

Cercetarea stărilor de tensiune–deformare a segmentului inferior al coloanei vertebrale

N. N. Şavga, N. Gh. Şavga, M. Carpinschii

Centrul Naţional Ştiinţifico-Practic de Chirurgie Pediatrică „Natalia Gheorghiu”

Catedra Chirurgie Pediatrică, Laboratorul Infecţiei Chirurgicale la Copii, USMF „Nicolae Testemiţanu”

Институт патологии позвоночника и суставов им. проф. М.И. Ситенко, лаборатория биомеханики, Харьков, Украина

The Study of the Tense-Deformed State of the Inferior/Lower Region of the Vertebral Column

With the purpose of confirming some aspects of the conceptual model of dysplastic process genesis, the prognosis of the course of getting ill, along with the collaborators from the biomechanical laboratory in the institute of spinal column pathology “N.Sitenco” from Harcoff, was created the mathematical model of the state of the lower lumbar region of vertebra in norm and some variants of dysplastic process. The study helps us make the conclusion that the heightening of the intervertebral discs lengthiness leads the appearing in their back part of a maximal tension/effort in the vertical position of the body, in consequence of which we can observe the squeering of the disc in the vertebral canal. In the bending of the body we can observe a heighten level of the vertebral deformations, fact that be the cause of the change of its form (the appearance of the wedge likeness).

Key words: dysplastic process, the tense-deformed state, mathematical model.

Исследование напряжённо-деформированного состояния нижнепоясничного отдела позвоночника в норме и при некоторых вариантах диспластического процесса (математическая модель)

С целью подтверждения некоторых положений предложенной концептуальной модели генеза диспластического процесса, прогнозирования течения заболевания, совместно с сотрудниками лаборатории биомеханики Харьковского института патологии позвоночника им. Ситенко, была создана математическая модель состояния нижнепоясничного отдела позвоночника в норме и при некоторых вариантах диспластического процесса. Проведенное исследование позволяет сделать вывод о том, что повышение жесткости межпозвоночных дисков приводит к возникновению в их задней части напряжений максимального уровня при вертикальном положении тела, следствием чего может стать выдавливание диска в позвоночный канал. При наклонах туловища наблюдается повышенный уровень деформации тел позвонков, что может стать причиной изменения их формы.

Ключевые слова: диспластический процесс, напряжённо-деформированное состояние, математическая модель.

Având drept scop confirmarea unor propuneri ale modelului conceptual de geneză a procesului displazic, prognosticul evoluţiei patologiei, în colaborare cu cercetătorii laboratorului biomecanic al Institutului de Patologie al Coloanei Vertebrale „M. Sitenko” din Harkov, a fost elaborat un model matematic al stării regiunii inferioare a coloanei vertebrale normale și a unor forme ale procesului displazic.

În literatură sunt multe cercetări efectuate în scopul determinării gradului de duritate a discurilor, în particular, și a discurilor intervertebrale [1-3]. Dar repartizarea tensiunii pe blocurile vertebrale, dependența acestei stări de încordare de situațiile diverse funcționale ale coloanei vertebrale sunt studiate insuficient. Starea de încordare și caracteristicile de rezistență ale vertebrelor și ale discurilor intervertebrale au fost studiate până acum mai mult prin metode experimentale. Dar totuși în timpul studiilor experimentale este destul de greu de dedus unele concluzii despre pozițiile funcționale diverse ale vertebrelor. Încă o deficiență a metodei experimentale de studiu este imposibilitatea de a modifica parametrii fizici și geometrici ai modelului în funcție cu caracteristicile nedefinite ale modelelor necesare. Se înregistrează și anumite dificultăți în aprecierea unor rezultate ale acestei cercetări

despre stările de încordare–deformare (SÎD) în diferite regiuni ale coloanei vertebrale, în special în structurile interne ale țesutului osos. Modernizarea tehnicii de astăzi permite modelarea comportării sistemelor biomecanice. În literatură este foarte bine descrisă problema referitoare la crearea modelelor matematice ale coloanei vertebrale și la alegerea metodelor de rezolvare, dar cu toate, acestea nu se atestă analiza SÎD ale vertebrei în diverse poziții ale corpului și în funcție de diverse suprasolicitări. Un astfel de studiu va permite să lărgim limita de înțelegere a mecanismului de transmitere a forțelor în coloana vertebrală în diverse faze ale mișcării, în procesele displazice.

Pentru a efectua studiul SÎD al blocului vertebral a fost folosită metoda elementelor terminale (MET) care, la etapa contemporană, reprezintă cea mai răspândită metodă de analiză a insuficienței de mobilitate a segmentelor sistemelor biomecanice. Creând un nou model matematic cu ajutorul metodei elementelor terminale, este necesar de acoperit câteva etape: elaborarea unui model geometric și a unei distrugerii terminal-elementară, determinarea parametrilor materialelor folosite, crearea schemei de tensiune și determinarea limitelor în deplasarea modelului.

Caracteristicile geometrice ale modelului

La crearea modelului au fost luate în considerare măsurile statice de mijloc ale vertebrelor L3-L5 și ale discurilor intervertebrale la copiii de 14 ani, precum și particularitățile lor anatomice.

Alegerea elementelor terminale s-a bazat pe cerințele programului automat al distrucției element-terminal și pe cercetările efectuate în lucrarea Zenchevici O. (1975).

Tipul ales de element terminal (tetraedru nodular 10) este arătat pe figura 1. Calculele au fost efectuate cu ajutorul programului de calcul COSMOS-M.

Un model ET complet este reprezentat pe figura 2 și este constituit din 21534810 elemente-terminale izoparametrice nodulare.

Pe model sunt suprapuse limitările de deplasare a suprafeței inferioare a corpului vertebrei L5.

Proprietățile materialelor

Proprietățile mecanice ale țesutului osos sunt bine studiate. În lucrarea lui N. N. Kolotilov și a lui V. A. Berezovschii, pe lângă caracteristicile anizotropice ale țesutului osos, sunt prezentate și schimbările lor în funcție de vârstă. În acest studiu se presupunea că țesutul osos este omogen și izotrop. Modulul elasticității și coeficientul lui Puason ale diferitelor materiale, care se folosesc în calcul sunt expuse în tabelul 1.

Tabelul 1

Proprietățile mecanice ale materialelor care au fost folosite pentru modelare

Materialul	Modulul lui lung E (MPa)	Coeficientul lui Puason, ν	Limita elasticității (MPa)
Osul cortical	12000	0,3	70-100
Osul spongios	650	0,2	н/д
Cartilajul articular	10,6	0,49	н/д
Discul intraticular	4,2	0,45	2-10
Ligamentul longitudinal anterior	20	0,3	н/д
Ligamentul longitudinal posterior	15	0,3	н/д
Ligamentum flavum	8	0,3	н/д

Suprîncărcarea modelului

Conform cercetărilor altor autori, în calitate de sarcină, se alege greutatea unei părți a corpului, care este situată mai sus și care, conform unor date din literatură, deține aproape 50% din greutate totală a corpului vertebral al vertebrei L5. Sarcina exercitată asupra vertebrelor în poziție verticală se dispune în modul următor: 80% – asupra corpului vertebrei și 20% – asupra apofizelor articulare. În timpul modelării înclinației se presupune acțiunea unei greutăți (100%) doar asupra corpului vertebral, cu condiția lipsei contactului maselor articulare ale blocului vertebral L3-L5; de asemenea, au fost efectuate calcule pentru o variantă de înclinație intermediară (90% – pe corpul

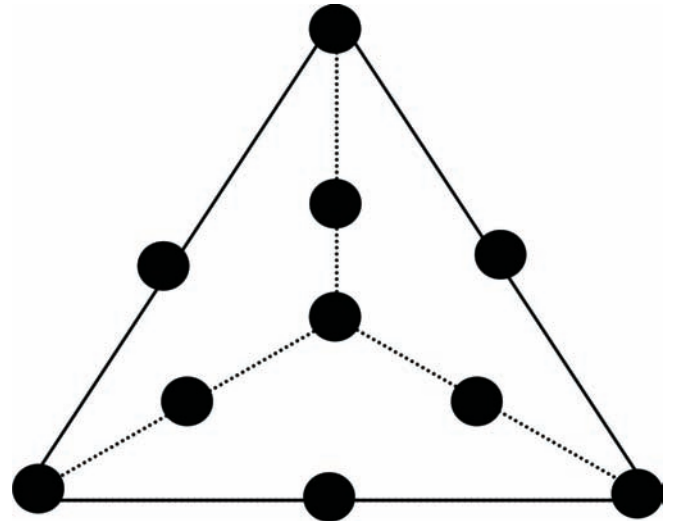


Fig. 1. Tetraedrul nodular.

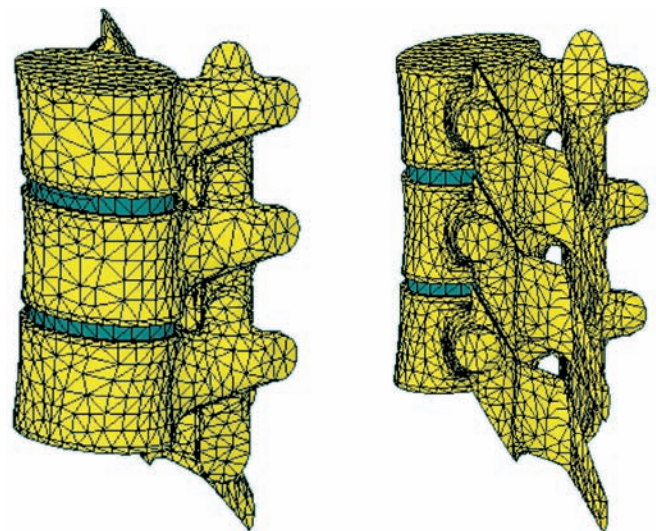


Fig. 2. Modelul de calcul element-terminal.

vertebrei și 10% – pe masele articulare) la 50% de contact (pe suprafață) – în masele articulare.

Rezultatele cercetării

Cercetarea SÎD a vertebrelor regiunii lombare a coloanei vertebrale au fost divizate în două etape. La o primă etapă s-au efectuat calculele și analiza SÎD a vertebrelor în cazul poziției verticale a corpului. A doua etapă prevedea două faze de înclinare a coloanei vertebrale, în timpul cărora are loc redistribuirea sarcinii și se micșorează suprafața de contact între masele articulare. Cercetările au avut loc în condiții de modelare a segmentului lombar al coloanei vertebrale normale și în diverse procese displazice. Modelarea spondilolistezei s-a efectuat prin schimbarea unor particularități mecanice ale discurilor intervertebrale și ale cartilajelor articulare.

Cercetarea SÎD a segmentului lombar al coloanei vertebrale în normă, în poziție ortostatică a corpului

În relatarea dată sunt prezentate rezultatele analizei SVF a modelului normal la distribuția sarcinii 80% asupra corpului vertebrei și 20% – pe suprafețele articulare. Aici și în

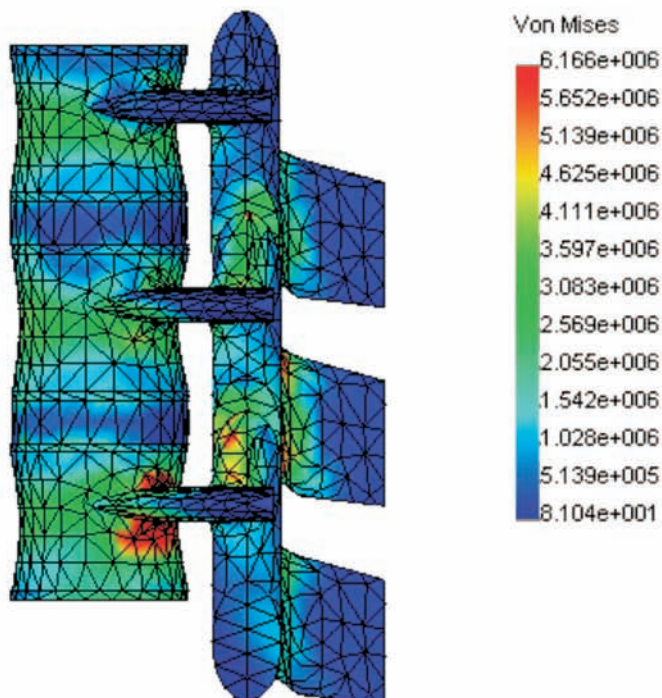


Fig. 3. Distribuirea sarcinii în modelul calculat în normă (din anterior).

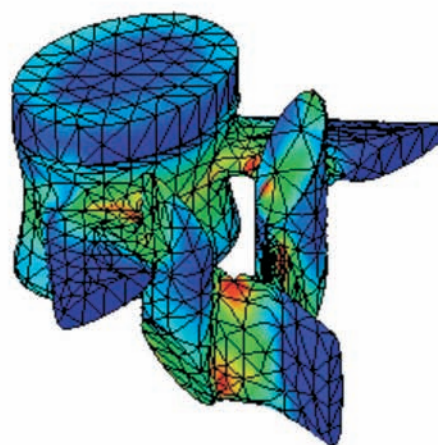


Fig. 4. Distribuirea sarcinii în modelul calculat în normă (din posterior).

continuare pe figuri nu este reprezentat stratul cartilagin și ligamentele.

Pe figurile 3-4 se demonstrează faptul că cele mai tensionate sunt suprafețele de contact ale rădăcinilor arcurilor și suprafețelor articulare ale vertebrei L4. Mărimea sarcinii în această zonă este egală cu 5,5 Mpa. În vertebra L5 nivelul presiunii ajunge până la 4,9 Mpa. Mai puțin tensionat în acest bloc este vertebra L3. Pentru corpurile vertebrelor L3 și L4 mai tensionată este suprafața anterioară, unde intensitatea este

aproape 1,1 Mpa și 1,6 Mpa, corespunzător pentru corpurile vertebrelor L3 și L4 (fig. 3).

Pe fig. 4 este reprezentată distribuția SVF a vertebrei L4 din posterior. În vertebra L5, în afară de rădăcina arcului și a maselor articulare, este prezentă o concentrare a tensiunii în regiunea posteroinferioară a corpului vertebral (4,4 Mpa). O astfel de tensiune ridicată în acest segment se explică prin faptul că, în această regiune, suprafața inferioară a corpului vertebrei L5 este unită dur.

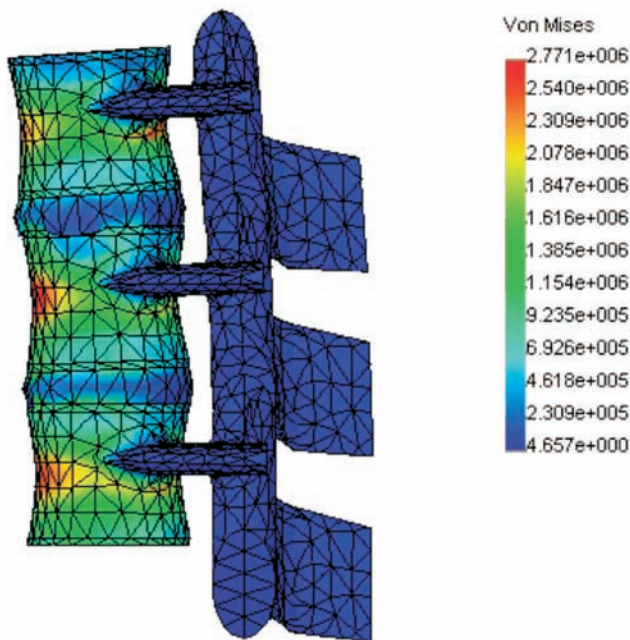


Fig. 5. Distribuirea sarcinii în modelul calculat normal (din anterior).

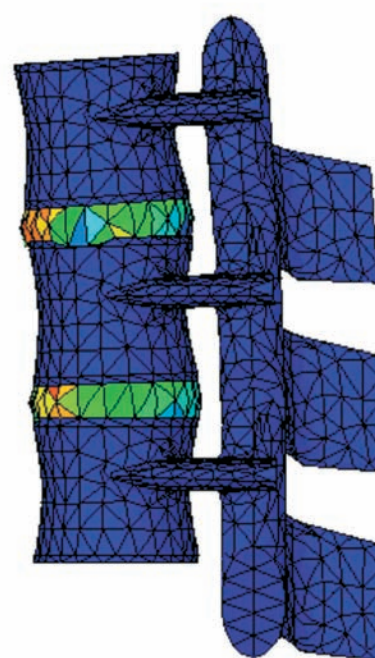


Fig. 6. Nivelul deformației în regiunea lombară a coloanei vertebrale la înclinație anterioară.

Calculul efectuat permite să concluzionăm că, în caz de poziție verticală a corpului în normă cea mai tensionată este regiunea de contact a rădăcinilor arcurilor cu suprafețele articulare. Nivelul de tensiune în corpurile vertebrelor este aproximativ de 3,5 ori mai scăzut decât în regiunea de contact a rădăcinilor arcurilor cu suprafețele articulare (5,5 Mpa). Nivelul tensionării în corpurile vertebrelor L3-L5 este cu mult mai scăzut decât limita lor de rezistență și, respectiv, nu se consideră critice.

În timpul înclinării corpului înainte

Calculul se efectuează în condițiile următoare: presiunea se aplică 100% pe corpul vertebrei L3, contactul apofizelor articulare lipsește.

Pe fig. 5 este arătat că distribuția sarcinii în model este modificată. În locul de contact al suprafețelor articulare și al rădăcinilor arcurilor, nu se remarcă o mărire a presiunii, ceea ce se explică prin lipsa contactului între ele. Respectiv se efectuează o redistribuire a presiunii pe corpul vertebrei. O valoare maximă o atinge presiunea în mijlocul părții anterioare a corpului vertebral L4 și constituie aproximativ 3 Mpa. Au crescut, de asemenea, și valorile presionale în vertebrele L3 (2,1 Mpa) și L5 (1,5 Mpa).

Trebuie de menționat că, în mod normal, la îndeplinirea unor mișcări ale corpului se deformează, în special, discurile intervertebrale, nivelul deformației este reprezentat pe fig. 6.

Acest calcul permite să facem concluzia că, la înclinarea anterioară, a avut loc o redistribuire a forțelor funcționale în blocul vertebral L3-L5. Cea mai mare sarcină o suportă corpurile vertebrale și discurile intervertebrale. În comparație cu poziția verticală a corpurilor nivelul tensiunii a crescut cu aproximativ 3 Mpa, ceea ce practic depășește de două ori (1,6 Mpa) importanța pentru poziția verticală.

Cercetarea stării presional-deformative a coloanei vertebrale în condițiile modelării displaziei, cu sporirea rigidității complexului de sprijin anterior sau posterior

Modelarea se efectuează în două variante. În prima variantă – pe calea sporirii plasticității discului intervertebral până la nivelul asemănător unui os cortical, în a doua variantă se face exact similar cartilajelor apofizelor articulare.

Evaluarea modelului cu cartilaj dur

Cercetările SVF ale segmentului lombar al coloanei vertebrale cu disc dur în poziția verticală au arătat că, în acest caz, concentrarea esențială a presiunii se notează în segmentul posterior al discului intervertebral și valorile sale ajung până la 6 Mpa în discul L4-L5 (fig. 7).

La înclinația anterioară a corpului, sarcina se distribuie practic uniform pe tot corpul. Cu toate acestea, se remarcă valori maxime ale presiunii în discurile intervertebrale, doar că în partea lor anterioară.

În comparație cu cercetările efectuate în „normă”, la mărirea valorii elasticității discurilor intervertebrale, corpurile vertebrelor încep să suporte o deformație considerabilă.

Conform graficului (fig. 8), în cazul poziției ortostatice a corpului un nivel maxim al presiunii poate fi atins prin majorarea modulului elasticității lor de 10 ori (42 Mpa), ceea ce este de 10 ori mai scăzută decât elasticitatea osului spongios. Majorarea continuă a modulului elasticității nu duce la majorarea tensiunii. La flexiunea anterioară se remarcă o scădere neesențială a tensiunii în discurile intrvertebrale la o valoare de 420 Mpa a modulului elasticității, dar la o majorare mai considerabilă acest modul crește.

Cercetările efectuate permit să facem concluzia că majorarea rigidității discurilor intervertebrale duce la apariția în segmentul lor posterior a unui nivel de maximă tensiune în

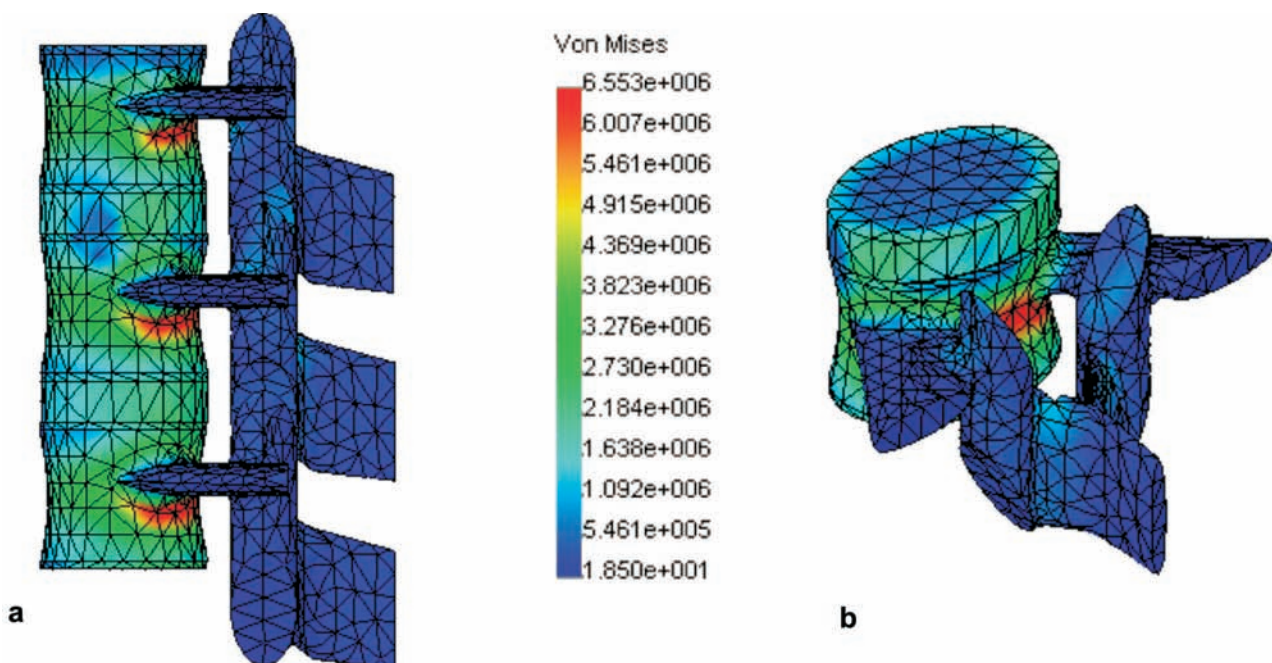


Fig. 7. Distribuția presiunii în segmentul lombar al coloanei vertebrale în cazul majorării durității discului intervertebral: a) în derivație sagittală; b) în vertebra L4 și în discul L4-L5.

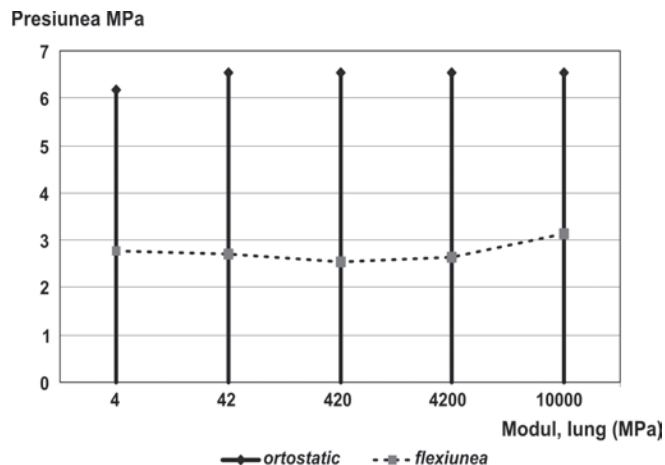


Fig. 8 Graficul dependenței tensiunii în discurile intervertebrale de valorile elasticității lor.

poziție verticală a corpului, ceea ce poate duce la o deplasare a discului în canalul medular. La înclinarea corpului se remarcă un nivel înalt de deformare a corpurilor vertebrelor, ceea ce poate fi cauza schimbării de formă a acestora.

Cercetarea modelului în cazul majorării rigidității cartilajului articular

Aceste cercetări au arătat că creșterea elasticității cartilajului articular în poziție verticală a corpului nu va duce la schimbări deformante considerabile. Cele mai expuse zone de tensiune sunt rădăcinile arcurilor și suprafețele articulare ale articulațiilor. Nivelul maxim de presiune este același ca și în "normă" (2 MPa). Această situație este prezentată pe fig. 9. La aplecarea posterioară a corpului rigiditatea majorată a cartilajului articular duce la majorarea absolută a presiunii în complexul de sprijin posterior al vertebrelor, ceea ce poate fi cauza deformării lor în aceste sectoare.

După cum demonstrează calculele efectuate, mărimea modulului elasticității cartilajului articular practic direct proporțional acționează asupra valorilor maxime ale tensiunii în complexul de sprijin posterior.

Cercetarea efectuată permite să facem concluzia că majorarea rigidității cartilajului articular practic nu influențează distribuția tensiunii în poziție verticală, ceea ce în flexiunea

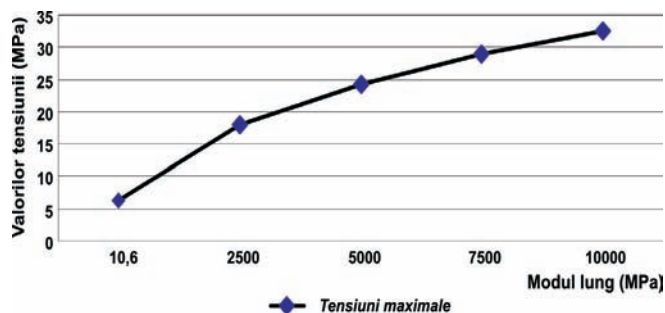


Fig. 9. Graficul dependenței valorilor tensiunii în model de modulul elasticității cartilajului articular.

anterioară a coloanei vertebrale duce la o majorare direct proporțională a presiunii în complexul de sprijin posterior al vertebrelor, care poate fi cauza deformării și distrugerii acestora.

În poziție verticală a corpului în normalitate, cea mai expusă este regiunea de contact a suprafețelor articulare și a rădăcinilor arcurilor, la flexiunea anterioară are loc o redistribuire a forțelor funcționale între vertebrele L3-L5.

Majorarea rigidității discurilor articulare duce la apariția în regiunea posterioară a lor a unor valori maxime de presiune în cazul poziției verticale a corpului, ca urmare se poate produce alunecarea discului în canalul medular. La flexiunea anterioară a corpului se remarcă un nivel ridicat al deformăției corpurilor vertebrale, ceea ce poate fi cauza schimbării formei acestora.

Bibliografie

1. Сак Н. Н. Анатомия поясничных межпозвоноковых дисков. Анатомо-экспериментальное исследование. Автореф. дисс. докт. мед. наук. Харьков, 1992, 35 с.
2. Зенкевич О. Н. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975, 541 с.
3. De Palma A. F. The intervertebral disc. Ph., 1970, p. 370.
4. Ionescu N. Coloana vertebrală. București, Ed. Med., 1977.

Nicolae Șavga, dr., colaborator științific superior
Catedra Chirurgie Pediatrică a USMF „Nicolae Testemițanu”
Laboratorul Infecții Chirurgicale la Copii
Chișinău, str. Burebista, 93
Tel.: 559653

E-mail: niknik20086@rambler.ru

Recepționat 4.06.2009