

УДК 531/534: [57+61]

В.П. Баландин, В.С. Туктамышев

V.P. Balandin, V.S. Tuktamyshev

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ
ВНУТРИБРЮШНОГО ДАВЛЕНИЯ НА НАГРУЖЕНИЕ
ПОЗВОНОЧНОГО СТОЛБА**

**COMPUTER SIMULATION OF THE INFLUENCE
ABDOMINAL PRESSURE ON THE LOADED SPINE**

Рассматривается актуальная проблема, связанная с внутрибрюшным давлением. Приводится обзор литературы, посвященной пониманию связей между поясничным отделом позвоночного столба и внутрибрюшным давлением. Поставлена и решена модельная задача о влиянии внутрибрюшного давления на поясничный отдел позвоночного столба во время поднятия тяжести.

Ключевые слова: внутрибрюшное давление, нагружение позвоночного столба, конечно-элементный анализ, программный комплекс ANSYS, компьютерное моделирование.

In this article we consider the actual problem associated with intra-abdominal pressure. The article provides a review of the literature devoted to the understanding of the links between the lumbar spine and abdominal pressure. The task of the impact of intra-abdominal pressure on the lumbar spine while lifting the load from the ground.

Keywords: intraabdominal pressure, loading the spine, finite element analysis, ANSYS, computer modeling.

Невозможно переоценить роль позвоночника в жизнедеятельности человека. Это важнейшая часть опорно-двигательного аппарата, которая постоянно воспринимает различные виды нагрузок (скручивание, сгибание, разгибание). Для того чтобы понять, каким образом внутрибрюшное давление влияет на двигательные сегменты позвоночника, необходимо рассмотреть данные из соответствующей области анатомии и физиологии человека.

Позвоночник представляет собой самую сложную структуру опорно-двигательного аппарата человека. Сегменты (позвонки) позвоночного столба образуют канал для спинного мозга, при этом они способны двигаться относительно друг друга, что обеспечивается их сложным анатомическим строением. В процессе жизнедеятельности человеком совершаются различные

действия, которые могут приводить к перегрузкам позвоночного столба, при этом основную нагрузку испытывает поясничный отдел. К таким действиям можно отнести, например, поднятие и удержание тяжелого груза. Негативными последствиями перегрузок чаще всего оказываются боли в спине, остеохондроз и межпозвоночные грыжи [1–4]. Высокий уровень механических напряжений в межпозвоночных дисках обусловлен активностью спинных мышц [4]. Наибольшую опасность в этом смысле представляет чрезмерное сокращение мышцы, выпрямляющей позвоночник (*m. erector spinae* [5]), которая способствует поддержанию естественного расположения позвонков в случае действия на позвоночный столб сгибающих моментов. При удержании и поднятии тяжелых грузов происходит сильное сокращение волокон *m. erector spinae*, в большинстве случаев приводящее к возникновению повреждений в поясничной области позвоночника.

Впервые упоминания о том, что внутрибрюшное давление уменьшает компрессию в поясничном отделе позвоночного столба, появились в научной литературе еще в 1923 году [2]. Следует отметить, что внутрибрюшное давление – это взаимная компрессия внутрибрюшных масс и их давление на оболочку брюшной полости [6]. Литературный обзор, посвященный определению роли внутрибрюшного давления в механизме разгрузки поясничного отдела позвоночника, приведен в работе [1]. Влияние внутрибрюшного давления на напряженное состояние позвоночного столба остается малоизученным. В данной работе осуществляется попытка установления взаимосвязи между внутрибрюшным давлением и внутренними усилиями, возникающими в позвоночнике при удержании в руках тяжелого груза.

Поясничный отдел позвоночника включает в себя пять позвонков L1–L5 (медицинское обозначение, сверху вниз) в районе брюшной полости, начинаясь в конце реберного участка и заканчиваясь на уровне костей таза, т.е. между грудным и крестцовым отделами позвоночника. Из-за большой осевой нагрузки, приходящейся на поясничный отдел, эти позвонки имеют самый большой размер [7–10].

Между соседними позвонками находятся межпозвоночные суставы, межпозвоночные диски, связки и мышечные волокна, которые одновременно обеспечивают подвижность и стабильность друг относительно друга. В данном сегменте наибольший интерес у исследователей вызывают межпозвоночные диски, анализ напряженно-деформированного состояния которых является важнейшей задачей в профилактике и лечении распространенных патологических состояний поясничного отдела позвоночника.

Многочисленные исследования доказывают зависимость механических напряжений, которые возникают в межпозвоночных дисках поясничного отдела позвоночника, от активности мышц спины. В этих исследованиях пока-

зано, что давление, возникающее за счет силы тяжести в вертикальном состоянии, не является основным фактором перегрузки дисков. Наибольшую опасность представляют усилия, действующие на поясничный отдел позвоночника со стороны мышцы, выпрямляющей спину (*m. erector spinae* [2, 3, 5]). В процессе поднятия тяжелого груза из согнутого положения (рис. 1) мышца, выпрямляющая спину, активно поддерживает естественное положение позвонков. Однако, когда вес груза достаточно велик, сохранение естественного положения позвоночника требует чрезмерного сокращения мышечных волокон, в результате чего в передней части межпозвоночных дисков возникает сильная компрессия, что может повлечь за собой появление болей в спине и другие негативные последствия.

Наиболее распространенной ситуацией для биомеханического анализа является поднятие тяжелого груза при наклоне туловища вперед. При этом различными авторами получены разные данные. Однако все они сходятся в том, что в процессе поднятия тяжелого груза давление на поясничные межпозвоночные диски возрастает в несколько раз по отношению к усилиям, действующим на поясничный отдел позвоночного столба при вертикальном положении тела.

В 1923 году [4] произошло первое упоминание зависимости внутрибрюшного давления и механических напряжений в поясничном отделе человека. В работе [5] произведен литературный обзор влияния внутрибрюшного давления на нагрузку поясничного отдела позвоночного столба человека.

Брюшная полость – пространство в нижней части туловища, заполненное внутренними органами. Сверху брюшное пространство ограничено диафрагмой, сзади – поясничным отделом позвоночного столба и мышцами поясницы, спереди и с боков – мышцами живота, снизу – диафрагмой таза. Отдельно стоит отметить, что передняя брюшная стенка и ее боковые участки являются эластичными. Это обеспечивает соответствие между постоянно изменяющимся объемом содержимого брюшной полости и объемом, заключенным внутри ее оболочки.

Внутри полости находятся толстый и тонкий кишечники, двенадцатиперстная кишка, желудок, почки, печень, поджелудочная железа, селезенка, надпочечники, мочеточники, часть мочеиспускательного канала, внутренние половые органы. Вдоль задней стенки брюшной полости проходят крупные кровеносные (нижняя полая вена, брюшная часть аорты) и лимфатические сосуды. В пространстве между органами находится серозная жидкость, которая обеспечивает низкий коэффициент трения между ними. Количество жидкости в норме не превышает 50 мл.

Когда внутрибрюшное содержимое не соответствует объему, ограниченному нерастянутой оболочкой брюшной полости, возникает внутрибрюшное давление, т.е. взаимная компрессия внутрибрюшных масс и их давление на оболочку брюшной полости [2].

При устойчивом повышении внутрибрюшного давления возможно появление серьезных патологических изменений в организме человека [6]. Вместе с тем в мировой научной литературе встречаются экспериментальные данные, утверждающие, что в отличие от длительной внутрибрюшной гипертензии кратковременное увеличение внутрибрюшного давления имеет положительные эффекты и может использоваться при профилактике заболеваний межпозвоночных дисков поясничного отдела позвоночного столба.

Рассмотрим ситуацию, когда человек поднимает груз с некоторой поверхности, наклоняясь при этом вперед (рис. 1).



Рис. 1. Схематичное изображение исследуемого процесса поднятия тяжести

Следует отметить, что в работе [12] для определения зависимости между внутрибрюшным давлением и нагрузками в поясничном отделе позвоночника использовалась модель изгиба криволинейной балки. Сила реакции опоры N_B , возникающая между пятым поясничным позвонком и крестцовым отделом позвоночника, использовалась как параметр, отражающий степень компрессии поясничного сегмента позвоночного столба (рис. 2). Внутрибрюшное давление моделировалось равномерно распределенной нагрузкой q (см. рис. 2). В результате выполнения расчетов было показано, что давление, образуемое в брюшной полости за счет усилий мышц живота, способно значительно уменьшить искомую реакцию опоры.

Однако для приближения к реальным нагрузкам модели изогнутой балки, разумеется, недостаточно. В данной работе для проведения биомеханического анализа нагружения поясничного отдела позвоночного столба при действии внутрибрюшного давления используется метод конечных элементов. При этом учитываются отдельные сегменты, входящие в состав рассматриваемого сегмента позвоночника, а именно позвонки и межпозвоночные диски (рис. 3).

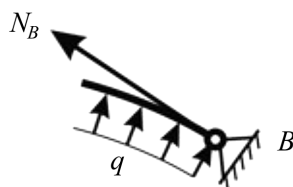
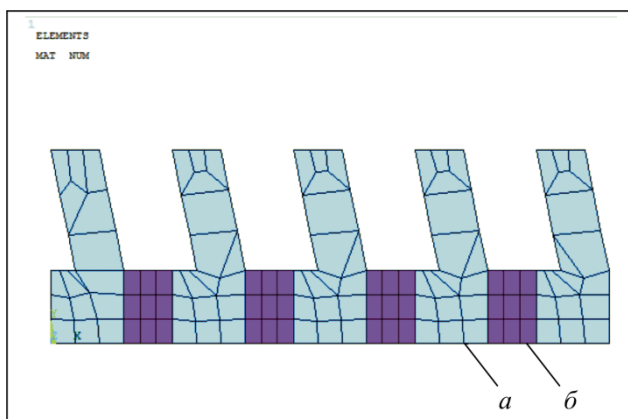


Рис. 2. Модель криволинейной балки

Рис. 3. Модель поясничного отдела позвоночника:
а – позвонки; б – межпозвоночные диски

Итак, на первом этапе исследовалась задача о нагружении области, представленной на рис. 3, усилиями m (рис. 4), действующими со стороны мышечных волокон *m. erector spinae*. Предполагается, что рассматриваемая область закреплена с левой стороны (таким образом моделируется пояснично-крестцовое сочленение). На рис. 4 обозначена сила g , моделирующая действие поднимаемого груза.

Для решения задачи использовались следующие значения механических свойств тканей:

- для межпозвоночных дисков поясничного отдела человека: модуль Юнга – 57 МПа, коэффициент Пуассона – 0,4, плотность – 1090,3 кг/м³;
- для позвонков поясничного отдела: модуль Юнга – 350 МПа, коэффициент Пуассона – 0,3, плотность – 2020 кг/м³ [13].

На рис. 5 показаны напряжения в исследуемой области при действии силы $g = 50$ Н без учета внутрибрюшного давления. Видно, что нагрузка распределена неравномерно и смещена в сторону грудной части.

На втором этапе решения задачи учитывалось внутрибрюшное давление, которое моделировалось распределенной нагрузкой с интенсивностью $p_{вб}$. На рис. 6 приведены напряжения в расчетной области при $g = 50$ Н и $p_{вб} = 10$ Н/м.

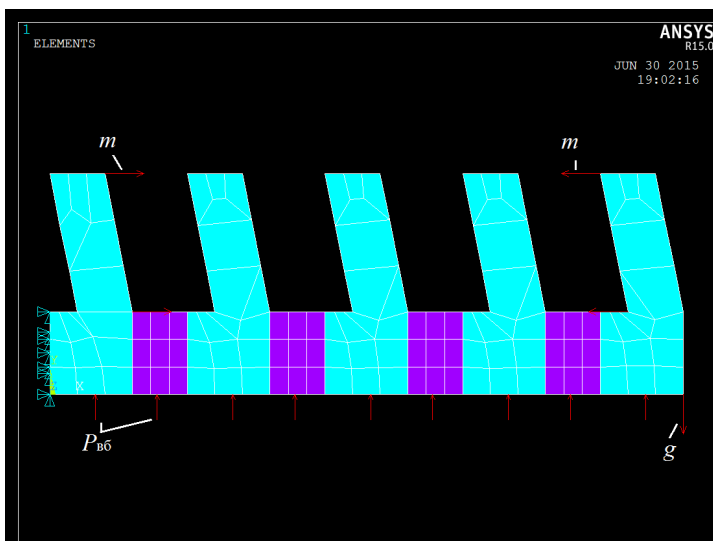


Рис. 4. Граничные условия: m – сила мышцы, выпрямляющей спину; g – сила от поднятия груза; $p_{вб}$ – внутрибрюшное давление

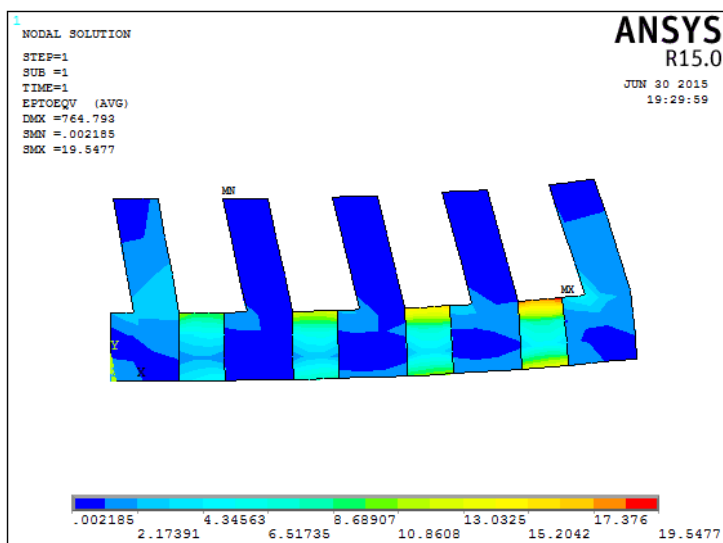


Рис. 5. Напряжение в межпозвоночных дисках

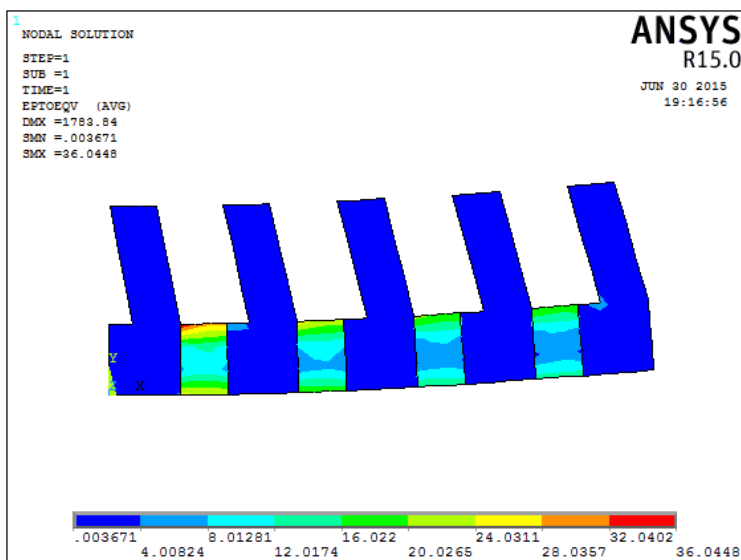


Рис. 6. Напряжение в межпозвоночных дисках с учетом внутрибрюшного давления

Заметим, что нагрузка вновь распределена неравномерно, но при этом произошло смещение основного напряжения на область, где позвоночный столб наиболее массивен и способен воспринимать повышенные нагрузки без ущерба здоровью человека, который поднимает груз с земли.

В данной статье приведен литературный обзор, посвященный влиянию внутрибрюшного давления на поясничный отдел позвоночника человека. Решена плоская задача, описывающая взаимосвязь между внутрибрюшным давлением и нагрузками в поясничном отделе. Построена модель из пяти поясничных позвонков и дисков между ними. На рисунках видно, что при возникновении дополнительного напряжения со стороны брюшной полости меняется характер распределения нагрузки на межпозвоночных дисках, которые в большей степени, нежели позвонки, воспринимают нагрузку. Так, основное напряжение располагается на ближнем к крестцу (закреплению) межпозвоночном диске, который несколько крупнее остальных дисков в силу анатомических и физиологических особенностей позвоночного столба человека.

Стоит заметить, что в данной работе рассматривалась упрощенная модель. Для того чтобы учесть большее число реальных факторов, необходимо решать более сложную задачу. В дальнейшем предполагается построение модели с использованием анатомических и физиологических особенностей строения позвонков и межпозвоночных дисков, приложение сил к точкам крепления мышц. Планируется использовать снимки компьютерной томографии, которые

позволят построить анатомически точную модель. В данный момент производится экспорт данных со снимков компьютерной томографии в программный комплекс ANSYS.

Список литературы

1. Spine loading characteristics of patients with low back pain compared with asymptomatic individuals / W.S. Marras, K.G. Davis, S.A. Ferguson, B.R. Lucas, P. Gupta // *Spine*. – 2001. – Vol. 26, № 23. – P. 2566–2574.

2. The role of dynamic three-dimensional trunk motion in occupationally related low back disorders: the effects of work-place factors, trunk position, and trunk motion characteristics on risk of injury / W.S. Marras, S.A. Lavender, S.E. Leugans, S.L. Rajulu, W.G. Allread, F.A. Fathallah, S.A. Ferguson // *Spine*. – 1993. – Vol. 18, № 5. – P. 617–628.

3. Back disorders and nonneutral trunk postures of automobile assembly workers / L. Punnett, L.J. Fine, W.M. Keyserling, G.D. Herrin, D.B. Chaffin // *Scandinavian Journal of Work Environment and Health*. – 1991. – Vol. 17, № 5. – P. 337–346.

4. Flexion and rotation of the trunk and lifting at work are risk factors for low back pain: results of a prospective cohort study / W.E. Hoogendoorn, P.M. Bongers, H.C. de Vet, M. Douwes, B.W. Koes, M.C. Miedema, G.A. Ariëns, L.M. Bouter // *Spine*. – 2000. – Vol. 25, № 23. – P. 3087–3092.

5. Синельников Р.Д. Атлас анатомии человека: в 3 т. – М.: Медгиз, 1963. – Т. 1. – 477 с.

6. Внутривентриальное давление человека / В.С. Туктамышев, А.Г. Кучумов, Ю.И. Няшин, В.А. Самарцев, Е.Ю. Касатова // *Российский журнал биомеханики*. – 2013. – Т. 17, № 1 (59). – С. 22–31.

7. Туктамышев В.С., Соломатина Н.В. Влияние внутривентриального давления на состояние поясничного отдела позвоночника // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – № 8. – С. 77–81.

8. Keith A. Man's posture: its evolution and disorders. Lecture IV. The adaptation of abdomen and its viscera to the orthograde posture // *British Medical Journal*. – 1923. – Vol. 21, № 1. – P. 587–590.

9. Spine loading characteristics of patients with low back pain compared with asymptomatic individuals / W.S. Marras, K.G. Davis, S.A. Ferguson, B.R. Lucas, P. Gupta // *Spine*. – 2001. – Vol. 26, № 23. – P. 2566–2574.

10. Ortengren R., Andersson G.B., Nachemson A.L. Studies of relationships between lumbar disc pressure, myoelectric back muscle activity, and intra-abdominal (intra-gastric) pressure // *Spine*. – 1981. – Vol. 6, № 1. – P. 513–520.

11. Туктамышев В.С., Безматерных В.В. Моделирование влияния внутрибрюшного давления на нагружение позвоночного столба [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. – 2014. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/117-13746> (дата обращения: 5.05.2015).

12. Палатинская И.П., Долганина Н.Ю., Попцова Т.Ю. Суперкомпьютерное моделирование динамических нагрузок поясничного отдела позвоночника // Вестник УГАТУ. – 2013. – Т. 17, № 5 (58). – С. 230–236.

Получено 11.09.2015

Баландин Вячеслав Павлович – магистрант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, факультет прикладной математики и механики, гр. БМ-14-1м, e-mail: teomoto@mail.ru.

Туктамышев Вадим Саитзянович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической механики и биомеханики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: helpinvader@list.ru.