



ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИЙ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ТОНКОЇ НЕЗАМКНУТОЇ ТОРОЇДАЛЬНОЇ ОБОЛОНКИ

О. І. Демидов

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури,
вул. Державіна, 2, м. Макіївка, 86123, Донецька область, Україна.*

Отримана 10 вересня 2006 р., прийнята 12 грудня 2006 р.

Анотація. Робота присвячена застосуванню раніше розробленої автором методики з визначення пружно-пластичного напружено-деформованого стану оболонок довільної форми на основі теорії малих пружно-пластичних деформацій. Розглядаються завдання в умовах простого навантаження оболонок. Лінеаризація завдань виконується методом пружних рішень. У кожному наближенні розглядаються завдання теорії тонких пружних оболонок методом кінцевих різниць на основі варіаційного рівняння Лагранжа в переміщеннях точок серединної поверхні. При записі варіаційного рівняння Лагранжа зв'язок між напруженнями і деформаціями представлений у формі закону Гука, але з додатковими членами, що враховують пластичні деформації. Геометричні рівняння прийняті в лінійній постановці у формі співвідношень Коші. Матеріал характеризується відповідною діаграмою розтягання циліндрового зразка, модулем нормальної пружності і коефіцієнтом Пуассона. Записані рівняння серединної поверхні тороїдальної оболонки в параметричній формі. Внутрішній і зовнішній краї оболонки абсолютно жорстко закладені, а бічні сторони закріплені шарнірно. Наводиться чисельний розрахунок тонкої незамкнутої пружно-пластичної тороїдальної оболонки постійної товщини при дії нормального рівномірно розподіленого навантаження в переміщеннях точок серединної поверхні. Використовується метод пружних рішень в поєднанні з варіаційно-різницевою методом в переміщеннях точок серединної поверхні оболонки. Рішення задачі доведено до чисельних результатів. Представлені поля інтенсивності дотичних напружень по товщині оболонки при пружно-пластичному рішенні задачі для всієї сіткової області для трьох значень рівномірно розподіленого навантаження. Встановлено значення навантаження, при якому виникають перші пластичні деформації. На рисунках наочно проілюстровано розвиток пластичних зон у міру зростання рівномірно розподіленого нормального навантаження. Робота присвячена актуальному питанню будівельної механіки оболонок при їх пружно-пластичній деформації в умовах простого навантаження оболонки.

Ключові слова: незамкнута тороїдальна оболонка, варіаційно-різницевий метод, граничні умови, метод пружних рішень, інтенсивність деформацій зсуву, інтенсивність дотичних напружень, функція пластичності.

УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКОЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОНКОЙ НЕЗАМКНУТОЙ ТОРОИДАЛЬНОЙ ОБОЛОЧКИ

А. И. Демидов

*Донбасская национальная академия строительства и архитектуры,
ул. Державина, 2, г. Макеевка, 86123, Донецкая область, Украина.*

Получена 10 сентября 2006, принята 12 декабря 2006.

Аннотация. Работа посвящена применению ранее разработанной автором методики по определению упруго-пластического напряженно-деформированного состояния оболочек произвольной формы на основе теории малых упруго-пластических деформаций. Рассматриваются задачи в условиях простого нагружения оболочек. Линеаризация задач выполняется методом упругих решений. В каждом приближении рассматриваются задачи теории тонких упругих оболочек методом конечных разностей на основе вариационного уравнения Лагранжа в перемещениях точек срединной поверхности. При

записи вариационного уравнения Лагранжа связь между напряжениями и деформациями представлена в форме закона Гука, но с дополнительными членами, учитывающими пластические деформации. Геометрические уравнения приняты в линейной постановке в форме соотношений Коши. Материал характеризуется соответствующей диаграммой растяжения цилиндрического образца, модулем нормальной упругости и коэффициентом Пуассона. Записаны уравнения срединной поверхности тороидальной оболочки в параметрической форме. Внутренний и наружный края оболочки абсолютно жестко заделаны, а боковые стороны закреплены шарнирно. Приводится численный расчет тонкой незамкнутой упруго-пластической тороидальной оболочки постоянной толщины при действии нормальной равномерно распределенной нагрузки в перемещениях точек срединной поверхности. Используется метод упругих решений в сочетании с вариационно-разностным методом в перемещениях точек срединной поверхности оболочки. Решение задачи доведено до численных результатов. Представлены поля интенсивности касательных напряжений по толщине оболочки при упруго-пластическом решении задачи для всей сеточной области для трех значений равномерно распределенной нагрузки. Установлено значение нагрузки, при которой возникают первые пластические деформации. На рисунках наглядно проиллюстрировано развитие пластических зон по мере роста равномерно распределенной нормальной нагрузки. Работа посвящена актуальному вопросу строительной механики оболочек при их упруго-пластическом деформировании в условиях простого нагружения оболочки.

Ключевые слова: незамкнутая тороидальная оболочка, вариационно-разностный метод, граничные условия, метод упругих решений, интенсивность деформаций сдвига, интенсивность касательных напряжений, функция пластичности.

AN ELASTIC-PLASTIC STRESSED-DEFORMED STATE OF A THIN UNCLOSED TOROIDAL SHELL

O.I. Demidov

*The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,
2, Derzhavina str., 86123 Makiyivka, the Donetsk Region, Ukraine.*

Received 10 September 2006; accepted 12 December 2006.

Abstract. The work is devoted to the application of the earlier developed methods of determining an elastic-plastic stressed-deformed state of arbitrary shape shells in terms of the theory of small elastic-plastic deformations. There are considered the problems under a simple shell loading. The problem linearization is done by the method of elastic solutions. In every approximation, there are considered the problems of the theory of thin elastic shells by the method of finite differences in terms of the Lagrange variational equation in the median surface points travel. When writing the Lagrange variational equation, the relation between stresses and deformations is given in the form of the Hooke's law but with additional terms considering plastic deformations. Geometrical equations are accepted in the linear formulation in the form of Cauchy's correlations. The material is characterized by a corresponding tension diagram of a cylindrical specimen, by the standard modulus of elasticity, and by the Poisson's ratio. The equations of a toroidal shell medium surface are written in a parametric form. The shell inner and outer edges are absolutely rigidly packed, and the sides are jointed. There is given a numerical design of a thin unclosed elastic-plastic toroidal shell of a constant thickness under the action of an equally distributed normal load in the median surface points travels. There is applied a method of elastic solutions together with the variational-differential method in the median surface points travels. The problem solution is brought to numerical results. There are presented the fields of intensity of tangential stress through the shell thickness at an elastic-plastic solution of the problem for the whole net domain for three values of an equally distributed load. There was determined the load value under which there appear the first plastic deformations. In the figures there is shown a development of plastic zones as an equally distributed standard load grows. The work is devoted to an urgent question of the shells structural mechanics at their elastic-plastic deformation in terms of a shell simple loading.

Keywords: an unclosed toroidal shell, the variational-differential method, boundary conditions, the method of elastic solutions, an intensity of a shift deformations, an intensity of tangential stresses, the function of plasticity.

В книге [3] разработана методика численного расчета тонких упруго-пластических оболочек произвольной формы постоянной толщины при простых процессах нагружения на основе метода упругих решений. Физические уравнения приняты в форме обобщенного закона Гука, но с дополнительными членами, учитывающие пластические деформации.

$$\begin{aligned}\sigma_{11}^z &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{11}^z + \mu \varepsilon_{22}^z + \varepsilon_{11}^{pz}), \\ \sigma_{22}^z &= \frac{E}{1-\mu^2} (\varepsilon_{22}^z + \mu \varepsilon_{11}^z + \varepsilon_{22}^{pz}),\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\sigma_{12}^z &= \frac{E}{2(1+\mu)} (\gamma^z - \gamma^{pz}), \\ \varepsilon_{33}^z &= \frac{\mu}{1-\mu} (\varepsilon_{11}^{pz} + \varepsilon_{22}^{pz}) + \frac{1-2\mu}{1-\mu} \varepsilon_{33}^{pz},\end{aligned}$$

где E — модуль упругости,
 μ — коэффициент Пуассона.

Дополнительные члены в уравнениях (1) имеют вид

$$\begin{aligned}\varepsilon_{11}^{pz} &= \omega (\mu \varepsilon_{33}^z - (1-\mu) \varepsilon_{11}^z), \\ \varepsilon_{22}^{pz} &= \omega (\mu \varepsilon_{33}^z - (1-\mu) \varepsilon_{22}^z), \\ \gamma^{pz} &= \omega \gamma^z, \\ \varepsilon_{33}^{pz} &= \omega \varepsilon_{33}^z.\end{aligned}\quad (2)$$

Основные деформации ε_{11}^z , ε_{22}^z , γ^z используем в виде линейных соотношений, связывающих с перемещениями u , v , w , точек срединной поверхности, принимаем в соответствии с книгой В. В. Новожилова [4].

Компоненты девиатора деформаций $\varepsilon_{ii}^z = \varepsilon_{ii}^z - \varepsilon_0^z$, ($i = 1, 2, 3$), а среднее напряжение

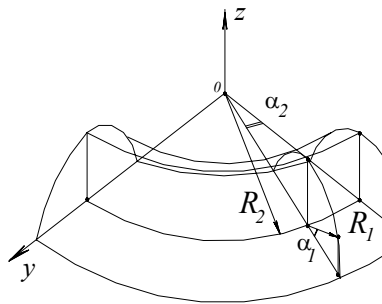


Рисунок 1. Геометрия тороидальной оболочки

$$\varepsilon_0^z = \frac{1}{3} (\varepsilon_{11}^z + \varepsilon_{22}^z + \varepsilon_{33}^z),$$

$$\varepsilon_{33}^z = - \frac{[3\mu + \omega(1-2\mu)](\varepsilon_{11}^z + \varepsilon_{22}^z)}{3(1-\mu) - 2\omega(1-2\mu)}, \quad (3)$$

Функция пластичности А. А. Ильюшина [1] представляет такое выражение:

$$\omega = 1 - \frac{G_s}{G}.$$

Секунный модуль G_s и модуль сдвига G находим по диаграмме растяжения цилиндрического образца из соотношений:

$$2G_s = S\Gamma^{-1}, \quad 2G = E(1+\mu)^{-1} \quad (4)$$

Интенсивность касательных напряжений S и деформаций сдвига Γ при плоском напряженном состоянии находим по формулам [3, 5]:

$$S^z = \sqrt{\frac{1}{3} [(\sigma_{11}^z)^2 + (\sigma_{22}^z)^2 - \sigma_{11}^z \cdot \sigma_{22}^z + 3(\sigma_{12}^z)^2]},$$

$$\Gamma^z = \sqrt{\frac{1}{6} [(\varepsilon_{11}^z - \varepsilon_{22}^z)^2 + (\varepsilon_{11}^z + \varepsilon_{22}^z)^2 + (\varepsilon_{11}^z - \varepsilon_{22}^z)^2 + 3(\gamma^z)^2]} \quad (5)$$

Рассмотрим круговую незамкнутую тороидальную оболочку постоянной толщины h , представленную на рис. 1. В параметрической форме срединная поверхность описывается уравнениями:

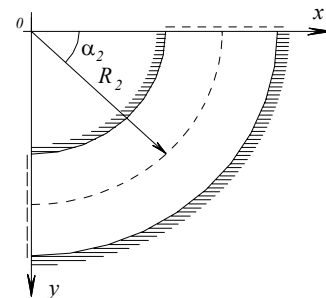
$$\begin{aligned}x &= (R_2 + R_1 \cos \alpha_1) \cos \alpha_2 \\ y &= (R_2 + R_1 \cos \alpha_1) \sin \alpha_2 \\ z &= R_1 \sin \alpha_1\end{aligned}\quad (6)$$

В формулах (6) приняты такие значения: $R_1 = 1,5$ м, $R_2 = 3,0$ м, $0 \leq \alpha_1 \leq \pi$, $0 \leq \alpha_2 \leq \pi/2$.

Края оболочки при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_1 = \pi$ абсолютно

жестко заделаны, т.е. $u=v=w = \frac{\partial w}{\partial \alpha_1} = 0$; при $\alpha_2 = 0$

и $\alpha_2 = \pi/2$ шарнирное закрепление, при котором перемещения $u=v=w=0$. Материал оболочки —



сталь 12ХГНМФ характеризуется диаграммой растяжения (рис. 1), модулем нормальной упругости $E=2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициентом Пуассона $\mu=0,3$. Диаграмма $S=f(\Gamma)$, представленная на рис. 3, получена из диаграммы растяжения $\sigma=f(\epsilon)$ на основе соотношений:

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{3}};$$

$$\Gamma = (1 + \mu) \frac{\epsilon}{\sqrt{3}}.$$

Нагружается оболочка нормальной равномерно распределенной нагрузкой q_{zz} , такой, что отдельные элементы её могут находиться в упруго-пластическом состоянии. Процесс сходимости решения упругопластической задачи задавался с точностью $\delta=5\%$.

Для расчета такой оболочки применим методику, представленную в работе [3], на основе вариационно-разностного метода в перемещениях. Задача решалась с учетом симметрии оболочки. Линия симметрии оболочки с нанесением сетки показана на рис. 3. Точность решения задачи достигалась путем удвоенного сгущения сеточной области на $1/2$ части оболочки. Сначала решалась задача пластичности при сетке 13×10 узлов, а затем 23×17 при нормальной нагрузке $q_{zz}=10$ МПа. По толщине оболочки принималось 5 точек. Значения интенсивности касательных напряжений S в соответствующих узлах по толщине оболочки показаны в таблице 1, по которой видно, что результаты практически совпадают. Поэтому дальнейший расчет по определению упруго-пластического напряженно-деформированного состояния выполнен с использованием сетки 13×10 узлов.

Дальнейший расчет оболочки осуществлялся при нагрузках 10,0, 12,0 и 14,75 МПа при сетке 13×10 узлов. По диаграмме растяжения (рис. 3) видно, что первые пластические деформации возникают тогда, когда интенсивность касательных напряжений достигает 242,5 МПа. При ре-

шении задачи пластичности на нагрузку 10 МПа потребовалось 10 приближений с точностью сходимости 2,74%, при нагрузке 12,0 МПа – 6 приближений с точностью сходимости 3,6%, при нагрузке 14,75 МПа – 11 приближений с точностью 4,3%. Первые пластические деформации возникают при нагрузке $q_{zz}=7,25$ МПа в узле 4-4.

В таблицах 2,...,10 (см. приложение 1) приведены поля интенсивности касательных напряжений S по всей сеточной области оболочки ($z=\pm 1/2h, z=0$) при упруго-пластическом решении задач под действием равномерно распределенных нагрузок $q_{zz}=10$ МПа, 12,0 МПа, 14,75 МПа.

Данные этих таблиц проиллюстрированы соответствующими графиками на рис. 4,...,12 (см. приложение 1). Эти графики наглядно дают возможность проследить совместно с диаграммой растяжения за развитием зон пластических деформаций. Пластические зоны по мере роста распределенной нагрузки локализуются и развиваются вблизи внутреннего жестко защемленного края оболочки, т. е. при $\alpha_1=\pi$. С целью удобства построения графиков номера узлов таблиц 2-10 по сравнению с номерами на рисунке 2 сдвинуты на две единицы. Узлу 2-2 (рис.2) соответствует узел 0 – 0 в таблицах 2-10.

Таким образом, разработанная методика расчета может быть применена для исследования упруго-пластического напряженно-деформированного состояния конструкций, содержащих в своей структуре конструктивные элементы в форме тороидальных оболочек.

Литература

1. Ильюшин А.А., Ленский В.С. Сопротивление материалов. М.: Физматгиз, 1959, 372с.
2. Избранные методы строительной механики в расчетах пространственных конструкций. Под общей ред. д.т.н., проф. В.Ф. Мушанова. Макеевка:2006, с.55 – 136.
3. Мушанов В.Ф., Демидов А.И. Линейные и нелинейные задачи теории упругости в расчетах тонкостенных конструкций. Макеевка: РИС ОМС ДонГАСА, 2000, 182 с.
4. Новожилов В.В. Теория тонких оболочек. Ленинград: Судпромгиз, 1962, 432 с.
5. Шевченко Ю.Н., Прохоренко И.В. Методы расчета оболочек. Теория упруго-пластических оболочек при неизоотермических процессах нагружения. Киев: Наук. Думка, 1981, 296 с.

Таблица 1.

Сетка	Узлы	Интенсивность касательных напряжений, МПа		
		$S(-h/2)$	$S(0)$	$S(h/2)$
13×10	7,5	253,414	254,144	254,884
23×17	12,8	52,034	254,507	256,998
% отличия		0,4	0,14	0,83

Приложение 1

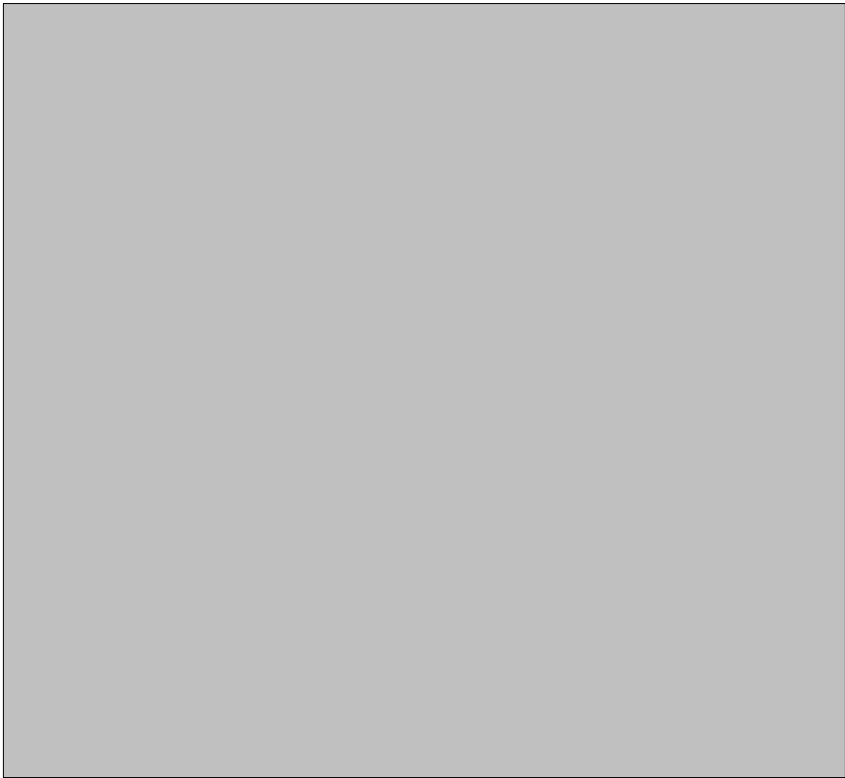


Рисунок 2. Сеточная область тороидальной оболочки

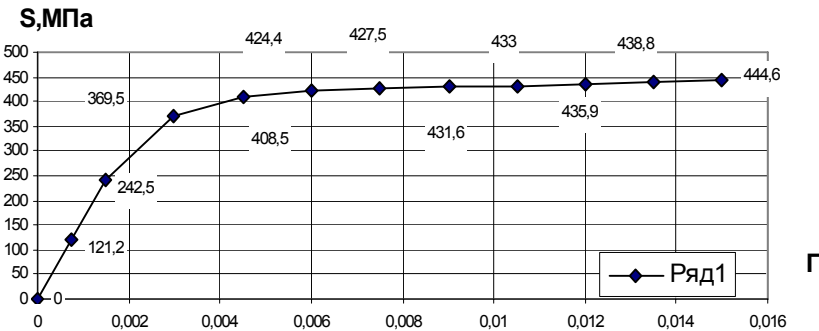
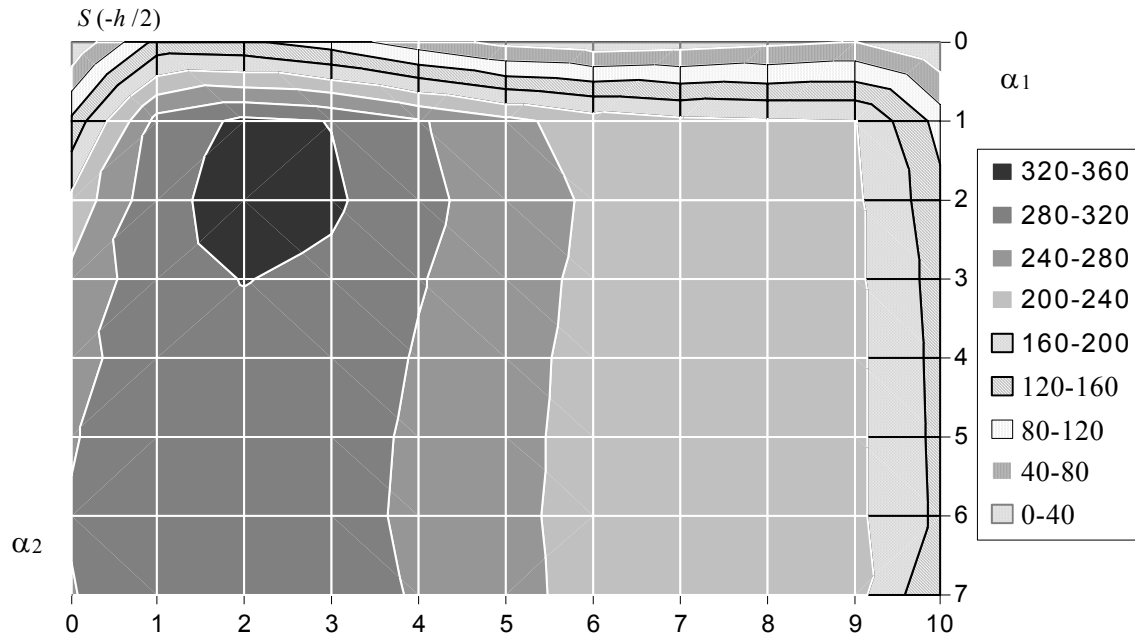
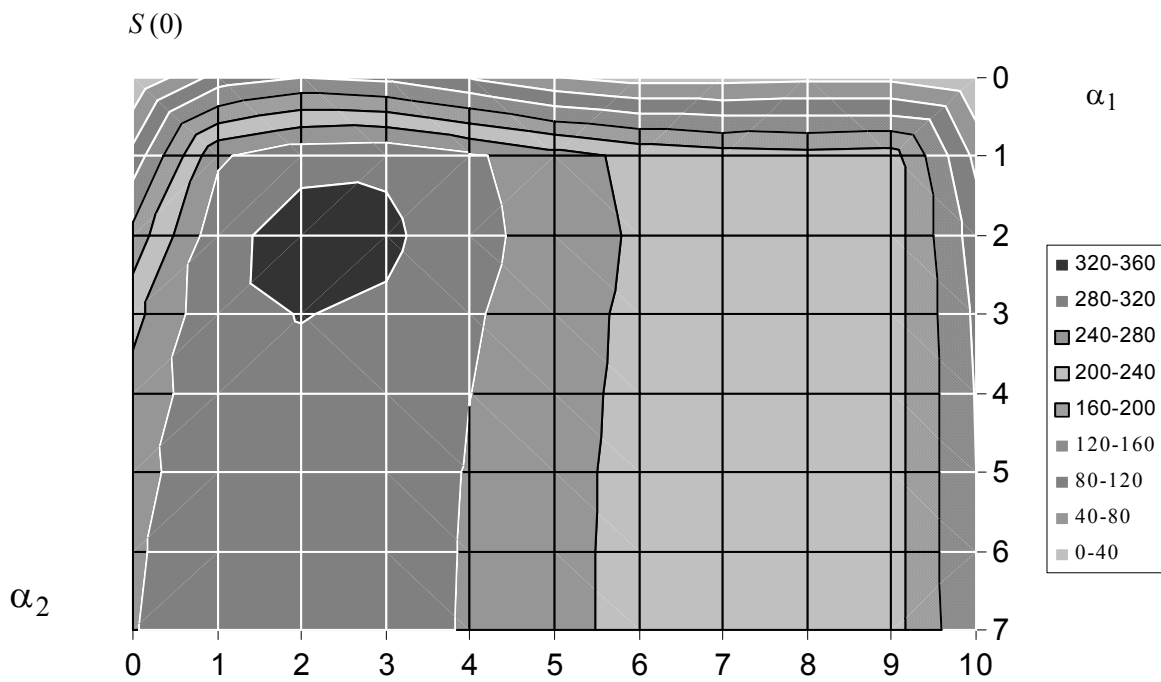


Рисунок 3. Диаграмма растяжения стали 12ХГНМФ

Приложение 1 (продолжение)

Рисунок 4. Интенсивность касательных напряжений $S(-h/2)$ при $q_{zz}=10$ МПаРисунок 5. Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=10$ МПа

Приложение 1 (продолжение)

Таблица 2.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(-h/2)$ при $q_{zz}=10$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	128,887	210,299	250,827	267,035	277,2	282,938	277,975
1	132,868	294,685	309,635	306,145	303,245	302,533	302,69	303,19
2	127,153	328,596	336,383	321,076	310,162	305,264	303,419	301,311
3	98,659	318,988	326,311	311,895	302,055	297,231	295,002	297,904
4	58,97	283,78	292,172	282,78	276,725	273,402	271,633	276,052
5	29,781	249,988	258,421	253,414	250,299	248,448	247,41	249,059
6	19,665	222,734	235,263	232,529	230,845	229,859	229,317	229,948
7	25,039	210,487	220,678	219,692	218,989	218,568	218,339	218,768
8	33,07	205,028	212,52	212,275	211,918	211,67	211,525	213,613
9	41,039	202,66	208,336	208,649	208,82	208,881	208,894	215,079
10	0	103,881	134,109	144,224	148,121	149,682	150,252	120,595

Таблица 3.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=10$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	94,901	173,227	228,035	254,913	268,153	275,575	277,975
1	94,728	273,254	309,721	310,742	306,454	304,108	303,314	303,19
2	118,987	309,959	334,009	321,202	309,79	304,229	301,937	301,311
3	107,068	313,067	328,201	314,155	304,87	300,504	298,503	297,904
4	74,95	286,989	294,9	285,452	280,399	277,823	276,476	276,052
5	42,382	254,645	259,285	254,144	251,582	250,117	249,314	249,059
6	22,138	230,048	235,094	232,39	231,151	230,451	230,069	229,948
7	21,398	217,946	221,626	220,332	219,625	219,145	218,858	218,768
8	28,06	213,253	215,974	215,254	214,535	214,008	213,695	213,613
9	28,577	217,978	217,717	215,996	215,219	214,798	214,572	215,079
10	0	70,257	101,557	113,313	117,969	119,817	120,464	120,595

Таблица 4.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=10$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	60,915	136,156	199,221	242,815	259,117	268,219	271,144
1	60,006	273,149	312,597	315,372	309,785	305,791	304,012	303,569
2	110,878	314,652	333,905	321,347	309,539	303,301	300,55	299,765
3	115,532	324,775	331,104	316,482	307,737	303,798	302,008	301,469
4	91,349	300,689	297,921	288,146	284,098	282,268	281,337	281,05
5	56,536	264,825	260,255	254,884	252,878	251,8	251,23	251,055
6	28,67	241,819	235,017	232,278	231,481	231,06	230,835	230,764
7	19,835	227,858	222,631	220,991	220,273	219,73	219,383	219,268
8	23,876	223,03	219,468	218,243	217,157	216,347	215,865	215,679
9	19,185	234,459	227,116	223,354	221,624	220,719	220,253	220,843
10	0	36,633	69,005	82,403	87,817	89,951	90,676	90,706

Приложение 1 (продолжение)

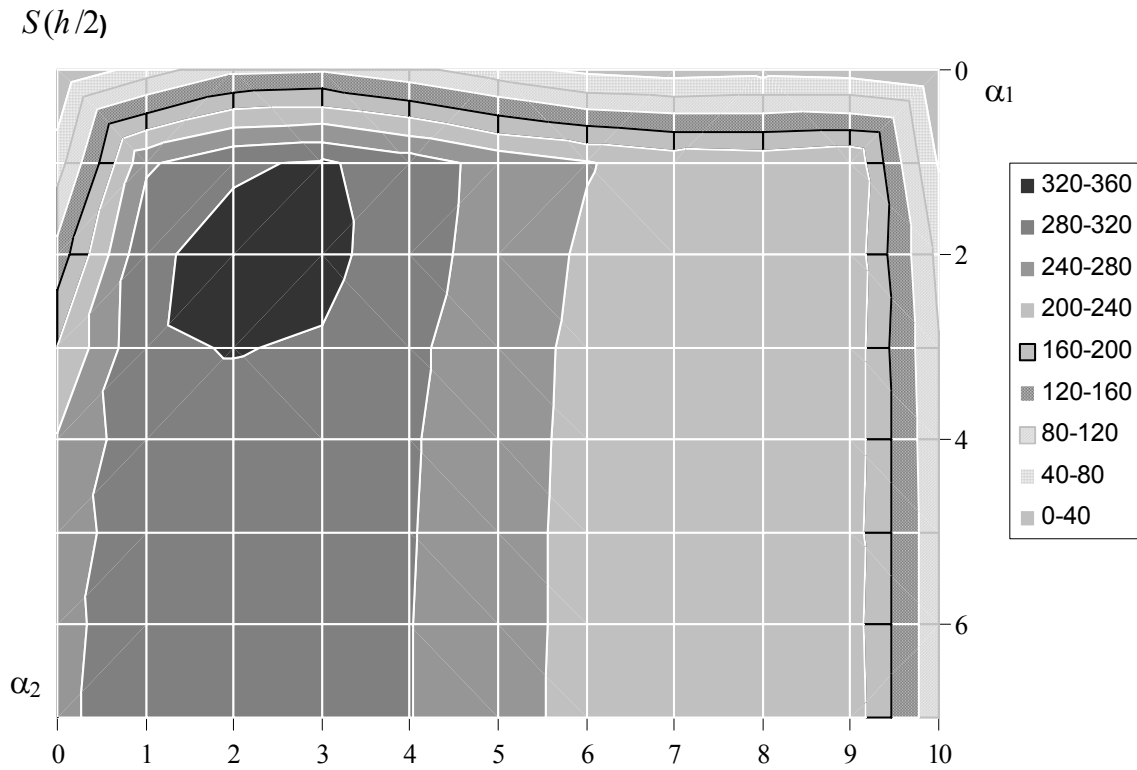
Рисунок 6. Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz} = 10$ МПа

Таблица 5.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=12$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	160,368	255,875	293,527	316,462	330,208	337,817	340,293
1	166,307	347,398	370,055	369,091	364,426	363,259	363,737	364,119
2	157,191	376,946	385,549	377,782	370,911	366,081	364,306	363,977
3	119,286	373,462	380,6	372,516	361,74	355,927	353,683	353,027
4	70,374	336,247	349,75	337,664	330,649	327,066	325,173	324,576
5	35,784	295,895	307,386	302,103	298,776	296,737	295,616	295,256
6	25,553	270,073	280,465	278,069	276,543	275,622	275,117	274,945
7	32,056	256,102	264,895	263,753	262,956	262,435	262,146	262,035
8	40,637	249,966	256,405	256,031	255,45	255,026	254,774	254,778
9	49,86	248,681	252,941	252,652	252,445	252,298	252,206	252,7
10	0	126,563	163,398	175,469	179,945	181,64	182,202	182,547

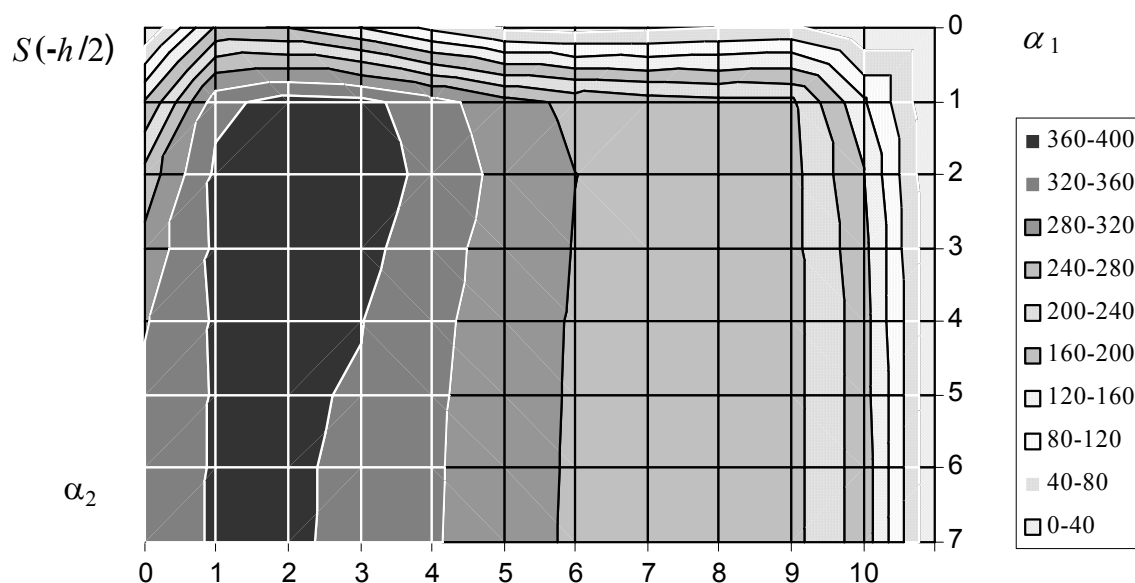
Приложение 1 (продолжение)

Таблица 6.

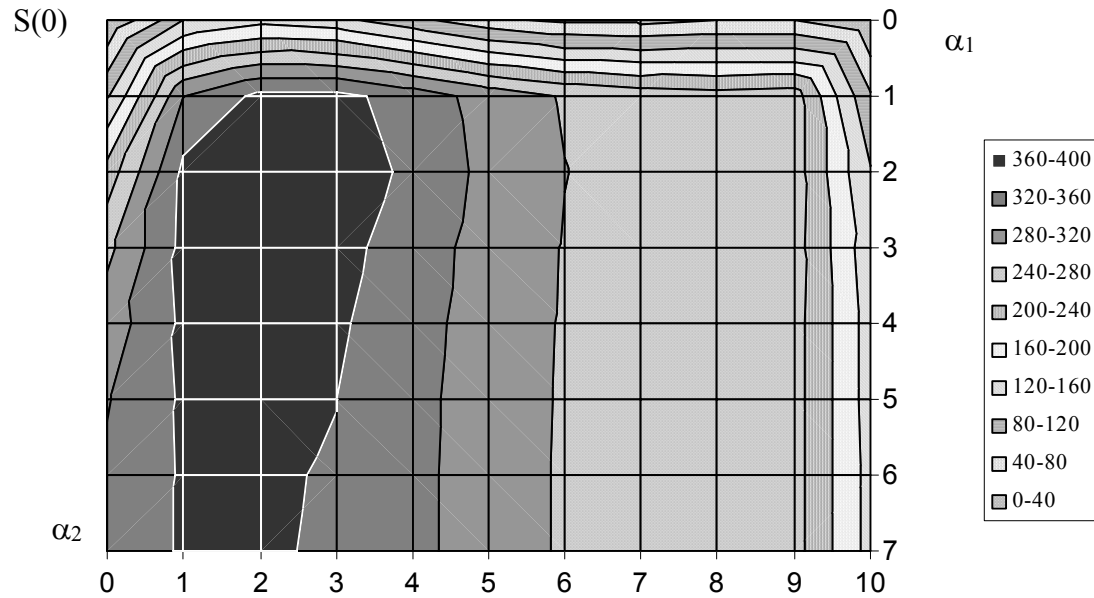
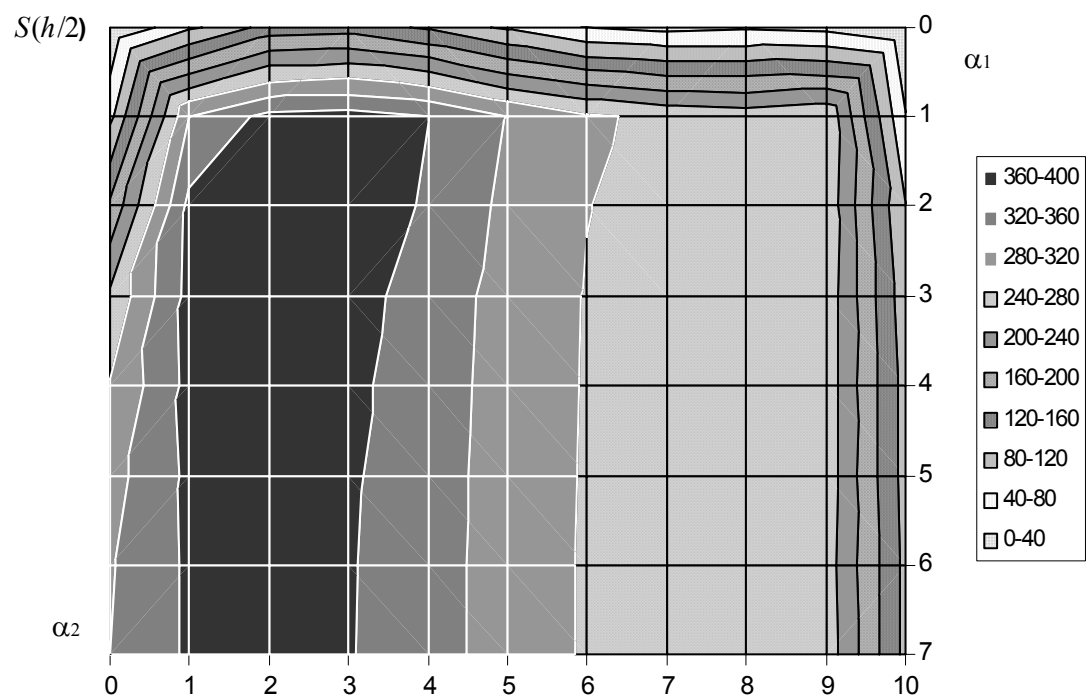
Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=12$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	115,741	216,208	270,707	299,65	317,307	326,989	330,1
1	115,321	318,572	369,85	371,308	368,838	365,557	364,809	364,809
2	145,9	369,849	384,71	378,242	370,982	365,023	362,579	362,051
3	131,352	371,93	381,921	373,472	365,349	360,27	358,314	357,726
4	91,518	341,476	352,399	340,478	335,302	332,732	331,332	330,895
5	51,958	303,734	308,925	303,547	300,944	299,41	298,6	298,346
6	28,277	276,659	280,726	278,052	276,772	276,023	275,617	275,477
7	27,102	261,732	265,34	263,874	263,091	262,534	262,208	262,078
8	34,596	255,883	258,629	257,917	257,056	256,418	256,037	255,943
9	34,527	260,953	260,312	258,423	257,498	256,996	256,722	257,346
10	0	84,193	122,396	136,621	142,087	144,147	144,805	144,944

Таблица 7.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=12$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	71,115	166,895	247,949	282,859	304,415	316,166	319,912
1	69,391	318,622	370,815	373,16	370,836	367,995	365,964	365,563
2	134,695	371,73	385,436	378,711	371,141	364,138	360,962	360,224
3	143,512	377,787	384,053	374,466	369,052	364,64	362,95	362,425
4	113,315	360,277	355,415	343,326	339,988	338,424	337,511	337,231
5	70,565	318,557	310,587	305,004	303,128	302,099	301,599	301,45
6	37,324	286,847	281,061	278,055	277,02	276,439	276,13	276,021
7	25,297	269,393	265,834	264,011	263,236	262,64	262,276	262,127
8	29,594	263,121	260,891	259,812	258,666	257,811	257,3	257,108
9	23,186	274,36	267,696	264,194	262,551	261,693	261,238	261,991
10	0	41,823	81,393	97,773	104,228	106,654	107,407	107,34

Рисунок 7. Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=12$ МПа

Приложение 1 (продолжение)

Рисунок 8. Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=12$ МПаРисунок 9. Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=12$ МПа

Приложение 1 (продолжение)

Таблица 8.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(-h/2)$ при $q_{zz}=14,75$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	216,416	332,136	384,014	401,761	411,05	413,498	414,265
1	241,479	398,55	418,34	422,544	423,116	423,072	423,193	423,313
2	228,961	421,849	427,223	426,924	425,938	425,204	424,312	424,101
3	154,501	422,257	427,032	426,171	423,287	420,825	420,003	419,809
4	80,152	406,882	413,944	409,09	402,803	400,365	399,247	398,892
5	46,85	372,32	377,221	371,958	369,995	368,201	366,747	366,268
6	36,355	330,527	342,975	340,201	338,622	337,594	337,015	336,814
7	43,411	313,476	323,927	323,32	322,408	321,777	321,43	321,291
8	52,836	306,086	313,931	313,92	313,243	312,681	312,341	312,349
9	63,389	300,548	307,262	306,875	306,572	306,325	306,168	306,853
10	0	160,467	209,224	224,233	229,313	230,895	231,218	231,549

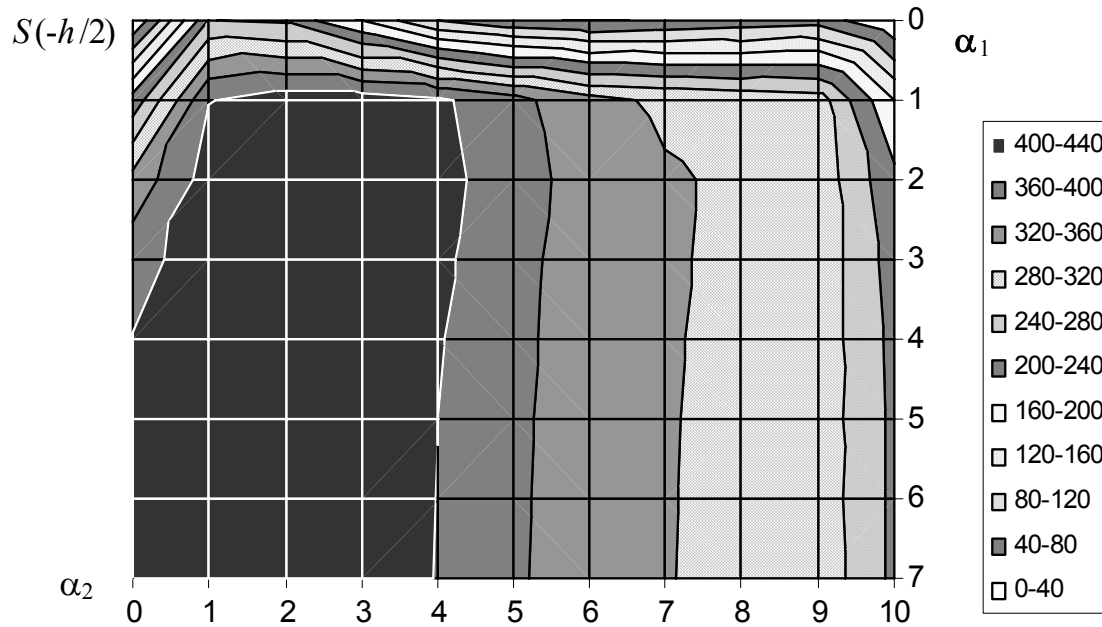
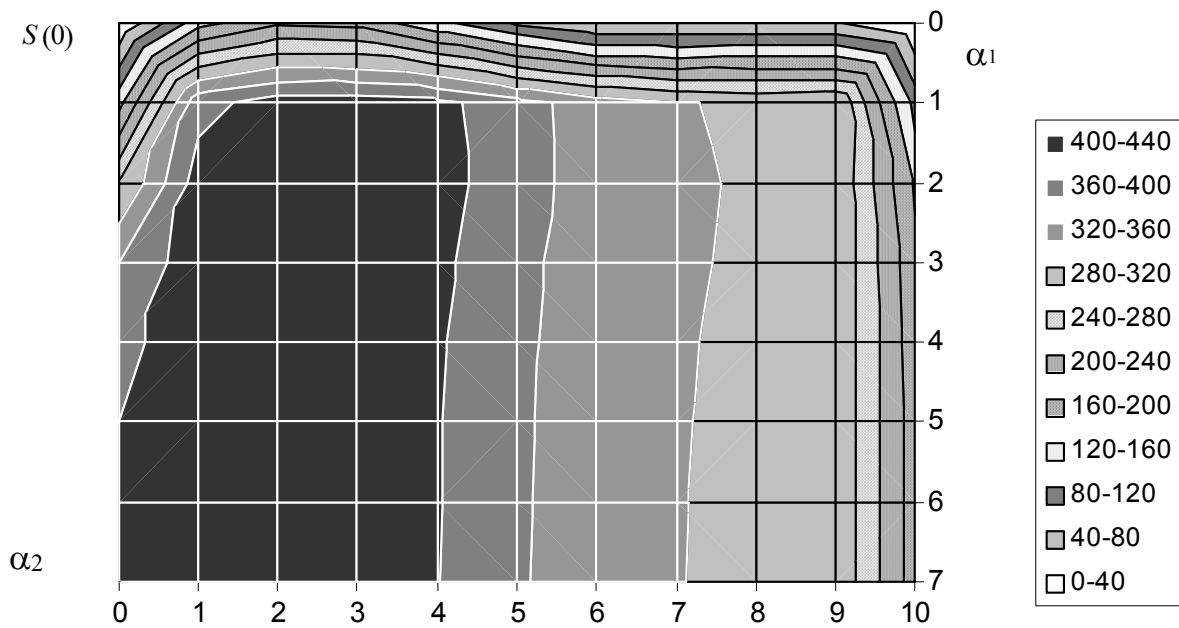
Таблица 9.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=14,75$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	145,781	277,784	359,882	387,163	399,922	406,749	408,896
1	145,287	385,8	417,688	423,797	424,474	424,154	424,075	424,132
2	194,895	417,761	427,475	427,194	425,987	425,168	424,133	423,87
3	185,323	423,58	427,947	426,691	425,235	422,923	422,186	422,009
4	132,501	411,201	415,004	409,298	404,463	402,756	401,889	401,592
5	75,233	375,845	375,807	370,219	367,779	366,106	365,137	364,828
6	39,536	339,794	342,224	339,658	338,432	337,604	337,155	336,998
7	36,795	322,038	324,302	323,176	322,179	321,476	321,077	320,911
8	45,055	314,663	316,492	315,977	314,885	314,028	313,517	313,392
9	42,885	318,322	317,771	315,279	314,08	313,396	313,013	313,904
10	0	102,828	153,201	170,771	176,914	178,78	179,094	179,085

Таблица 10.

Узлы	Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=14,75$ МПа							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	75,146	210,115	309,53	372,581	387,385	395,323	397,792
1	66,906	382,14	418,16	424,923	425,137	425,041	424,963	424,955
2	161,318	419,458	428,167	427,482	426,041	425,141	423,979	423,657
3	216,553	426,752	429,145	427,212	425,838	425,031	424,376	424,216
4	188,78	417,456	416,272	409,505	406,147	405,176	404,557	404,317
5	112,045	382,971	374,479	366,878	364,833	364,059	363,57	363,43
6	52,751	353,656	341,578	339,15	338,275	337,641	337,317	337,202
7	34,505	333,102	324,739	323,056	321,967	321,189	320,733	320,541
8	38,732	324,846	319,095	318,044	316,531	315,377	314,694	314,437
9	28,584	337,439	328,296	323,687	321,588	320,467	319,858	320,954
10	0	45,189	97,178	117,309	124,516	126,665	126,97	126,621

Приложение 1 (продолжение)

Рисунок 10. Интенсивность касательных напряжений $S(-h/2)$ при $q_{zz}=14,75$ МПаРисунок 11. Интенсивность касательных напряжений $S(0)$ при $q_{zz}=14,75$ МПа

Приложение 1 (продолжение)

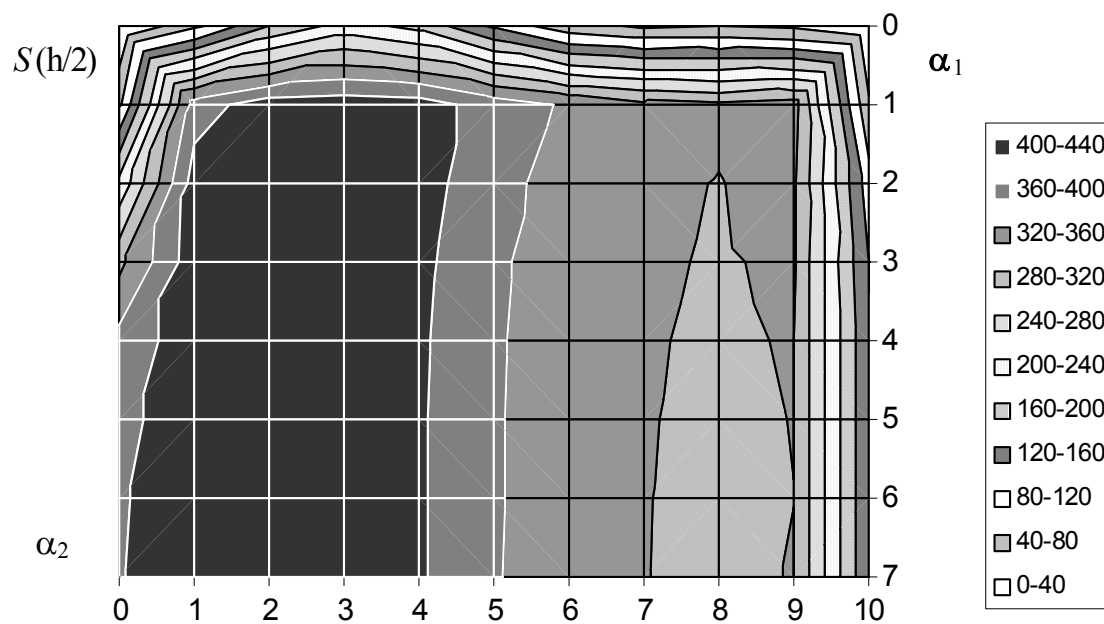


Рисунок12. Интенсивность касательных напряжений $S(h/2)$ при $q_{zz}=14,75$ МПа

Демидов Олександр Іванович працює на посаді доцента по кафедрі "Теоретична і прикладна механіка", секція "Опір матеріалів" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: фізично лінійні і нелінійні завдання теорії тонких оболонок постійної і змінної товщини.

Демидов Александр Иванович работает в должности доцента по кафедре "Теоретическая и прикладная механика", секция "Сопротивление материалов" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы : физически линейные и нелинейные задачи теории тонких оболочек постоянной и переменной толщины.

Demidov Olexand Ivanovych works as an Associated Professor at the department "Theoretical and Applied Mechanics", section "Materials Resistance" at the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. The scientific interests: physically linear and non-linear problems of the theory of thin shells of a constant and variable thickness.