

## ОСОБЕННОСТИ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ АППРОКСИМАЦИИ ОТБОЙНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИЧАЛОВ МОРСКИХ ПОРТОВ

Школа А.В. , Константинов П.В., Клованич С.Ф. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры)

**В статье предложен собственный, простой, но очень эффективный алгоритм, заключающийся в перенумерации узлов перед началом расчетов таким образом, чтобы максимальная разность смежных углов элементов была минимальной.**

Покрышка-оболочка представляет собой поверхность вращения, главной особенностями которой являются, во-первых, наличие глобальной по периметру оболочки и локальной по сечению осей симметрии (рис.1), во-вторых, замкнутость в направлении периметра. Аппроксимация такой поверхности набором конечных элементов треугольной или четырехугольной формы представлена на рис.2. Поскольку поверхность регулярна, возможна автоматическая генерация сетки узлов и элементов. Разработана программа генерации такой сетки для произвольной поверхности вращения. При этом подготовка исходных данных сводится лишь к заданию радиуса, местных координат узлов сечения и числа разбиений по периметру. Пример подготовки исходных данных с помощью этой программы представлен на рис.1 и в таблицах 1 и 2. Вручную вводятся толщины элементов, модули упругости, коэффициенты Пуассона и данные о внешних нагрузках. Для облегчения подготовки исходных данных о геометрии целесообразно представлять поверхность в виде развертки (таб. 3). При этом вертикальные линии характеризуют нормальные сечения по периметру. Сквозная нумерация узлов в таб. 3, удобна в практических приложениях, что облегчает подготовку исходных данных и анализ результатов расчетов. Однако, при такой нумерации первое и последнее нормальные сечения совпадают. Поскольку последний элемент системы в данном случае имеет максимально возможную разность номеров узлов, то с математической точки зрения ширина ленты глобальной матрицы жесткости системы будет максимальной и равной размерности этой матрицы. Даже самые совершенные ленточные алгоритмы решения систем линейных алгебраических уравнений высоких порядков, учитывающие профиль ленты приводят к существенным затра-

там времени и ресурсов ЭВМ, а при большом числе неизвестных не реализуемы. Так, например, статический расчет оболочки вращения на равномерное внутреннее давление, при числе узлов 1296 (сетка 36x36) и 7800 неизвестных на ЭВМ потребовал 1 час 30 мин машинного времени, из которых 1 час 25 минут понадобилось на решение системы уравнений.

Таблица 1. - Пример подготовки исходных данных

№	Переменные и единицы измерения	Колич.
1	Радиус R, м	0.35
2	Число разбиений по периметру N	24
3	Число разбиений по образующей M	12
4	Тип решетки (0-трех, 1 – четырехугольная)	1

Таблица 2. - Исходные данные

№	Координ. узла, м. в местных корд.	
	X	Z
1	0.000	-0.100
2	0.071	-0.200
3	0.150	-0.200
4	0.236	-0.200
5	0.312	-0.162
6	0.350	-0.087
7	0.350	0.000
8	0.350	0.087
9	0.312	0.162
10	0.236	0.200
11	0.150	0.200
12	0.071	0.200
13	0.000	0.100

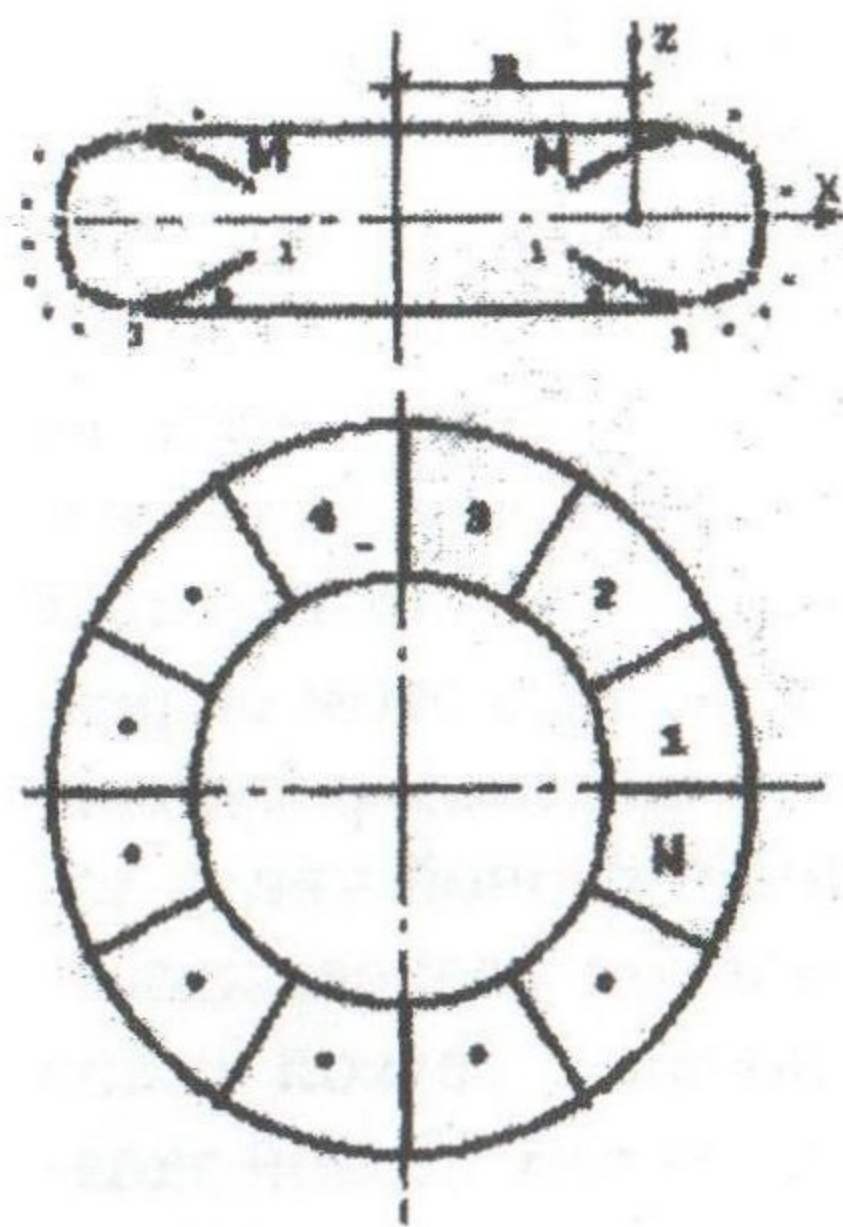


Рис.1

Покрышка в виде оболочки.

Совершенно очевидно, что эффективное решение данной задачи возможно только с использованием математических методов, миними-

зирующих ширину ленты матрицы жесткости. Существуют достаточно известные алгоритмы минимизации ширины ленты, большинство из которых построены с использованием теории графов. Однако, существенно увеличивая скорость вычислений, они, тем не менее, потребляют вдвое больше памяти, что при значительных размерах системы приводит к обращению к внешним устройствам и, в свою очередь, снижает производительность этих методов.

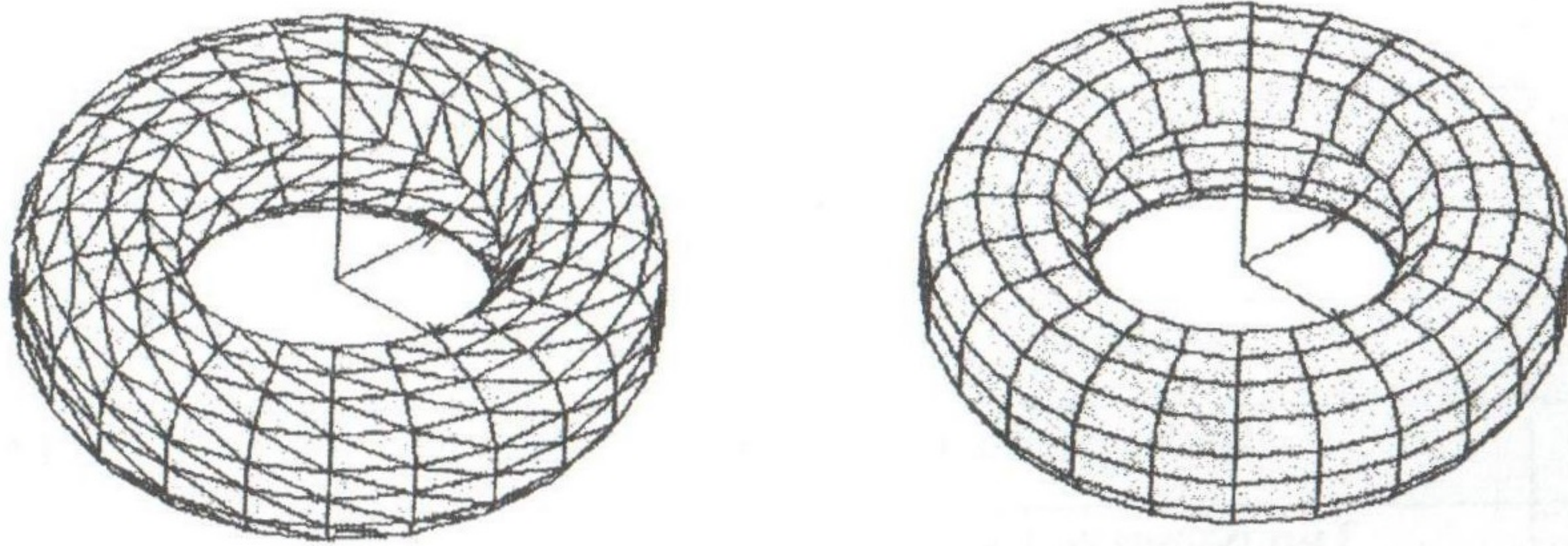


Рис. 2. Аппроксимация поверхности набором конечных элементов треугольной и четырехугольной формы.

Поэтому для частного случая оболочек вращения был предложен собственный простой, но очень эффективный алгоритм, заключающийся в перенумерации узлов перед началом расчетов таким образом, чтобы максимальная разность смежных узлов элементов была минимальной. Рекомендуемый порядок нумерации узлов представлен на примере, показанном в таб. 4. Написана подпрограмма, осуществляющая перенумерацию узлов перед началом расчета и возвращающая первоначальную нумерацию при выводе результатов. При этом ее реализация практически не требует дополнительных машинных ресурсов. Дополнительно, вводится лишь один вектор длиной, равной числу узлов системы. Эффективность предлагаемого алгоритма подтверждается решением ранее рассмотренной задачи (оболочка с сеткой узлов  $36 \times 36$ ). Общее машинное время составило -17 мин, из них 12 мин заняло решение системы уравнений. По сравнению с предыдущим расчетом получен 5-кратный выигрыш во времени.

Таблица 3. - Сквозная нумерация узлов - N

13	26	52	78	104	130	156	182	208	234	260	286	299	312	273	247	221	195	169	143	117	91	65	39	13
12	25	51	77	103	129	155	181	207	233	259	285	298	311	272	246	220	194	168	142	116	90	64	38	12
11	24	50	76	102	128	154	180	206	232	258	284	297	310	271	245	219	193	167	141	115	89	63	37	11
10	23	49	75	101	127	153	179	205	231	257	283	296	309	270	244	218	192	166	140	114	88	62	36	10
9	22	48	74	100	126	152	178	204	230	256	282	295	308	269	243	217	191	165	139	113	87	61	35	9
8	21	47	73	99	125	151	177	203	229	255	281	294	307	268	242	216	190	164	138	112	86	60	34	8
7	20	46	72	98	124	150	176	202	228	254	280	293	306	267	241	215	189	163	137	111	85	59	33	7
6	19	45	71	97	123	149	175	201	227	253	279	292	305	266	240	214	188	162	136	110	84	58	32	6
5	18	44	70	96	122	148	174	200	226	252	278	291	304	265	239	213	187	161	135	109	83	57	31	5
4	17	43	69	95	121	147	173	199	225	251	277	290	303	264	238	212	186	160	134	108	82	56	30	4
3	16	42	68	94	120	146	172	198	224	250	276	289	302	263	237	211	185	159	133	107	81	55	29	3
2	15	41	67	93	119	145	171	197	223	249	275	288	301	262	236	210	184	158	132	106	80	54	28	2
1	14	40	66	92	118	144	170	196	222	248	274	287	300	261	235	209	183	157	131	105	79	53	27	1

Таблица 4. - Рекомендуемый порядок нумерация узлов - N

13	26	39	52	65	78	91	104	117	130	143	156	169	182	195	208	221	234	247	260	273	286	299	312	13
12	25	38	51	64	77	90	103	116	129	142	155	168	181	194	207	220	233	246	259	272	285	298	311	12
11	24	37	50	63	76	89	102	115	128	141	154	167	180	193	206	219	232	245	258	271	284	297	310	11
10	23	36	49	62	75	88	101	114	127	140	153	166	179	192	205	218	231	244	257	270	283	296	309	10
9	22	35	48	61	74	87	100	113	126	139	152	165	178	191	204	217	230	243	256	269	282	295	308	9
8	21	34	47	60	73	86	99	112	125	138	151	164	177	190	203	216	229	242	255	268	281	294	307	8
7	20	33	46	59	72	85	98	111	124	137	150	163	176	189	202	215	228	241	254	267	280	293	306	7
6	19	32	45	58	71	84	97	110	123	136	149	162	175	188	201	214	227	240	253	266	279	292	305	6
5	18	31	44	57	70	83	96	109	122	135	148	161	174	187	200	213	226	239	252	265	278	291	304	5
4	17	30	43	56	69	82	95	108	121	134	147	160	173	186	199	212	225	238	251	264	277	290	303	4
3	16	29	42	55	68	81	94	107	120	133	146	159	172	185	198	211	224	237	250	263	276	289	302	3
2	15	28	41	54	67	80	93	106	119	132	145	158	171	184	197	210	223	236	249	262	275	288	301	2
1	14	27	40	53	66	79	92	105	118	131	144	157	170	183	196	209	222	235	248	261	274	287	300	1

### *Вывод*

Отдавая должное высокой точности конечно-элементной аппроксимации покрышек полых или с заполнением, следует отметить сложность назначения в расчетах их осредненного модуля упругости и коэффициента Пуассона, что связано с резкой неоднородностью элементов покрышек (протектора, каркаса, борта, бортовых колец, каркасных кордовых слоев, брекерных кордовых слоев). Исследования модуля упругости и коэффициента Пуассона резинового заполнения показали их близость к свойствам каучука.

### *Литература*

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. -М.: Мир, 1975 – 541 с.
2. Видный Г.Р., Колчин Г.Б., Клованич С.Ф. Матричный метод решения задач строительной механики.- Кишинев: Штиница, 1981 -308 с.
3. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. -М.: Стройиздат, 1982 - 448 с.
4. Постов В.А., Хархурим И.Я. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций. - Л.: Судостроение, 1974 - 341 с.
5. Стренг Г., Фикс Дж. Теория метода конечных элементов. М.: Мир, 1977-349 с.