



УДК 616.71

© 2005 г. **И.В. Борозда**, канд. мед. наук  
(Амурская государственная медицинская академия, Благовещенск),

**А.В. Бушманов**, канд. техн. наук  
(Амурский государственный университет, Благовещенск)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ БИОМЕХАНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВНУТРЕННЕЙ ПОЛОСТИ ТАЗА**

Рассматриваются результаты эксперимента по определению прочностных свойств мягких тканей внутренней полости таза. Методом интерполирования решается задача определения функции деформации мягких тканей от величины прикладываемой нагрузки.

### **Введение**

В последние годы совершенствуются способы и методы наблюдения физиологической реакции организма при воздействиях различных природных и искусственных факторов, причем особое внимание уделяется действию экстремальных факторов.

Теоретические обобщения и механико-математические модели создаются не только для объяснения наблюдаемых, но и для предсказания новых явлений. Одной из основных целей биомеханических исследований является определение общих свойств идеализированных тканей органов и систем организма, а также разработка их механико-математических моделей с целью применения результатов исследований в биотехнике [1].

Разработка математической модели внутренних органов таза является задачей, актуальной с точки зрения компьютерного моделирования поведения тазового кольца и повреждения органов тазового кольца в экстремальных ситуациях, в связи с этим необходимо моделирование таких возможных ситуаций.

Для того, чтобы численно определить прочностные характеристики внутренних органов таза – таких как мочевого пузыря и прямая кишка, при меняющихся по возрастанию условиях нагружения, необходимо провести ряд экспериментов с препаратами и на основе полученных данных определить функциональную зависимость деформации препаратов от прикладываемой силы.

## **Постановка задачи**

Цель работы заключается в том, чтобы, во-первых, провести экспериментальные исследования на препаратах мочевого пузыря и прямой кишки для определения зависимости величины деформации от величины прикладываемой силы, во-вторых, методом интерполирования решить задачу приближения функциональной зависимости деформации от прикладываемой силы, в-третьих, с помощью пакета MATLAB провести вычислительный эксперимент, удовлетворяющий полученным данным лабораторного эксперимента.

## **Краткое характеристика среды моделирования**

Кратко опишем среду моделирования – взаимодействие внутренних органов тазового кольца.

Стенки и внутренности малого таза покрыты тазовой фасцией. Она является продолжением внутренностной фасции живота и по аналогии с ней носит название внутренностной фасции таза. Принято различать два листка тазовой фасции – париетальный и висцеральный. Первый выстилает стенки и дно полости таза, второй покрывает органы таза. На границе верхней и нижней половин внутренней запирающей мышцы париетальный листок тазовой фасции образует утолщение – сухожильную дугу. От нее начинается мышца, поднимающая задний проход, верхняя поверхность которой покрыта тазовой фасцией. В заднем отделе тазового дна фасция покрывает грушевидную мышцу. Между симфизом и предстательной железой у мужчин (или между симфизом и мочевым пузырем у женщин) фасция таза образует две толстые сагиттально направленные складки, или связки, соединяющие данные образования.

Переходя на органы, тазовая фасция дает два отроча, расположенные в сагиттальной плоскости между лобковыми костями и крестцом. Таким образом, органы малого таза оказываются заключенными спереди лобковыми костями, сзади – крестцом и копчиком, с боков – сагиттальными пластинками тазовой фасции. Это пространство разделяется на два отдела, передний и задний, особой перегородкой, расположенной во фронтальной плоскости между дном брюшинного мешка и мочеполовой диафрагмой. Перегородку образует брюшино-промежностный апоневроз, иначе апоневроз Денонвилье, представляющий собой дубликатуру брюшины. Брюшино-промежностный апоневроз отделяет прямую кишку от мочевого пузыря и предстательной железы, так что передний отдел пространства у мужчин содержит мочевой пузырь, предстательную железу, семенные пузырьки и ампулы семявыносящих протоков, а у женщин – мочевой пузырь и влагалище; задний отдел содержит прямую кишку. За счет тазовой фасции и апоневроза Денонвилье все названные органы получают фасциальные футляры, причем особо выделяют капсулу Пирогова-Ретция для пред-

стательной железы и капсулу Амюсса для кишки.

Занимая в малом тазу срединное положение, органы нигде непосредственно со стенками таза не соприкасаются и отделяются от них клетчаткой. Там, где органы лишены брюшного покрова, их покрывает висцеральный листок тазовой фасции, но между фасцией и органом заключена клетчатка, содержащая кровеносные и лимфатические сосуды и нервы органа.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования на растяжение проводились на 20 препаратах из мочевого пузыря и прямой кишки. Испытываемая полоска ткани 1 фиксировалась вертикально (рис. 1), крепление производилось при помощи специальных зажимов 2, величина грузов 3 увеличивалась постепенно, шаг нагрузки составлял 2 (Н), время экспозиции составляло 2 мин.

В каждом случае эксперимент повторялся трехкратно и фиксировалось среднеарифметическое значение показателей, по которым строили графики зависимости перемещений от применяемой нагрузки (таблица). В

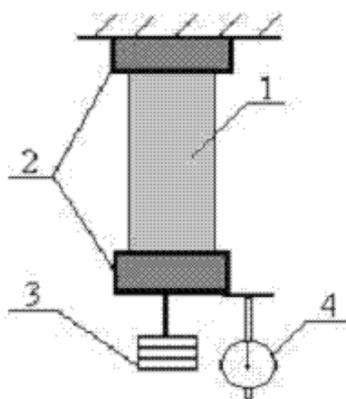


Рис. 1. Крепление препарата.

таблице МП1 – продольная полоска препарата из мочевого пузыря размером 50×20×5 (мм); МП2 – поперечная полоска препарата из мочевого пузыря размером 50×20×5 (мм); ПК1 – продольная полоска препарата из прямой кишки размером 110×20×5 (мм); ПК2 – поперечная полоска препарата из прямой кишки размером 110×20×5 (мм); Р (Н) – прикладываемая нагрузка в ньютонах; D (мм) – перемещение точки нагружения в миллиметрах.

МП1		МП2		ПК1		ПК2	
Р (Н)	D (мм)	D (Н)	D (мм)	Р (Н)	D (мм)	Р (Н)	D (мм)
0	0	2	1	2	5		
2	1	4	4	4	7	2	0
4	4	6	8	6	7	4	2
6	8	8	10	8	9	6	3
10	12	15	24	10	9	8	9
12	13	25	33	12	9	10	9
14	14	25	40	15	10	12	9
15	15	25	43	17	10	15	4
17	18	25	48	18	15	17	4
20	24	27	50	19	18	18	6
23	28	29	52	20	18	19	6
25	30		разрыв	25	20	20	6
	разрыв			27	20	25	8

Продолжение таблицы

				28	20	27	8
				30	22	28	9
				32	30	30	9
					разрыв	32	9
							разрыв

Из таблицы видно, что под действием нагрузки в 25 (Н) наступает критическая деформация – разрыв продольной полосы, выкроенной из мочевого пузыря, под действием нагрузки в 29 (Н) наступает критическая деформация – разрыв поперечной полосы, выкроенной из мочевого пузыря, под действием нагрузки 32 (Н) наступает критическая деформация – разрыв продольной полосы, выкроенной из прямой кишки, под действием нагрузки в 32 (Н) наступает критическая деформация – разрыв поперечной полосы, выкроенной из прямой кишки.

### Математическая модель

Для получения функции, удовлетворяющей полученным данным эксперимента, необходимо решить задачу приближения. Поэтому, выбирая класс функций, на котором предполагается решать задачу приближения, остановимся на классе алгебраических полиномов  $P_n(x)$  [2].

Решение задачи методом интерполирования предполагает выполнение условия

$$P(x_i) = f(x_i) \text{ при } x_i \in [a, b]. \quad (1)$$

Интерполяционный полином можно построить в форме Лагранжа

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n f(x_i) g_i(x), \quad (2)$$

где  $g_i(x)$  – многочлен  $n$ -й степени, обладающий следующим свойством:

$$g_i(x) = \begin{cases} 1, & \text{при } x = x_i \\ 0, & \text{при } x = x_j \end{cases} \quad (3)$$

для  $(i, j) = 0, 1, \dots, n, i \neq j$ ,

$$L_j = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{j-1})(x - x_{j+1}) \dots (x - x_n)}{(x_j - x_0)(x_j - x_1) \dots (x_j - x_{j-1})(x_j - x_{j+1}) \dots (x_j - x_n)}. \quad (4)$$

Тогда можно записать выражение

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n L_i(x) f(x_i) = \sum_{i=0}^n B_i \prod_{j=0, j \neq i}^n (x - x_j), \quad (5)$$

где

$$B_i = f(x_i) / \prod_{j=0, j \neq i}^n (x_i - x_j). \quad (6)$$

Совместно выражения (5) и (6) образуют интерполяционную формулу Лагранжа.

## Численное моделирование

Экспериментальные данные представлены на рис. 2 – 5 в виде точек 1, а полиномиальные функции в виде зависимости деформации мягких тканей от приложенной нагрузки, построенные при помощи пакета МАТ-LAB [3], показаны на тех же рисунках (графики 2).

Для продольной полоски препарата из мочевого пузыря размером  $50 \times 20 \times 5$  (мм) получили:

$$f(x) = -0.002x^6 + 0.005x^5 - 0.02x^4 - 0.32x^3 + 3.1x^2 - 5.83x + 3.1. \quad (7)$$

Для поперечной полоски препарата из мочевого пузыря размером  $50 \times 20 \times 5$  (мм):

$$f(x) = -0.0002x^3 + 0.009x^2 + 0.5x + 1.6. \quad (8)$$

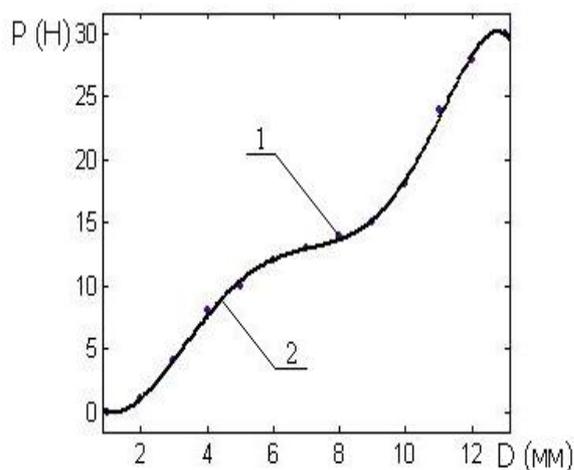


Рис. 2. Продольная полоска из мочевого пузыря.

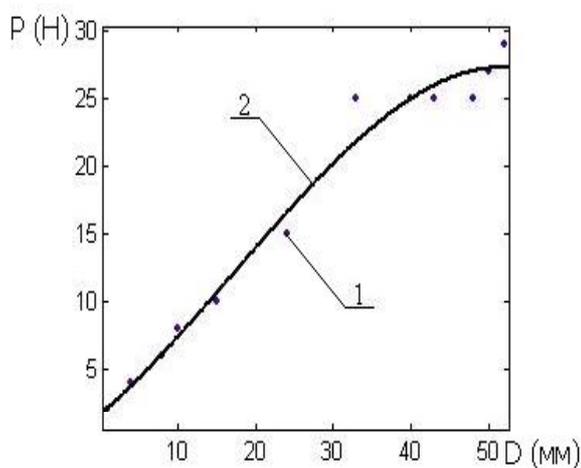


Рис. 3. Поперечная полоска из мочевого пузыря.

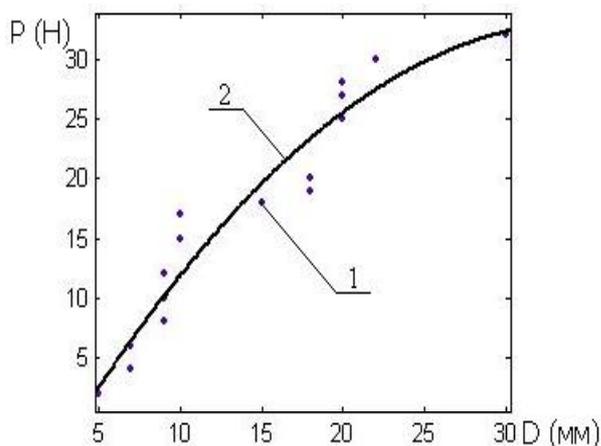


Рис. 4. Продольная полоска из прямой кишки.

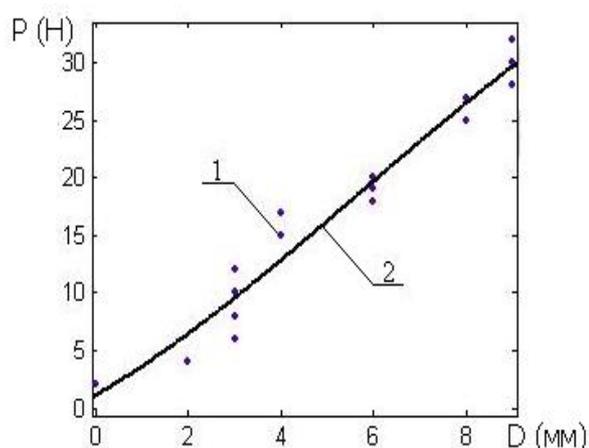


Рис. 5. Поперечная полоска из прямой кишки.

Для продольной полоски препарата из прямой кишки размером  $110 \times 20 \times 5$  (мм):

$$f(x) = -0.034x^2 + 2.39x - 8.55. \quad (9)$$

Для поперечной полоски препарата из прямой кишки размером  $110 \times 20 \times 5$  (мм):

$$f(x) = -0.01x^3 + 0.19x^2 + 2.3x + 1.2. \quad (10)$$

### Заключение

Основные выводы, вытекающие из анализа результатов экспериментального и математического моделирования, заключаются в следующем: проведенные экспериментальные исследования показали нелинейную зависимость деформации мягких тканей от величины прикладываемой силы; полученные математические модели деформации мягких тканей вида (7-10) соответствуют экспериментальным данным.

Эти и некоторые другие результаты, полученные на исследованных препаратах, могут быть использованы в математическом моделировании прочностных свойств мягких тканей при травме тазового кольца.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Бранков Г.* Основы биомеханики. М.: Мир, 1981.
2. *Самарский А.А., Гулин А.В.* Численные методы. М.: Наука, 1989.
3. *Гультяев А.К.* MATLAB 5.2. Имитационное моделирование в среде Windows: практическое пособие. М.: Наука, 2000.