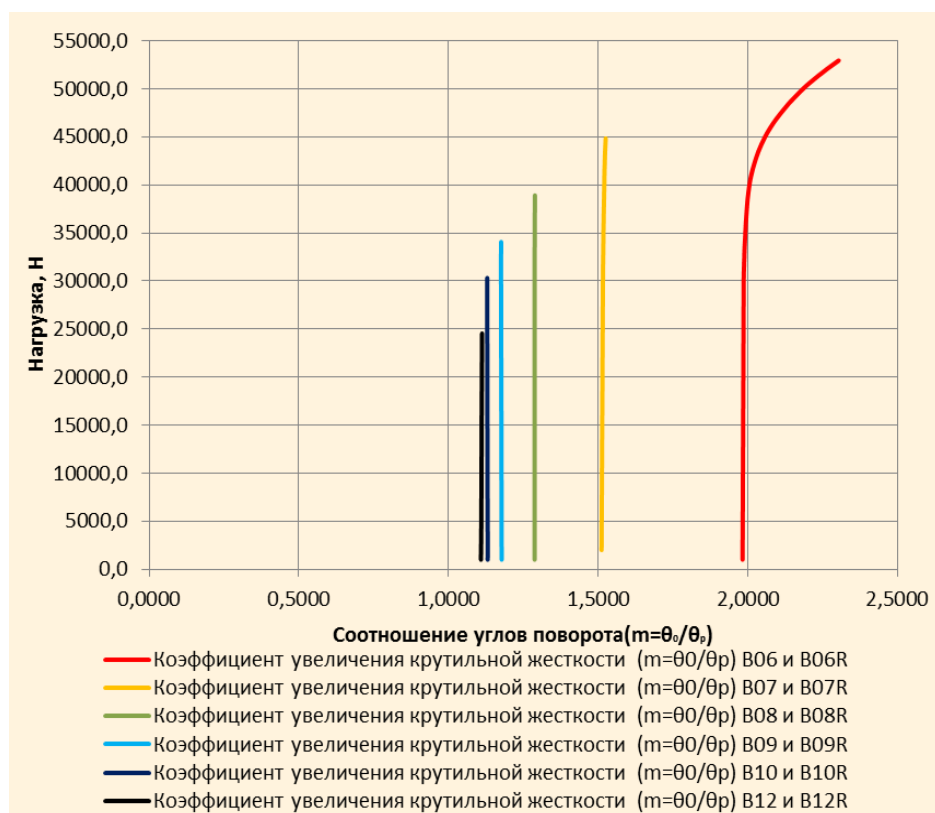
Нагрузка, Н	В10 $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	В10R $\theta$ min(°)	Нагрузка, Н	Время, с	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m=\theta_0/\theta_p$ ) В10 и В10R
1000	-0,07901	1000	-0,06987	1000,0	0,2	1,130749635
1500	-0,11867	2000	-0,14006	2000,0	0,4	1,130872483
1750	-0,13852	3500	-0,24585	5000,0	1,0	1,130761807
1875	-0,14845	5000	-0,35232	6000	1,2	1,130504555
2000	-0,15839	6000	-0,42374	7000	1,4	1,130434783
2187,5	-0,17330	7000	-0,49542	8500	1,7	1,130327434
2468,75	-0,19569	8500	-0,60348	10000	2	1,130236999
2679,7	-0,21250	10000	-0,71224	11000	2,2	1,130191154
2890,65	-0,22933	11000	-0,78523	12000	2,4	1,130126854
3207,05	-0,25460	12000	-0,85847	13500	2,7	1,130056044
3681,65	-0,29256	13500	-0,96889	15000	3	1,12989538
4393,55	-0,34964	15000	-1,08010	16000	3,2	1,129903871
5000	-0,39839	16000	-1,15470	17000	3,4	1,129890199
6000	-0,47904	17000	-1,22950	18500	3,7	1,12976758
7000	-0,56004	18500	-1,34240	20000	4	1,129661424
8500	-0,68213	20000	-1,45610	21000	4,2	1,12959217
10000	-0,80500	21000	-1,53250	22000	4,4	1,129583592
11000	-0,88746	22000	-1,60900	23500	4,7	1,129486808
12000	-0,97018	23500	-1,72450	25000	5	1,129400261
13500	-1,09490	25000	-1,84080	26000	5,2	1,129286087
15000	-1,22040	26000	-1,91900	27000	5,4	1,129274521
16000	-1,30470	27000	-1,99730	28500	5,7	1,129189317
17000	-1,38920	28500	-2,11550	30000	6	1,129111658
18500	-1,51660	30000	-2,23450	30062	6,0124	1,129124436
20000	-1,64490	30062	-2,23970	30124	6,0248	1,129160169
21000	-1,73110	30124	-2,24450	30217	6,0434	1,129085258
22000	-1,81750	30217	-2,25200	30310	6,062	1,129105072
23500	-1,94780	30310	-2,25940			
25000	-2,07900					
26000	-2,16710					
27000	-2,25550					
28500	-2,38880					
30000	-2,52300					
30062	-2,52890					
30124	-2,53440					
30217	-2,54270					
30310	-2,55110					

Таблица 6. – Значения углов поворота и коэффициента  $m$  для образцов В12 и В12R

Нагрузка, Н	В12 $\theta$ min (°)	Нагрузка, Н	В12R $\theta$ min (°)	Время, с	Нагрузка, Н	Коэффициент увеличения крутильной жесткости ( $m=\theta_0/\theta_p$ ) В12 и В12R
1000	-0,10723	1000	-0,09675	0,2	1000	1,108274593
1061,25	-0,11417	1042,9	-0,10113	0,20858	5000	1,109459432
1122,5	-0,12078	1085,75	-0,10530	0,21715	6000	1,1095707
1214,4	-0,13070	1150,05	-0,11156	0,23001	7000	1,109773935
1352,2	-0,14559	1246,55	-0,12095	0,24931	8500	1,109926257
1558,9	-0,16795	1391,25	-0,13505	0,27825	10000	1,110050251
1869	-0,20154	1608,3	-0,15621	0,32166	11000	1,110190329
2334,1	-0,25204	1933,85	-0,18801	0,38677	12000	1,110334498
3031,8	-0,32803	1954,8	-0,19006	0,39096	13500	1,110603829
4078,3	-0,44257	1975,75	-0,19211	0,39515	15000	1,110641948

Окончание таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7
5000	-0,54409	2007,15	-0,19518	0,40143	16000	1,11077549
6000	-0,65468	2054,25	-0,19979	0,41085	17000	1,111040426
7000	-0,76631	2124,95	-0,20670	0,42499	18500	1,111193398
8500	-0,93468	2230,95	-0,21708	0,44619	20000	1,111392528
10000	-1,10450	2389,95	-0,23266	0,47799	20906	1,111565258
11000	-1,21910	2628,45	-0,25605	0,52569	21812	1,11171771
12000	-1,33440	2986,2	-0,29120	0,59724	23171	1,111952407
13500	-1,50820	3522,85	-0,34406	0,70457	24530	1,112097973
15000	-1,68340	4327,85	-0,42365	0,86557		
16000	-1,80190	5000	-0,49041	1		
17000	-1,92110	6000	-0,59003	1,2		
18500	-2,10060	7000	-0,69051	1,4		
20000	-2,28180	8500	-0,84211	1,7		
20906	-2,39320	10000	-0,99500	2		
21812	-2,50470	11000	-1,09810	2,2		
23171	-2,67280	12000	-1,20180	2,4		
24530	-2,84230	13500	-1,35800	2,7		
		15000	-1,51570	3		
		16000	-1,62220	3,2		
		17000	-1,72910	3,4		
		18500	-1,89040	3,7		
		20000	-2,05310	4		
		20906	-2,15300	4,1812		
		21812	-2,25300	4,3624		
		23171	-2,40370	4,6342		
		24530	-2,55580	4,906		

Рисунок 6. – Изменения значения коэффициента крутильной жесткости  $m$  с ростом нагрузки

**Выводы.** В результате проведенного исследования получены значения коэффициентов крутильной жесткости, а также выражения углов закручивания для стержней с противокрутильными связями при данном способе закрепления опоры, приложения нагрузок, а также вида противокрутильной связи.

В задаче произведен учет физической и геометрической нелинейности рассматриваемых тонкостенных призматических стержней.

Моделирование производится с использованием объемных призматических элементов.

В качестве конкретного примера используются данные экспериментальных исследований доктора технических наук Туснина А.Р. и Прокича М. Московского государственного строительного университета [6].

На основании полученных результатов было получено, что установка наклонных ребер жесткости увеличивает крутильную жесткость в диапазоне значений от 1,1 до 2.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-1. Общие правила и правила для зданий : ТКП EN 1993-1-1-2009\* (02250). – Минстройархитектура, 2014.
2. Власов, В.З. Тонкостенные упругие стержни / В.З. Власов. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Физматлит, 1959. – 568 с.
3. Киселев, В.Н. Влияние наклонных ребер жесткости на величину крутильной жесткости стержня / В.Н. Киселев, И.А. Давыденко // Вестник ПГУ. Прикладные науки. – 2016. – № 16.
4. Лалин, В.В. Исследование конечных элементов для расчета тонкостенных стержневых систем / В.В. Лалин, В.А. Рыбаков, С.А. Морозов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 1(27). – С. 53–73.
5. Li, Z. Modal identification for shell finite element models of thin-walled members in nonlinear collapse analysis / Z. Li, S. Adany, B.W. Schafer // Thin-Walled Structures. – 2013. – Vol. 67. – P. 15–24.
6. Туснин, А.Р. Экспериментальные исследования работы балок двутаврового сечения при действии изгиба и кручения / А.Р. Туснин, М. Прокич // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 1. – С. 24–31.
7. Бруяка, В.А. Инженерный анализ в ANSYS Workbench / В.А.Бруяка. – Самара : Самара гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.